

بريجيته فالكينبورج



المركز القومي للترجمة



مكتبة
الفكر الجديد

01-06-2018

ميتافيزيقا الجسيمات

دارسة نقدية لواقعية ما دون الذرة

ترجمة

نبيل ياسين البكري

أحمد حمدي مصطفى

2790

ميتافيزيقا الجسيمات

دراسة نقدية لواقعية ما دون الذرة

المركز القومي للترجمة
تأسس في أكتوبر ٢٠٠٦ تحت إشراف: جابر عصفور
مدير المركز: أنور مغيث

- العدد: 2790
- ميتافيزيقا الجسيمات: دراسة نقدية لواقعية ما دون الذرة
- بريجيتة فالكنبورج
- نبيل ياسين البكري، وأحمد حمدي مصطفى
- الطبعة الأولى 2017

هذه ترجمة كتاب:

Particle Metaphysics: A Critical Account of Subatomic Reality

By: Brigitte Falkenburg

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

Translation from the English language edition:

Particle Metaphysics by Brigitte Falkenburg

Springer- Verlag is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

حقوق الترجمة والنشر بالعربية محفوظة للمركز القومي للترجمة
شارع الجبلية بالأوبرا- الجزيرة- القاهرة. ت: ٢٧٣٥٤٥٢٤ فاكس: ٢٧٣٥٤٥٥٤
El Galalaya St. Opera House, El Gezira, Cairo.
E-mail: nctegypt@nctegypt.org Tel: 27354524 Fax: 27354554

ميتافيزيقا الجسيمات

دراسة نقدية لواقعية ما دون الذرة

تأليف: بريجيتيه فالكينبورج

ترجمة: نبيل ياسين البكري

أحمد حمدي مصطفى



2017

بطاقة الفهرسة
إعداد الهيئة العامة لدار الكتب والوثائق القومية
إدارة الشؤون الفنية

فالكينبورج، بريجيتته
ميتافيزيقا الجسيمات : دراسة نقدية لواقعية ما دون الذرة
تأليف: بريجيتته فالكينبورج، ترجمة: نبيل ياسين البكري؛ أحمد
حمدي مصطفى
ط ١ - القاهرة : المركز القومي للترجمة، ٢٠١٧
٧١٦ ص، ٢٤ سم
١ - ما وراء الطبيعة، علم
(أ) البكري ، نبيل ياسين (مترجم)
(ب) مصطفى ، أحمد حمدي (مترجم مشارك)
(ج) العنوان
١١٠

رقم الإيداع ٢٠١٥ / ٢٦٨٤٥
التقييم الدولي: 2 - 0521 - 977-92 - 978 - I.S.B.N
طبع بالهيئة العامة لشؤون المطابع الأميرية

تهدف إصدارات المركز القومي للترجمة إلى تقديم الاتجاهات والمذاهب الفكرية المختلفة للقارئ العربي وتعريفه بها. والأفكار التي تتضمنها هي اجتهادات أصحابها في ثقافتهم، ولا تعبر بالضرورة عن رأي المركز.

مجموعة آفاق المعرفة

انطلاقاً من استشعار المركز القومي للترجمة المسؤولية عن تقديم الأعمال الجادة، التي تمثل إضافة معرفية للمكتبة العربية، وهي المسؤولية التي قد لا يكون من المتوقع أن يضطلع غيره بها، فقد وقع اختياره على "مجموعة الأفاق" التي تصدرها دار شبرنجر المعروفة بتميز إصداراتها. وقد تم هذا الاختيار بناء على المميزات التالية للسلسلة المذكورة:

أنها مخصصة للمشكلات الجارية الجديدة والبازغة في العلم الحديث، وما يدور حولها وحول تحدياتها من نقاشات أكاديمية وفلسفية خصبة.

ورغم كون هذه المشكلات تمثل قمة العلم في مجالاتها المختلفة، فإن إصدارات السلسلة تختلف عن غيرها من الإصدارات العلمية المتخصصة ذات الموضوع الواحد (المونوجراف) في حرصها على تقديم المعرفة المحققة بصورة نتيج للقارئ المتق غير المتخصص أن يلم بمغزاها ودلالاتها، وذلك يعد من أهداف المركز الأصلية.

وبخلاف الصيغة التقليدية للمونوجراف التي تكون أحادية النظرة في كثير من الأحيان، فإن السلسلة تعالج الموضوع الواحد من زوايا مختلفة، تسمح باستيعاب عطاء الدراسات البينية والمتعددة الفروع ذات الصلة، في المعالجة الموسوعية المدققة للموضوع.

ولا يقل عن ذلك أهمية، أنها تتيح للمشتغلين بالعلم الاطلاع على القضايا المهمة، والتي كثيراً ما تكون خلاقية، والتي تقع خارج نطاق تخصصاتهم. وهذا الأمر ينعكس على مجالاتهم ويثريها في العصر الحديث عن وحدة المعرفة وتكاملها.

أخيراً، فإن التنوع الكبير الذى تتميز به مجموعة الأفاق سيحفز القارئ، كما يستهدف محررو السلسلة بحق، أن يوسع من آفاق معرفته الخاصة.

لهذه الأسباب كلها يسعد المركز أن يقدم ترجمة عربية للعديد من عناوين هذه السلسلة للقراء المهتمين والعلماء والباحثين، راجياً أن تحقق أهدافها، وداعياً الجميع إلى التواصل بتقديم ملاحظاتهم ومقترحاتهم بخصوصها.

المركز القومى للترجمة.

الإهداء

إلى أمي

المحتويات

15 تقديم

19 تصدير

الفصل الأول: الواقعية العلمية

43 ١-١ المعرفة التجريبية والميتافيزيقا

56 ٢-١ تمييزات أكثر أو أقل تجريبية

70 ٣-١ الواقعي والفعلي

84 ٤-١ الواقعية ونظرية الكم

96 ٥-١ ميتافيزيقا الفيزياء

108 ٦-١ نحو واقعية الخصائص

الفصل الثاني: توسيع مدى الواقعية الفيزيائية

119 ١-٢ عرض الكميات الفيزيائية

128 ٢-٢ الأمثلة والمنهج التجريبي

139 ٣-٢ الكشف أم التصنيع؟

152 ٤-٢ الظواهر وعللها

163	..... ٥-٢ تعميم الملاحظة
174	..... ٦-٢ الواقعية التجريبية للفيزياء
الفصل الثالث: ملاحظة الجسيم وقياسه	
191	..... ١-٣ ثنائية المفهوم الجسيمي
197	..... ٢-٣ الدليل على وجود جسيم: مثالان تطبيقيان
212	..... ٣-٣ تنظير الملاحظات
245	..... ٤-٣ مسار البوزيترون
252	..... ٥-٣ تحديد الجسيم والديناميكا الكهربائية الكمية
261	..... ٦-٣ هل توجد جسيمات دون ذرية؟
الفصل الرابع: سبر أغوار البنية دون الذرية	
273	..... ١-٤ تجارب التشتت
282	..... ٢-٤ تشتت "رذرفورد" والمقياس غير المتغير
288	..... ٣-٤ شبه النقطية فى النطاق الكمي
292	..... ١-٣-٤ معامل الشكل التقليدى
299	..... ٢-٣-٤ تعميمات نسبية
309	..... ٤-٤ سلسلة النماذج
318	..... ٥-٤ التناظر مع الميكروسكوب الضوئي
326	..... ٦-٤ النظر داخل الذرة

الفصل الخامس: القياس ووحدة الفيزياء

- 337 ١-٥ الالمقاسية والقياس
- 347 ٢-٥ نظرية القياس غير المتجانسة
- 356 ٣-٥ مسارات الجسيمات
- 358 ١-٣-٥ تنبؤات "موت" حول المسارات التقليدية
- 363 ٢-٣-٥ حساب "بيت" للطاقة المفقودة
- 373 ٣-٣-٥ كيف تنهار الصورة التقليدية
- 376 ٤-٣-٥ تحليل البيانات في تجارب التشتت
- 381 ٤-٥ بناء الجسور: توحيد المبادئ
- 383 ١-٤-٥ مبدأ التناظر لـ "بور"
- 386 ٢-٤-٥ تعميم مبدأ التناظر
- 393 ٣-٤-٥ مبادئ توحيد أخرى
- 400 ٥-٥ مقاييس الكميات الفيزيائية
- 407 ٦-٥ تساؤلات مجردة حول اتساق المدلول اللفظي

الفصل السادس: تحول جوهري في المفهوم الجسيمي

- 419 ١-٦ الجسيمات الكلاسيكية
- 426 ٢-٦ انتقال إلى الجسيمات الكمية

- 428 ١-٢-٦ الموجات المادية
- 432 ٢-٢-٦ كمات الضوء
- 436 ٣-٦ المفهوم الإجرائي للجسيم
- 441 ٤-٦ مزيد من الجسيمات الكمية
- 444 ١-٤-٦ كمات المجال
- 454 ٢-٤-٦ تعريف المجموعة النظرية
- 461 ٣-٤-٦ الجسيمات الافتراضية
- 471 ٤-٤-٦ أشباه الجسيمات
- 486 ٥-٦ أجزاء المادة
- 487 ١-٥-٦ تعميم مكونات المادة
- 494 ٢-٥-٦ نموذج الكوارك
- 505 ٦-٦ ماذا تبقى من أنواع الجسيمات؟

الفصل السابع: ازدواجية الموجة - الجسيم

- 522 ١-٧ جسيمات الضوء وموجات المادة
- 525 ٢-٧ الازدواجية الموجية - الجسيمية في ميكانيكا الكم
- 526 ١-٢-٧ الاحتمالية الموجية لبورن
- 532 ٢-٢-٧ رؤية بور التامة

- 541 ٣-٢-٧ تماثلات هايزنبرج
- 543 ٣-٧ صياغة الموجات ورصد الجسيمات
- 547 ١-٣-٧ ما الذي يصنع الفارق؟
- 554 ٢-٣-٧ فوتون واحد من مصدري ليزر
- 557 ٣-٣-٧ فوتونات مستقطبة
- 564 ٤-٧ إعادة اعتبار الشق المزدوج
- 567 ١-٤-٧ كيفية تخزين ومحو مسار المعلومات
- 576 ٢-٤-٧ هل توجد التناحية دون عدم التحديد؟
- 585 ٣-٤-٧ العلاقات الازدواجية
- 592 ٥-٧ تجارب الاتجاه الحديث
- 609 ٦-٧ مسببات الظواهر

الفصل الثامن: واقعية ما دون الذرة

- 616 ١-٨ إعادة النظر في الواقعية العلمية
- 620 ٢-٨ معنى مفاهيم الكم
- 624 ٣-٨ المفهوم الميربولوجي للجسيم
- 630 ٤-٨ المفهوم العلي للجسيم
- 632 ٥-٨ ازدواجية الموجة - الجسيم
- 639 ٦-٨ واقعية ما دون الذرة: رؤية نقدية

الملاحق

- 653 ملحق (أ): نظرية القياس
- 663 ملحق (ب) : المُبرهنة الثانية للتحليل البُعدي
- 666 ملحق (ج) : مساحة المقطع المؤثر
- 670 ملحق (د) : التحليل البعدي لتشتت رنر فورد
- 674 ملحق (هـ) : منطق العلاقات بين الكل والأجزاء (الميريولوجيا)..
- 683 قائمة بالمراجع
- 715 معجم إنجليزي-عربي
- 718 معجم عربي- إنجليزي

تقديم

الميتافيزيقا لغة هي ما بعد الطبيعة، وهي في التقليد الفلسفي الموغل في تاريخ الفكر الإنساني البحث عن العلل الأولى، أو البحث في الموجود بما هو موجود. أما اليوم فالميتافيزيقا مصطلح جامع لأي بحث يُثير التساؤلات حول واقعية ما لا يُمكن التعامل معه بالمنهج العلمي.

أما الجسيمات فهي جسيمات ما دون الذرة، إذ يعرف فيزيائيو الجسيمات اليوم أن هناك مجموعتين من هذه الجسيمات التي تُبنى منها المادة، وهما الكواركات واللبتونات. يندرج تحت كل مجموعة من هاتين المجموعتين ستة أنواع؛ فبالنسبة إلى الكواركات هناك: الأعلى والغريب والمألوف والقاع والقمة، أما في مجموعة اللبتونات فهناك: الإلكترون ونيوترينو الإلكترون والميون ونيوترينو الميون والتاو ونيوترينو التاو. والسؤال الآن إذا كان العلم قد قطع خطوات واسعة نحو تفكيك بنية المادة والنفوذ إلى جسيماتها الدقيقة، فماذا نحن فاعلون إذا بالميتافيزيقا؟!

أليست هذه هي الميتافيزيقا التي طالما تعرضت للهجوم عليها، وطالما ارتبط الهجوم عليها بنجاح العلم في تحقيق قفزات واسعة نحو تفسير الكون والطبيعة؛ بل وجرى اعتبارها على طرف النقيض من العلم الحديث، فالعلم عيني تجريبي، أما الميتافيزيقا فتأملية نظرية؛ إنها محاولة لفض أسرار الطبيعة دون ملاحظة أو تجربة.

شهد القرن العشرون انهياراً للصورة الكلاسيكية لعلم الفيزياء ودعامتها الحتمية، فقد أبانت نظريتنا النسبية والكم وتداعياتهما وتجلياتهما عن قصور في تصورات الفيزياء الكلاسيكية العينية لمفاهيم الكتلة والسرعة والزمان والمكان المطلقين، كما فرضت طبيعة الموضوعات التي تدرسها الفيزياء المعاصرة تطويراً جذرياً في شكل التجربة ومعناها؛ بل والمعنى الدقيق للموضوعية وطبيعة دور القائم بالملاحظة. لم يعد العلماء في فيزياء الجسيمات يتعاملون مع ظواهر طبيعية مباشرة؛ بل أصبحوا يقدمون فرضيات قد ترقى إلى مرتبة النظرية حين تقوم بوظيفتها في الربط بين مجموعة من القوانين ويدعمها شبكة من العلاقات الرياضية مُستعينة بمفاهيم ابتكارية من قبيل الكمات، والمتصل المكاني الزماني، والموجة الميكانيكية الكمية. وقد استدعى كل ذلك تمحيصاً للحدود الفاصلة بين العلم والميتافيزيقا، والتجربة والفرض، والعيني والواقعي.

وإذا كان العلم في سباق محموم لا يتوقف نحو كل ما هو جديد من كشوف وتقنيات، وكثيراً ما لا يتوقف العلماء ليقوموا بالفحص النقدي لأسس نظرياته مدفوعين بالثقة الفائقة في آلية التصحيح الذاتي الكامنة في صلبه، فإن فلسفة العلم تضطلع بدورها في التأمل في العلم؛ منهجه ومنطقه وخصائص المعرفة العلمية وشروطها وطبائع تقدمها، وعلاقتها بالمتغيرات المعرفية الأخرى.

من هنا؛ فالبحث المائل بين أيدينا "ميتافيزيقا الجسيمات؛ دراسة نقدية لواقعية ما دون الذرة" هو بحث في فلسفة العلم، لمؤلفته التي جمعت بين دراسة الفيزياء والفلسفة، وتخصصت في فيزياء الجسيمات، ثم صارت أستاذة

الفلسفة النظرية وفلسفة العلم والتقنية في جامعة دورتموند. تُناقش الكاتبة
فيزياء الجسيمات من الناحية الأبيستولوجية وتعرض لها من خلال العديد من
المواقف الفلسفية المختلفة، كما تتعرض بالفحص النقدي لمناهج البحث
التجريبي المعاصر وأدواته، وتبحث في الدلالات الأنطولوجية لنتائجه
ومُحصلاته. نأمل بترجمة هذا الكتاب أن نكون قد ملأنا فراغاً في المكتبة
العربية، وأن يستفيد من هذا العمل القارئ الحريص على متابعة كل ما هو
جديد في فلسفة العلم، والمُتخصص في الأبيستولوجيا والفيزياء على حد
سواء.

المترجمان

تصدير

إن الميتافيزيقا - بوصفها قدرًا - التي وقعت في أسر حبها وإن كانت لا تعطيني الكثير لأتباهى به لها نوعان من المزايا؛ يتمثل النوع الأول في أن باستطاعتها حل المشاكل التي يطرحها العقل، حين تستخدم العقل لتعقب الخصائص الخفية للأشياء. إلا أن التطلعات في هذا الصدد تتعرض لخيبة أمل حين ترى النتائج. وفي هذه الحالة أيضًا فإن الرضا يتقلت من أيادينا النهمة [...] الميزة الثانية للميتافيزيقا هي الأكثر تناغمًا مع طبيعة الفهم البشري. إنها تكمن في [...] معرفة أي علاقة تربط بين التساؤل والمفاهيم التجريبية، والتي يجب أن تتأسس عليها أحكامنا في كل الأوقات. وإلى هذا المدى فإن الميتافيزيقا علم لحدود العقل البشري [...] لذا فإن الميزة الثانية للميتافيزيقا هي دون شك الأقل إدراكًا بالنسبة إلينا وإن كانت الأكثر أهمية، حتى إن كانت أيضًا ميزة لا يمكن بلوغها إلا في مرحلة متأخرة حقًا وبعد خبرة طويلة.

إيمانويل كانت⁽¹⁾

(1) Kant 1766, Akad. 2.385-2.386.

ترجع جذور مفهوم الجسيم إلى الميتافيزيقا التقليدية والفلسفة القديمة. إن فكرة أن المادة تتشكل من مكونات ميكروسكوبية (مجهريّة) بزغت منذ المذهب الذري القديم^(*). وفي البواكير الأولى للفيزياء الحديثة، قام جاليليو وديكارت ونيوتن بتبني هذه الفكرة. اعتقد نيوتن أن ثمة ذرات من المادة والضوء، ولكنها تند عن نطاق التجريب في إطار طرق علوم الميكانيكا النيوتونية والبصريّات. وفي القرن التاسع عشر نجحت النظرية الموجية للضوء، وتطورت الديناميكا الكهربائية والديناميكا الحرارية والميكانيكا الإحصائية والنظرية الحركية للحرارة. وبعد مائتي عام من "برنكيبييا"^(**) Principia نيوتن، اكتشف التجريبيون أشعة المهبط (الكاثود)، والأشعة السينية، والنشاط الإشعاعي، وبدعوا فحص البنية الذرية وما دون الذرية للمادة. وفي الوقت نفسه، رغم ذلك، كان التجريبي إرنست ماخ لا يزال شاكاً في وجود مكونات ميكروسكوبية (مجهريّة) للمادة غير قابلة للملاحظة، وطالب بالمزيد من الأفكار الطبيعية حول بنية المادة^(١).

(*) المذهب الذري القديم Ancient Atomism اتجاه فلسفي يرى أن مادة البحث يُمكن أن تُقسم إلى جزئيات صغيرة لا تقبل التجزئة، فهي أشبه بالذرة. وقد طبق في علوم مختلفة أقدمها الطبيعيات عند ليقوبوس وديمقريطس، وهو يرد الكون إلى جزئيات صغيرة تتلاقى فيكون الوجود، وتتفرق فيكون العدم. انظر المعجم الفلسفي، مجمع اللغة العربية ١٩٨٣. (الترجمان)

(**) هو كتاب "الأسس الرياضية للفلسفة الطبيعية" لنيوتن والذي يُعرف اختصاراً بالبرنكيبييا أو المبادئ، يُعد أحد أهم الأعمال العلمية على الإطلاق في تاريخ العلم؛ حيث احتوى على قوانين نيوتن للحركة وأسس الميكانيكا الكلاسيكية. (الترجمان)
 (١) Mach 1883, 466.

بدأت الفيزياء الحديثة للجسيمات مع ظهور الغرفة السحابية^(*) (١٨٩٥) واكتشاف الإلكترون (١٨٩٧)^(١). فقد اتضح أن الضوء يأتي على هيئة كمات وأن الذرة لها نواة صغيرة للغاية. تعارضت الفرضية الكمية للضوء مع النظرية الموجية للضوء التي كانت تحظى بإثباتات جيدة، على حين بدت فكرة الذرة ذات النواة عائقاً أمام أي نموذج كلاسيكي ثابت للذرة. وبالنظر إلى الرؤى الكلاسيكية حول تكوين المادة والضوء، فقد كانت هذه الاكتشافات بداية لتاريخ من التحرر من الأوهام. لم تُعد بنية المادة والضوء تتلاءم مع الصورة الكلاسيكية للواقعية^(**) دون الذرية. فكلما تكشف لنا عالم

(*) جهاز لاكتشاف جسيمات الإشعاعات المؤينة. وتتكون الغرفة السحابية Cloud Chamber من غرفة صغيرة زجاجية تحتوي على بخار ماء في درجة التشبع. وعندما يتفاعل جسيم ألفا أو جسيم بيتا مع جزيئات الوسط، تتأين الجزيئات على طول مسار الجسيم. وتحفز الأيونات المتولدة عن مسار الجسيم على تكثف الماء عليها؛ حيث تكون تلك الأيونات بمثابة الأنوية لتكثف بخار الماء عليها. وبذلك يصبح مسار الجسيم مرئياً. وتختلف مسارات الجسيمات عن بعضها، فمثلاً تكون مسارات جسيم ألفا عريضة ومستقيمة، بينما يكون مسار الإلكترون رقيقاً. (المترجمان)

(١) سزرد حول اختراع الغرفة السحابية لـ س.ت.ر. ويلسون انظر ميليكمان ١٩١٧، ٤٦، ويايس ١٩٨٦، ٨٦. وللمزيد حول اكتشاف الإلكترون انظر فقرة ٢-٣.

(**) تُستعمل كلمة واقعية في الفلسفة بعدة معانٍ لا يربط بينها رابط متين، إلا أن ما يعنينا هنا في المقام الأول "الواقعية العلمية" التي ترى أن الكيانات التي تتطلبها نظرية علمية ناجحة (أي راسخة) هي كيانات واقعية. ومن ثم توجد الإلكترونات في الواقع؛ بل هي موجودة بالمعنى نفسه الذي توجد به قوالب القرميد والصخور والموائد والكراسي. انظر: وليم جيمس إيرل، مدخل إلى الفلسفة، ت. عادل مصطفى، المجلس الأعلى للثقافة ٢٠٠٥، ص ١٠٦. (المترجمان)

ما دون الذرة، تعذر علينا تفسيره بالمفاهيم الفيزيائية المألوفة؛ إذ ثمة تعارض بين المفهوم الكلاسيكي للجسيم والنظرية الكلاسيكية للإشعاع من جهة، والظواهر الكمية لفيزياء ما دون الذرة من ناحية أخرى. ومن ثم، فحين أصبح واضحاً أنه لا وجود لشكل كلاسيكي لظواهر فيزياء الكم، عادت الشكوك القديمة لتطرح التساؤل حول وجود الذرات من جديد. فبعد بزوغ فجر ميكانيكا الكم، ظهرت سجالات فلسفية لا تنتهي حول واقعية العمليات والجسيمات دون الذرية لتأخذ مكانها جنباً إلى جنب مع السجال حول وجود كيانات غير قابلة للملاحظة.

يسعى هذا الكتاب إلى فك اشتباك هذه السجلات الفلسفية القديمة والجديدة حول واقعية ما دون الذرة. فيحاول أن يشرح بالتفصيل كيف يمكن للمرء اليوم أن يتحدث عن الجسيمات. ولكن ما الجسيمات المكونة لفيزياء الجسيمات في الوقت الراهن، في أعقاب ثورة ميكانيكا الكم^(*) وإخفاق مفهوم الجسيم الكلاسيكي؟ وما مدى مشروعية الزعم أن فيزياء الجسيمات الحديثة تشير إلى مكونات دون ذرية للمادة وجسيمات أخرى دون ذرية؟ هذه الأسئلة سوف يُجاب عنها في ضوء الأفكار التالية:

١- يتأسس المفهوم الكلاسيكي للجسيم على افتراض ميتافيزيقي قوي حول الأشياء الفيزيائية وتأثيراتها. وتعد فيزياء ميكانيكا الكم أقوى

(*) يتم استخدام كلمة "الكم" كترجمة سائدة في مقابل كلمة Quantum، فيما تُستخدم كلمة "كوانتم" ومشتقاتها عندما تظهر كلمة "كمية" Quantity أو مشتقاتها في الجملة نفسها، وذلك تقادياً لحدوث أي لبس. (المترجمان)

الانتقادات في مقابلها، ويجب على أي رؤية للواقعية دون الذرية أن تأخذ هذا النقد في الاعتبار.

٢- لتجسيد هذا النقد، يجب عمل استقصاء تفصيلي لطواهر فيزياء ما دون الذرة، والطرق التي تحدث بها في التجارب، واللغة التي تُعبر عنها.

٣- إن طرق قياس فيزياء الجسيمات بعيدة عن أن تكون مباشرة. ومع تطور فيزياء الجسيمات فقد أصبحت معقدة ومحملة بالنظرية theory-laden (*) أكثر فأكثر. ومن الأفضل أن يتم تحليلها في إطار تفسير تاريخي يتتبع نمو نظريات القياس.

٤- أصبح من الممكن القول مجازاً: "إننا ننظر داخل الذرة"؛ حيث تقوم في فيزياء الطاقة العالية معجلات أكبر فأكبر باستكشاف بُنى أصغر فأصغر، ويستحق منطق هذه الاستعارة التوقف عنده والانتباه إليه.

٥- يدخل العديد من القوانين الكلاسيكية في طرق القياس الخاصة بفيزياء الجسيمات. وهو ما أخل بوحدة الفيزياء. ورغم ذلك فإن أجزاءها تلتئم بواسطة عدد من مبادئ التوحيد من بينها نسخة مُعممة من مبدأ بور للتناظر (**).

(*) المقصود بهذا المصطلح هو أن اللغة التي تستعمل لكي تجسد الملاحظات وتصف النتائج التجريبية هي ذاتها شيء تحدده نظرية معينة وتقدر له شكله وصفته مقدماً؛ فتوصف اللغة التي يستخدمها عالم ملتزم بنظرية معينة بأنها لغة محملة بالنظرية Theory-laden. (المترجمان)

(**) مبدأ التناظر لبور: Bohr's Correspondence Principle قاعدة مؤداها أنه عندما تكون أعداد الكم لنظام ذري عالية القيمة، فإن نتائج نظرية الكم لهذا النظام تتوافق مع نتائج تطبيق الميكانيكا الكلاسيكية عليه. (المترجمان)

٦- إن "الجسيمات"، موضوع فيزياء الجسيمات المعاصرة ليست كلاسيكية. من هنا فلا بد من حدوث تحول في المعنى لمفهوم الجسيم. والحقيقة أن ثورة الكوانتم أحدثت العديد من التحولات في المعنى.

٧- في الممارسة الفيزيائية تكون المفاهيم الكمية للجسيمات دون الذرية مصحوبة بالإشارة، ضمناً أو صراحةً، إلى ازدواجية الموجة-الجسيم wave-particle duality^(*). ويحتاج منطوق هذا الحديث إلى اهتمام أكثر مما اعتبرته الفلسفة المعاصرة.

(*) خاصية مميزة للجسيمات دون الذرية تمكنها من التصرف في بعض الأحيان كموجة وفي البعض الآخر كجسيم. ظهرت هذه الازدواجية أول ما ظهرت في تجربة يونج الضوئية الشهيرة، فباستخدام ثقب واحد لمرور الضوء كان يؤكد الخاصية الجسيمية، في حين كان فتح ثقبين يؤدي إلى ظهور مناطق التداخل المضيئة والمظلمة. فكان حيود الضوء دليلاً واضحاً على الطبيعة الموجية للضوء. ظهرت بعد ذلك علاقة دي برولي ومبدأ عدم اليقين لهايزنبرج ليؤكد هذا التصور المزدوج لتطبيقه على جميع الجسيمات الذرية ودون الذرية وأصبح من الممكن الحديث عن تداخل الجسيمات كما الحديث عن تداخل الموجات. يقول أينشتين عن هذه الازدواجية: "يبدو كما لو أنه يتعين علينا استخدام إحدى النظريتين أحياناً والأخرى في أحيان أخرى، على حين يمكن استخدام أيهما في أوقات أخرى. إننا نواجه نوعاً جديداً من الصعوبة. فلدينا صورتان متعارضتان للواقعية، لا يمكن لأي منهما أن تُفسر بشكل كامل ظواهر الضوء، ولكن بإمكانهما ذلك معاً". (الترجمان) انظر:

Albert Einstein, Leopold Infeld, The Evolution of Physics, From Early Concepts to Relativity and Quanta, Simon & Schuster, 1938, p.263.

ثمة الكثير من الكتب التي تناولت تاريخ فيزياء الجسيمات، وتاريخ فيزياء الكم وأساسها النظري، وتفسير ميكانيكا الكم أو نظرية مجال الكم، ومسألة ما إذا كان هناك كيانات دون ذرية لها وجود فعلي أم لا. إلا أنه لم يُجر بحث نسقي يتناول الصلات بين هذه المواضيع. يسعى هذا الكتاب لردم هذه الفجوة من خلال إلقاء الضوء على الأفكار المُشار إليها آنفاً واحدة تلو الأخرى.

يتناول الفصلان الأول والثاني الأسئلة الفلسفية حول المبدأ. فيما تقدم الفصول الثالث والرابع والخامس بحثاً مفصلاً لطرق القياس الخاصة بفيزياء الجسيمات والأساس الإمبريقي للمفاهيم الحالية للجسيم. فيما يُفصل الفصلان السادس والسابع التحولات في المعنى التي تعرض لها مفهوم الجسيم، من اكتشاف الإلكترون وحتى الكشف عن الكوارك الأعلى، من كمات الضوء عند أينشتين إلى موجات المادة عند برولي وحتى أحدث الطرق لإعداد موجات ميكانيكا الكم والكشف عن جزيئات ميكانيكا الكم. ونستهل كل فصل بعرض للمحتويات التفصيلية. وستكون الموضوعات الرئيسة على النحو التالي بيانه.

يسعى الفصل الأول إلى إلقاء ضوء جديد على السجال الفلسفي حول "الواقعية العلمية" Scientific Realism، أي على أسئلة حول ما إذا كانت النظريات الفيزيائية تهدف إلى التوصل إلى الحقيقة Truth، وما إذا كانت ما تقتض وجوده من قوى ومجالات وجسيمات هي بالفعل ما يتكون منه هذا العالم. وينتهي الفصل بدعوى لواقعية وسطية بشأن الأحداث العارضة التي يتم قياسها في تجارب الفيزياء والقيم الفعلية للكميات الفيزيائية المنسوبة إليها. هذه النسخة من الواقعية يتم ربطها بوجهة النظر الذاتية إلى أن الكميات

الفيزيائية تُقابل خواص طبيعية. إنها أضعف من الواقعية الكلاسيكية (أي الزعم بأن الأشياء الميكروسكوبية كاملة النمو تحمل كل الخصائص الفيزيائية التي يمكن قياسها)، ولكنها أقوى من التجريبية^(*) والأداتية^(**) (أي الزعم بأنه لا وجود لأشياء بخلاف الظواهر التجريبية، والأدوات التجريبية، واستخدام النظريات الفيزيائية لأغراض تقنية).

ويبحث الفصل الثاني السمات البنائية للفيزياء الحديثة. يهدف المنهج التجريبي إلى توسيع مدى فهمنا للواقعية الفيزيائية فيما وراء حدود التجربة

(*) التجريبية (الأمبيريقية): Empiricism هي نظرية في المعرفة، تقول: إن كل معرفتنا بالواقع مصدرها الحواس. وإن كل معارفنا تكون على هيئة معطيات حسية مباشرة نقوم بالتأليف بينها على هيئة قضايا. والتجريبية كمنظريّة في المعرفة تقف مقابل المعرفة العقلية والحدسية. ولذلك ترفض القول بالأفكار الفطرية، كما ترفض الزعم بوجود كائنات مجاوزة للخبرة الحسية. وبالتالي فالتجريبية تُنكر تماماً قدرة العقل على اكتشاف حقائق الواقع بشكل مستقل عن الخبرة الحسية. وعلى العكس من ذلك، تؤكد التجريبية على أن قضايا الواقع بعدية *a posteriori* وأنها لا تتصف باليقين المطلق. انظر: بدوي عبد الفتاح، فلسفة العلوم، دار قباء ٢٠٠١، ص ٦٢. (المترجمان)

(**) تقوم الأدوات Instrumentalism بالنظر إلى النظرية العلمية باعتبارها أداة لإنتاج التنبؤات والتقنيات الجديدة للتحكم بالظاهرة موضوع البحث. ولكن دون تأويلها حرفياً كأدوات للصدق والكذب. تتلافى الأدوات صعوبة تبرير الثقة في النظرية العلمية؛ نظراً إلى أنها تنصب على حقنا في اعتبار النظرية العلمية أداة ناجحة وفعالة وليست نظرية صادقة. والمثال المفضل لأنصار هذا الاتجاه ازدواجية الموجة-الجسيم في ميكانيكا الكم؛ فبدلاً من الدخول في نقاش نظري توفيق، يتم اعتماد كل منهما كأداة في المجال الخاص بها. Oxford Dictionary of Philosophy, Oxford University Press, 2nd Edition 2008

(المترجمان) Edition 2008

الحسية. مع شرح كيف تم تحديد مقاييس الكميات الفيزيائية ونوعية ما تتضمنه التجارب في الفيزياء الحديثة من الأمثلة الذهنية. ومن أجل شرح لماذا يكون لدى الفيزيائيين أسباب جيدة لتبني رؤية سخية إلى حد بعيد للواقعية الإمبريقية؛ تتم مناقشة العديد من الحجج البناءة في مقابل الواقعية العلمية والمفهوم التعميمي للملاحظة. وعلى وجه الخصوص يتم تناول سؤال إدينجتون التحريضي حول ما إذا كانت كيانات الفيزياء قد تم اختلاقها أم اكتشافها، مع اقتراح عمل تمييز بين ملاحظة الكيانات من جهة وقياس الخصائص الفيزيائية من جهة أخرى.

يُقدم الفصل الثالث مفهومًا حدسيًا ميريولوجيًا^(*) وعليًا Causal للجسيم: وهو أن الجسيمات هي الأجزاء المكونة للمادة والضوء كما أنها العلة في الآثار الموضوعية التي تكشفها مجسات الجسيمات. إن الكشف عن جسيم ما هو إلقاء قياس للموضع. إنه يتطلب كميات محددة من الخصائص الديناميكية للمادة أو الضوء من أجل تعيينه في تجربة ما. ووفقًا لهذا المعيار، فقد احتاج الكشف عن الإلكترون والفوتون إلى المزيد من الوقت بأكثر مما تزعم الروايات المعتادة لفيزياء الجسيمات. وبعد إقامة الدليل على ذلك، يتم عرض كيف تخلق قياسات الموضع مسارات الجسيم، فيما تصنع مسارات الجسيم أحداثًا مبعثرة، وينتج عن هذه الأخيرة رنينًا، وعبر ذلك يتم التوغل أكثر فأكثر في نظريات الأساس التجريبي لفيزياء الجسيمات. وهنا يُصبح التمييز بين الأساس النظري الآمن والنظريات الخاضعة للاختبار حاسمًا. لقد

(*) منطوق العلاقات بين الجزء والكل، ويُعد عالم المنطق والفيلسوف البولندي وأحد مؤسسي مدرسة وارسو للمنطق ليسنيفسكي Lesniewski رائدًا لهذا المبحث.
(المترجمان)

حدثت التغيرات بمرور الوقت وباكتشاف البوزيترون ومشكلات تعريف الجسيم كما ظهرت في أربعينيات القرن العشرين. وعلى الرغم من ذلك فإن الجسيمات التي تمت مناقشتها حتى الآن كانت وفقاً لمفاهيم الجسيم الميرولوجية والعلية مكتشفة بالفعل وليست مُصنعة.

يتناول الفصل الرابع بالفحص النماذج الكائنة خلف تجارب التشتت عند الطاقات العالية التي تسبب أضرار بنية الذرة. ثمة سلسلة من نماذج عمليات التشتت دون الذرية، من تشتت رذرفورد الكلاسيكي وحتى قياس توزيعات كميات الحركة للكواركات الناتجة من التشتت غير المرن العميق للنيوكلونات مع الليبتونات. ومع ذلك فإن نظرية مجال ميكانيكا الكم النواقفة خلف نموذج الكوارك لا تشير إلى مكونات للمادة فيما دون الذرة بأي معنى واضح، وسلسلة النماذج المذكورة آنفاً تربط بين اكتشاف رذرفورد لنسوة الذرة ونموذج كوارك-بارتون للنوية. والارتباط هنا بدلالة التركيب شبه النقطي الملاحظ عند مدى الطاقة المعطى. وقد تحقق بعض التقابل بين النماذج الكمية لميكانيكا الكم للتشتت والنموذج الكلاسيكي للتشتت عند مركز تشتت مُعرف جيداً. ويؤسس هذا التقابل وحده (وهو ما يمكن فهمه في إطار مبدأ بور للتناظر) مرجعاً لنموذج الكوارك للبنية دون الذرية. ورغم ذلك فثمة حدود للمجاز القائل بالنظر داخل الذرة عبر مستكشف للجسيمات.

يبحث الفصل الخامس نظرية القياس غير المتجانس لفيزياء الجسيمات. ومع ذلك فإنها مؤسسة على قوانين غير نسبوية ونسبوية، كلاسيكية وكمية (والتي تم النظر إليها باعتبارها قائمة على مفاهيم لا مقياسية من قبل توماس كون وتابعيه⁽¹⁾)، إنها تعبر عن وحدة خفية في الفيزياء. إن مقاييس الكميات

(1) Kuhn 1962, 1970.

الفيزيائية (أي الطول والزمن والكتلة) تتدرج في البناء من الكواركات إلى الكون كله. إن طرق القياس لفيزياء الجسيمات تحمل حشواً زائداً مما يتيح إمكانية الفحص متعدد المصادر من تلاحم هذه البنية. وفي النهاية ثمة العديد من مبادئ التوحيد Unifying Principles التي تربط بين مجال فيزياء الكم والفيزياء الكلاسيكية، ولعل أكثرها أهمية هو مبدأ التناظر المعمم بالمعنى الذي طرحه بور، التماثلات، واللاتباينات، وقوانين البقاء في الفيزياء، وافترض أنه يحدث عدم انسجام في حالات لميكانيكا الكم في البيئة الماكروسكوبية (العيانية). كل هذه المبادئ تدعم تحليل المعطيات لمسارات الجسيم على أساس قوانين القياس الكلاسيكية بالإضافة إلى تصحيحات ميكانيكا الكم وتأسيس المقاييس.

يبحث الفصل السادس خصائص الجسيمات الكلاسيكية ومصيرها في نظرية ميكانيكا الكم. هناك مفاهيم للجسيم بعدد النظريات الفيزيائية وربما أكثر عدداً منها. بدأت النقلات في المعنى مع ميكانيكا الكم وفرضية ضوء الكم. وقد أدى ذلك إلى ظهور مفهوم إجرائي متواضع للجسيم، تكون الجسيمات وفقاً له مجموعات من الخصائص الديناميكية التي يمكن أن تتمركز بشكل مستقل في مجس للجسيمات. لقد أعطى المجال الكمي، وتعريف جماعة ويجنر النظري للجسيم، والجسيمات الافتراضية لنظرية المجال الكمي، وأشبه الجسيمات لفيزياء الحالات الصلبة، ونموذج كوارك-بارتون التكويني للمادة المزيد من التحولات في المعنى والمزيد من إضعاف المفهوم الأصلي للجسيم. وما يتبقى هو المفهوم الإجرائي للجسيم من ناحية، وبعض سمات الجسيم الإضافية من قبيل السيمترية، وقوانين البقاء، وقواعد الجمع للخصائص الديناميكية للأجزاء المكونة للمادة من ناحية أخرى. وهذه

السمات حين تؤخذ معًا تتفق كثيرًا أو قليلًا مع سمات الجسيم الحدسية التي ناقشها في الفقرة (٣-١)، ولكن مع تقييد حاسم: إن المفهوم العلي للجسيم ليس في الواقع مدعومًا من قبل نظريات الكم الحالية. إن الجسيمات بالمعنى الإجرائي هي بالأحرى آثار موضوعية وليست أسبابًا، على حين تكون أسباب هذه الآثار الموضوعية ليست موضوعية.

يناقش الفصل السابع السمة العامة الشائعة لكل الجسيمات الكمية، أعني ازدواجية الموجة-الجسيم. ومن أجل شرح هذا المفهوم، يتم اعتماد مقاربة تاريخية. يمكن العودة بجنور ازدواجية الموجة-الجسيم إلى موجات المادة لدى برولي وعلاقة أينشتاين-برولي، وموجات الاحتمال لدى بورن، ومحاضرة كومو لبور، وكتاب هايزنبرج الصادر عام ١٩٣٠ عن نظرية الكم. للأسف هذه أربعة تفسيرات مختلفة لازدواجية الموجة-الجسيم. تتعايش اليوم نظرة برجماتية لتحضير الموجات واكتشاف الجسيمات، ونقاش مريبك حول مبدأ بور للتتام وعلاقات عدم اليقين عند هايزنبرج، وتفسير تعميمي للخصائص الفيزيائية غير الحادة مع علاقات تعميمية مقابلة لعدم اليقين لدى هايزنبرج-روبرتسون، تتعايش معًا جنبًا إلى جنب. ومن أجل توضيح هذه المفاهيم تتم مناقشة العديد من التجارب حول الجديد في بصريات الكم وتفسيرها. وبالتوافق مع نتائج الفصل السابع، توضح هذه التجارب أنه لم يعد بالإمكان الدفاع عن مفهوم علي متفرد للجسيم؛ نظرًا لأن تفسيره يحتاج إلى الاستعانة بالكثير من المفاهيم العلية.

يُقدم الفصل الثامن تلخيصًا للمُحصلات الفلسفية حول الحقيقة دون الذرية. وعلى خلاف المواقف التأسيسية والتجريبية وما يتصل بها من وجهات نظر أداتية، أذهب إلى أن الجسيمات دون الذرية والعمليات الكمية

تنتمي إلى الواقعية التجريبية. إن المادة تتكون من أجزاء مكونة دون ذرية؛ والمفهوم الميرولوجي للجسيم يتم تدعيمه إمبيريقياً من خلال مجموع قواعد الكتلة، والشحنة، وغيرها من الخواص الديناميكية للجسيمات دون الذرية. وهو ما يرقى إلى واقعية الكيان. ومع ذلك، فإن الكيانات المناظرة ليست أشياء بالمعنى الكلاسيكي ولا جواهر بالمعنى الميتافيزيقي. وعلى وجه الخصوص، فإن المفهوم العلي للجسيم يتعارض مع نظرية ميكانيكا الكم. فالجسيمات بالمعنى الإجرائي في حالات الكشف عن جسيم واحد هي آثار موضعية لعمليات كمية غير موضعية. وعلى خلاف الواقعية الميتافيزيقية الكلاسيكية، فإنني أدافع في النهاية عن وجهة النظر القائلة: إن واقعية الجسيمات دون الذرية والعمليات الكمية ليست واقعية في حد ذاتها. هي بالأحرى علاقاتية. فهي لا توجد إلا بالمقارنة بالبيئة الماكروسكوبية وبأجهزتنا التجريبية. فالكيانات الكمية هي عمليات، وبُنِي ديناميكية، وخصائص فيزيائية باقية، وحوادث محتملة في العالم الماكروسكوبي.

يُمثل هذا الكتاب نسخة منقحة وموسعة من كتابي المنشور بالألمانية لأول مرة عام ١٩٩٤، بعنوان: ميتافيزيقا الجسيمات. وما بدأت كترجمة انتهى به المطاف إلى كتاب جديد. فقد تمت إعادة كتابة كل الفصول كما تم إضافة الكثير من المادة العلمية. أما المناقشة المفصلة لمفاهيم الجسيم الكمي في الفصل السادس بالإضافة إلى الفصل الختامي عن ازدواجية الموجة-الجسيم فقد جاءت جديدة تماماً. تغيرت أيضاً بعض آرائني الفلسفية. وعلى وجه الخصوص فإنني أؤكد في هذا الكتاب السمات البنائية للفيزياء بأكثر مما فعلت في النسخة الألمانية. وهذا الموضوع الكانطي تمت الإشارة إليه أيضاً

في العنوان الجانبي للكتاب. وهو ما سوف يظهر من حين لآخر في الفصول القادمة ويؤخذ في الحسبان عند عرض النتائج الختامية العامة للكتاب. وبخصوص تأويل نظرية ميكانيكا الكم، فقد قيدت نفسي مرة ثانية قدر الإمكان عدا جانبًا واحدًا. أرى الآن وظيفة مبدأ تناظر تعميمي للوحدة الدالية للفيزياء الكلاسيكية وفيزياء ميكانيكا الكم بشكل أكثر وضوحًا مما كان عليه الحال عند كتابتي للنسخة الألمانية من الكتاب. وفقًا لفهمي الحالي، لا تُشير ميكانيكا الكم ونظرية المجال الكمي إلا لأنساق فردية وفقًا للطرق التي تقوم بربط نماذج الكم للمادة والتفاعلات دون الذرية بالنماذج الكلاسيكية للبنية دون الذرية وعمليات التشتت من خلال نماذج شبه كلاسيكية. تقوم كل هذه الروابط على استخدام ضمني لمبدأ التناظر التعميمي بالمعنى الذي قدمه بور (بالإضافة إلى غيره من مبادئ الفيزياء الموحدة). واليوم مضى عهد إصراري على نظرية كمية لأنساق الفردية. فالنظرية الكمية وحدها هي نظرية احتمالية. وباستثناء قوانين بقاء الطاقة وقواعد الانتقاء غير الاعتيادية، فإنها تنطبق فقط على مستوى المجموع. وفي التعقيب النقدي حول الواقعية دون الذرية (الفصل الثامن) أقوم بمناقشة مسألة كيف تتسجم هذه الوجهة من النظر مع اعتقاد الفيزيائيين الممارسين أنهم يقومون بتحضير الموجات وقياس الجسيمات على مستوى الأنساق الفردية.

نمت مادة هذا الكتاب على مدى فترة طويلة إلى الحد الذي يجعل من قبيل المستحيل أن أشكر كل الزملاء والأصدقاء الذين قدموا ملاحظات نقدية، وشروحات للمفاهيم المحورية سواء في أثناء الجلسات الودية أو ورش العمل أو المؤتمرات. ويمكنني هنا أن أذكر بعضهم فقط. وعلى وجه الخصوص فإنني ممتنة لما أسداه لي بيتر ميتلشتيت من أفكار ملهمة ومثمرة على مدى

عقد من الزمان. كما أود أن أشكر كلاوس بايسبارت، وباتريك جريت، وراينر هيدريش، وهيرنان برنيجه، وإريش رونجه لقراعتهم أجزاء كبيرة من الكتاب ولكثير ما أبدوه من ملاحظات مفيدة. ومن قبيل تحصيل الحاصل أن أقول: إن انتقاداتهم قد ساعدت في تحسين الكتاب، إلا أنهم غير مسؤولين عما فيه من خطأ. ساعدتني فلوريان براون في إعداد قائمة المراجع وفي إتمامها بشكل يتسق إلى حد بعيد مع الهوامش. قامت أنجيلا لاهي من دار سبرينجر بالكثير من الصبر بالمساندة في إخراج هذا الإصدار. تكفل ستيفن ليل بتحسين أسلوبه بالإنجليزية وعمل التعديلات. ختامًا، لم يكن لهذا العمل أن يرى النور إلا برفقة حب وتفهم دام لسنوات طوال من قبل زوجي فريدريش فولدا، وابنتنا يوهانس فالكينبورج، وأمي إيدل فالكينبورج.

بريجيته فالكينبورج

دورتموند

يناير ٢٠٠٧

الواقعية العلمية

تُعتبر الواقعية هي وجهة النظر التي يتبناها معظم الفيزيائيين فيما يخص الكيانات الفيزيائية. وهم يفترضون أنهم يبحثون قوى ومجالات مغناطيسية وجسيمات دون ذرية حقيقية؛ من قبيل الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات. كما يفترضون مقدمًا أن هذه الكيانات موجودة في الطبيعة، داخل معمل الفيزياء وخارجه على حد سواء. وهي في اعتقادهم العُلى الحقيقية ومكونات الظواهر الطبيعية والتجريبية، حتى إن كانت النظرية الفيزيائية تصف هذه الكيانات بلغة رياضية تجريدية. يتبنى الفيزيائيون واقعية لا تقبل الشك بشأن الجسيمات دون الذرية حين يقومون بالكشف عن مسارات الجسيمات وتحليلها في تجارب التشتت لفيزياء الطاقة العالية، وحين يفترضون أن هذا الكشف نتيجة للآثار الكهرومغناطيسية على الأجهزة الإلكترونية في تجاربهم.

لم تُعد فيزياء الجسيمات تبحث في التساؤل عما إذا كانت الجسيمات دون الذرية توجد أم لا، ولكن أي أنواع الجسيمات موجود، وما المكونات الأساسية للمادة والقوى. وعلى سبيل المثال لم يكن من الواضح ما بين عامي ١٩٣٢ و ١٩٥٦ ما إذا كانت فرضية النيوتريينو لباولي قد تم افتراضها

خصيصاً من أجل إنقاذ مبدأ بقاء الطاقة في حالة الانحلال الإشعاعي لبيتا^(١)، أم ما إذا كان ثمة وجود فعلي للنيوترينو. وفي عام ١٩٥٦ تم تأكيد فرضية النيوترينو عن طريق الانحلال الإشعاعي العكسي لبيتا. وبالمثل لم يكن معظم الفيزيائيين فيما بين عامي ١٩٦٤ و ١٩٧٤ يؤمنون بوجود الكواركات. إذ لم يعتقدوا أن ثمة أجزاء مكونة للبروتون والنيوترون لها شحنات كسرية. وفي عام ١٩٧٤ ومع اكتشاف الجسيم الرنيني J/ψ ، أصبح المجتمع العلمي لفيزياء الجسيمات مقتنعاً أخيراً بوجود الكواركات^(٢)(*) . واليوم يقوم فيزيائيو الجسيمات ببحث التساؤل حول ما إذا كان ثمة نظراء على درجة من التماثل الفائق مع جسيمات النموذج المعياري الحالي لفيزياء الجسيمات كما يبحثون عن تأثيرات الجسيمات ذات الكتلة ضعيفة التفاعل (WIMPs) مع الأشعة الكونية ذات الطاقة العالية.

(١) Pais 1986, 138 and 569.

(٢) Pais 1986, 605-606.

وللمزيد حول تاريخ ما يُدعى بثورة نوفمبر انظر: Pickering 1984 and Riordan 1987. (*) الكواركات: هي إحدى الأسر الرئيسية للجسيمات الأولية، وهي ذات تفاعلات قوية. ويسمى الميكانيك اللوني (الكروموديناميك) الكمي quantum chromodynamics بوجود نحو ١٨ نوعاً من هذه الكواركات؛ منها: الكواركات العلوية، والسفلية، والمألوفة والغريبة، والذرية (القمة)، والقعرية (القاع). ويرمز إليها على التوالي بالحروف بـ: u, d, c, s, b, t, و أول من أطلق هذا الاسم على الجسيمات، هو عالم الفيزياء النظرية "جيل - مان". ويقال: إنه استقاهها من رواية الكاتب الأيرلندي جيمس جويس، الذي كان قد استخدمها ككلمة سرٌ دون معنى. راجع في ذلك: سام تريممان، من الذرة إلى الكوارك، نحو ثقافة علمية متقدمة لمواكبة علوم العصر وفلسفاتها، ترجمة: د. أحمد فؤاد باشا، عالم المعرفة ٢٠٠٦. (الترجمان)

لا يؤمن الكثير من فلاسفة العلم بهذا النوع من الواقعية. وهم يسمونها واقعية علمية في مقابل السجال الفلسفي القديم حول واقعية العالم الخارجي والتي كانت محل شك في تأملات ديكرت ومثالية بيركلي على سبيل المثال. لا ينتاب فلاسفة العلم التجريبيين والأداتيين الشك في واقعية العالم الخارجي. وتتحصّر شكوكهم في وجود الأشياء الفيزيائية التي لا يمكن أن تكون موضوعاً للإدراك الحسي المباشر. وهم يشكون على وجه الخصوص في وجود الجسيمات دون الذرية. وتتمثل أحدث السجالات الفلسفية بشأن الواقعية العلمية في نمطين من الاعتقادات: الاعتقاد في وجود كيانات فيزيائية غير قابلة للملاحظة (واقعية الكيانات)، والاعتقاد في وجود بُنى في العالم قد تناظرها بشكل تقريبي قوانين الفيزياء الرياضية (الواقعية البنيوية). يدافع الواقعي المتحمس عن وجود القوى، المجالات والجسيمات دون الذرية وعن القوانين الحقيقية للطبيعة، على حين يهاجم أعداء الواقعية كل ذلك^(١). من الجلي أن معسكر أعداء الواقعية لا يوجه النقد لصورة النظرية في الفيزياء بوصفها كذلك. هم بالأحرى يوجهون انتقاداتهم إلى التأويل الساذج لتلك النتائج بلغة الحياة اليومية، كما لو كانت القوى والجسيمات دون الذرية واضحة ومتجسدة كما هو الحال مع الطاولات والكراسي. وفي واقع الأمر،

(١) انظر: Leplin 1984, van Fraassen 1980, Churchland and Hooker 1985,

Psillos 1999

إن الواقعية البنائية (Worrall 1989) هي نسخة جديدة وأكثر اعتدالاً من الاعتقاد القديم في وجود قوانين صادقة للطبيعة؛ انظر: Psillos 1999, 146-161، وأيضاً ما اقتبسناه في هذا الكتاب.

فبخصوص مادة بحث نظرية الكم فإن الواقعية الساذجة المستندة إلى سياق الحياة اليومية تؤدي إلى سوء فهم فح.

وعلى الرغم من ذلك، فإنه في السجال الأخير حول الواقعية العلمية تظهر المشكلات الفلسفية القديمة متخفية في ثياب جديدة. ففي سياق فيزياء القرن العشرين ثارت تساؤلات جديدة سرعان ما أصبحت متداخلة مع موضوعات فلسفية تقليدية عويصة. والجذور الثلاثة الأكثر أهمية لهذا السجال هي كما يلي:

(١) إن السجال حول وجهات النظر الأداتية والواقعية بشأن النظريات الفيزيائية هو جد قديم. تعود جذور المعسكر المعادي للواقعية إلى البدايات الأولى للعلم الحديث؛ أعني مقدمة أوسياندر لكتاب كوبرنيكوس "عن دورات الأجسام السماوية". أوصى أوسياندر بعدم الفهم الحرفي لنظرية كوبرنيكوس واعتبارها مجرد أداة مفيدة لصياغة النظرية عن طريق توصيف رياضي لا يدعي لنفسه الحقيقة. وجد جاليليو نفسه مضطراً للدفاع عن فيزيائه الجديدة ورؤية كوبرنيكوس للعالم في مواجهة الأداتية والأرسطية في القرن السابع عشر. وبعد ثلاثة قرون، وقفت تجريبية ماخ وأداتية دويم في مقابل ذرية بولترمان وواقعية بلانك. ثم غدت هذا السجال أطروحة كون عن اللا مقياسية^(*)، مفسحة المجال لظهور البنائية الاجتماعية وما

(*) يُعد توماس كون T. Kuhn (١٩٢٢-١٩٩٦) من أهم فلاسفة العلم في النصف الثاني من القرن العشرين على الإطلاق، كما يُعد كتابه الشهير "بنية الثورات العلمية" أيقونة من أيقونات فلسفة العلم؛ حيث صارت مصطلحاته بما لها من دلالات مميزة كلمات دالة ذات معانٍ راسخة وذائعة في كتابات فلسفة العلم؛ ومن أهم هذه المصطلحات =

يتصل بها من رؤى ما بعد حداثة العلم. ومن الواضح أن هذه السجلات القديمة والجديدة تتمحور حول ما إذا كانت الرياضيات والفيزياء بوسعها أن تأتينا بخبر عن الطبيعة.

(٢) بدأت التجريبية المنطقية رحلة البحث عن معايير لتحديد التخوم بين المعرفة التجريبية والميتافيزيقا. إن البحث عن مثل هذه المعايير أمر متأصل في الخلاف التقليدي بين التجريبية والعقلانية: إن الأبنستمولوجيات التجريبية للوك وهيوم اتخذت من الإدراك الحسي محكاً لنظرياتنا، بينما قد يكون الإدراك الحسي مضللاً وفقاً للاتجاهات العقلانية لدى ديكارت وليبنتر وتتمتع الرياضيات وحدها بالمصداقية. تعامل الخلاف التقليدي مع التساؤل الأبنستمولوجي عن كيفية اكتسابنا للمعرفة الموثوق بها عن العالم الخارجي أو عن الحقيقة الموضوعية.

=النموذج الإرشادي Paradigm، واللا مقياسية Incommensurability. يُشير المصطلح الأول إلى النظرية العامة التي يلتزم بها المجتمع العلمي في مرحلة ما، وبلوغ النظرية مرتبة النموذج الإرشادي يعني أنها تحدد مدلول الوقائع التجريبية، وتطرح معايير الاختبار والتقويم والتنقيح، والتعديل إذا لزم الأمر. وطالما أن العلم يتطور في إطار النموذج الإرشادي نفسه تُسمى هذه المرحلة مرحلة العلم العادي Normal Science. ولكن إذا ظهرت ظاهرة تنتهك إطار هذا النموذج الإرشادي ونقرض تغييره فإننا ننتقل إلى مرحلة الثورة Revolution في العلم. وتعني هذه الثورة أن تغييراً قد طرأ في النظرة إلى العالم، وينتج عن ذلك ما يسميه كون باللا مقياسية أي عدم قابلية النظريات العلمية للحكم عليها بالمقاييس نفسها، فلكل نظرية إطارها ومفاهيمها. (المترجمان)

ومع ذلك، فبخصوص الواقعية العلمية، يتعارض كلا التقليديين الأبيستمولوجيين التقليديين مع المنهج التجريبي للفيزياء الحديثة ومع بنية النظريات الفيزيائية على وجه الخصوص.

(٣) يتعامل السجال حول تأويلات نظرية الكم مع حقيقة أن قوانين فيزياء ما دون الذرة تتصادم مع الرؤية الكلاسيكية ذات البنية كاملة الحتمية للواقعية. وهنا يثور التساؤل: هل تتعامل نظرية الكم بالفعل مع واقعية موضوعية دون ذرية، أم أنها الوقود المحرك للتجريبية والأدائية؟ تتعارض الآثار الكمية النمطية غير الموضوعية مع التفسير الكلاسيكي للواقعية الفيزيائية، والذي يمتد بجذوره حقاً في الميتافيزيقا التقليدية. إن النقاش حول تأويلات نظرية الكم يرتبط بشكل جوهري بالخلافات التقليدية حول التجريبية أو العقلانية (بالترتيب الأدائية أو الواقعية)، على الرغم من أن موضوعاتهم في الوقت الراهن غالباً ما تكون منفصلة عن بعضها البعض كلما توغلنا أكثر في التخصص الفلسفي.

تدرج حالياً كل من هذه الأنواع الثلاثة من المشكلات في فلسفة العلوم في فئة مختلفة عن الأخرى، على الرغم من أنهم يرتبطون فعلياً ببعضهم البعض. ومن أجل تقصي العلاقات بينهم، سوف أعطي ملخصاً للسجال حول الواقعية العلمية وهو ما سوف يوسع بشكل عمدي من نطاق هذا البحث. سأحاول أن أفض الاستبناك بشأن موضوع السجال بداية من الزعم بوجود عدم انسجام بين الفيزياء والفلسفة. أبيستمولوجياً، لا تستطيع التجريبية مجارة مناهج فيزياء القرن العشرين (فقرة ١-١، ٣-١)، بينما على المستوى الأنطولوجي، لا تتمكن الميتافيزيقا التقليدية من مواكبة بنية نظرية الكم (فقرة ٤-١، ٦-١). قام مؤسسو

التجريبية المنطقية بتجاهل القضية الأولى، المشكلة التقليدية في سعيهم نحو التمييز بين العلم التجريبي والميتافيزيقا. ومع ذلك فقد غرض الكثير من المدافعين عن الواقعية العلمية الطرف عن القضية الثانية، المشكلة الجديدة في دفاعهم عن واقعية ما دون الذرة.

اعتمد كارناب ورايشنباخ على نظريات النسبية والكم حينما وجهوا انتقاداتهم لكل المفاهيم القبلية بوصفها ميتافيزيقية. ودافعوا عن نظرية للتحقق في المعنى واقتروا إعادة تأسيس المحتوى التجريبي للنظريات الفيزيائية لجعلها خالية من أي افتراضات ميتافيزيقية. إلا أنهم في سعيهم لذلك تجاهلوا حقيقة أن المناهج التجريبية للفيزياء منذ تجربة جاليليو وحتى الآن قد تشعبت وغيرت بشكل دراماتيكي من فهمنا للمعرفة التجريبية؛ حيث ينحاز استخدام أجهزة الملاحظة والقياس إلى فهم حر وتعميمي للدليل في الملاحظة والتجربة فما يعول عليه في الفيزياء هو نتائج القياسات وليس المعطيات الحسية. من هنا أثارت التجريبية المنطقية الأسئلة التالية. ما المعرفة التجريبية من وجهة نظر مناهج الفيزياء الحديثة؟ وأين تنتهي حدود العلم التجريبي لتبدأ الميتافيزيقا، وفقاً لهذا النمط من المعرفة؟ ونظراً إلى أن ما ثار مؤخراً من سجال حول الواقعية العلمية نتيجة لهذه الأسئلة الأبستمولوجية، فهو إرث الوضعية المنطقية في القرن العشرين (فقرة 1-1). وفي واقع الأمر فإن المواقع الأساسية الحالية في هذا السجال هي نتيجة لترسيم الحدود بين ما هو تجريبي في مقابل ما هو ميتافيزيقي بأشكال مختلفة. تعتبر الواقعية الشاملة - الساذجة - أن كل البنى الرياضية للنظريات الفيزيائية لها نظير في الواقع. ولا تؤمن البنائية بأي شيء مؤسس على الأدوات الرياضية والأجهزة التقنية.

وفيما بين الموقفين تتعدد مواقف الواقعية النقدية، والتجريبية المعتدلة، والتجريبية الصريحة (فقرة ١-٢). يناضل السجال من أجل التوصل لمعايير أبستمولوجية تساعد في تحديد أي من مفاهيم النظريات الفيزيائية تصف شيئاً واقعياً، وأياً ليس كذلك. من الممكن أن نجد معياراً مستقلاً لما نعرف أنه حقيقي، معيار لا يعتمد على نظرياتنا الفيزيائية ولا على معتقداتنا الميتافيزيقية؟ تتم تسوية هذه المسألة في حدود الحوادث الفيزيائية التي تحدث بالفعل وفق أجهزة القياس. وتعد المصادفة هنا السمة المميزة أبستمولوجياً (فقرة ١-٣).

وعند هذه النقطة يأتي دور المشكلات الأنطولوجية (أو الميتافيزيقية) التي أثارها نظرية الكم. إن الحاجة إلى نظرية الكم من أجل تفسير الحوادث العارضة ونتائج القياسات لفيزياء ما دون الذرة حقيقة أولية. إلا أن نظرية الكم تتعارض مع ذلك النوع من الواقعية الذي طالما تم الدفاع عنه لقرون؛ أعني الواقعية الكلاسيكية. فالمعنى التقليدي للواقعية يتحدد من خلال أشياء فيزيائية لها خصائص محددة كلياً وقوانين حتمية للطبيعة. والميتافيزيقا الداعمة هنا هي فكرة أن الأشياء الفيزيائية هي أشياء أشبه بالجواهر الأرسطية، أو الأفراد، واعتبار القوى العلية كخصائص ديناميكية. تخبرنا نظرية الكم مع ذلك أن الواقعية الفيزيائية ليست مؤلفة من جواهر مثل هذه (فقرة ١-٤). ونوع الواقعية الذي يوضع تحت التمحيص هنا هو الميتافيزيقا الكامنة خلف الفيزياء الكلاسيكية. ومن أجل رؤية ما يتبقى منها من جانب نظرية الكم، يجب فحص الافتراضات الميتافيزيقية وغير التجريبية في الفيزياء. لقد اتضح أن بعضاً منها لا يمكن الاستغناء عنه بالنسبة إلى الفيزياء، حتى إن بدا أن نظرية الكم على

خلاف معها (فقرة ١-٥). ختاماً يتم اقتراح واقعية الخصائص الفيزيائية المؤسسة على مقاييس الكميات الفيزيائية. إنها قوية بما يكفي من أجل دعم المناهج الرياضية والتجريبية للفيزياء، ولكنها أضعف من أن تكون متوافقة مع بنية نظرية الكم (فقرة ١-٦).

١-١ المعرفة التجريبية والميتافيزيقا

حين انتهت محاولات إكمال الفيزياء الكلاسيكية إلى طريق مسدود حوالي عام ١٩٠٠، بدأ السجال التقليدي حول العلم الجاليلي في التشابك مع التحديات الجديدة للواقعية العلمية. قدم ماخ تحليلاً ممتازاً للميكانيكا الكلاسيكية، وقام دوهم بتفسير هدف النظريات الفيزيائية^(١) وبنيتها؛ ودافعا عن الموقف التجريبي والموقف الأداتي على التوالي، فلا وجود للذرات أو القوى وفقاً لماخ. وهذه الكيانات الافتراضية وفقاً لوجهة نظره، يتم افتراض وجودها فقط من أجل وصف الظاهرة بشكل إيجازي ومن الأفضل استبدال توصيف أكثر طبيعانية بهم^(٢). وبناء على الأبحاث المفصلة للطريقة التي ترتبط بها الكميات الفيزيائية بالظواهر التجريبية، فقد قدم دوهم تفسيراً أدائياً مؤثراً للفيزياء الكلاسيكية. إلا أن كلا الموقفين كانا متعارضين مع ماكسويل والنظرية الحركية لبولتزمان للغازات وأسسها الذرية على التوالي. ومع ذلك، فحين أصاب بولتزمان اليأس بدأت إمكانية إخضاع الذرات ومكوناتها للملاحظات والقياسات التجريبية غير المباشرة في معامل طومسون

(١) Mach 1883, Duhem 1906.

(٢) Mach 1883, 466.

ورذرفورد. وفي عام ١٩٠٣، تمت ملاحظة وميض الضوء الناتج عن أشعة سيجما بشكل مباشر للمرة الأولى. كما دخل البحث في الذرة، والنظرية الحركية للغازات، والأسس الإحصائية للديناميكا الحرارية مرحلة صياغة المشكلات الفيزيائية والتي أدت في النهاية إلى قانون بلانك لإشعاع الجسم المعتم وفرضية أينشتين لكمات الضوء. كانت تجارب طومسون ورذرفورد للجسيمات عالية الشحنة لا تزال تُقدم كليا بالمصطلحات الكلاسيكية، إلا أن التوصيفات النظرية لبلانك وأينشتين لتفاعل المادة والإشعاع كانت مختلفة. لقد أسدلا الستار على الفيزياء الكلاسيكية، التي لم يكن بلانك ولا أينشتين ليتقبلها.

أضحى كارناب ورايشنباخ أبعد الفلاسفة تأثيراً في فيزياء القرن العشرين. فقد قاما تحت تأثير الإعجاب بالثورات العلمية التي أدت إلى نظرية النسبية ونظرية ميكانيكا الكم إلى عمل قطيعة مع الكانطية الجديدة neo-Kantianism^(*) والالتجاء إلى رؤية ماخ التجريبية للواقع. قامت دائرة فيينا للوضعية المنطقية بتبني رؤية ماخ في ازدياد الميتافيزيقا وبدأت في السعي خلف معايير للتمييز بين المعرفة التجريبية والميتافيزيقا. وهو المسعى الذي سيطر على أبستمولوجيا الفيزياء الحديثة طوال العقود التالية. وجهت فلسفة العلم تركيزها إلى إعادة تأسيس المحتوى التجريبي للنظريات الفيزيائية. إلا أن هذا السعي خلف معايير للتمييز من هذا القبيل قد باء بالفشل. وتعين على التجريبية أن تواجه أطروحة دوهم-كواين التي تذهب

(*) مصطلح عام يُشير إلى أي مذهب في الميتافيزيقا أو الأخلاق يستلهم فلسفة كانط، وعادة ما يُقصد به التيارات الفلسفية التي ظهرت في ألمانيا ما بين عامي ١٨٧٠ و١٩٢٠ كرد فعل على الرؤية المادية للطبيعة والرؤية التطورية للأخلاق. (المترجمان)

إلى القول بعدم جواز الفصل بين المكونات التجريبية للنظريات الفيزيائية، بالإضافة إلى التغيير في نظرتنا للعالم كنتيجة للثورات العلمية الكبرى التي أشار إليها كون^(١). ووفقاً لهذه الرؤى، تحتم على التجريبية أن تواجه مشكلة أن العلم التجريبي غير قابل للانسلاخ التام عن الميتافيزيقا على النحو الذي تقترضه. ظهر السجال الأخير حول الواقعية العلمية في وقت ظهور كتاب كون الشهير بنية الثورات العلمية. وعلى نحو ما سوف نرى، فقد كان في الواقع سجلاً حول الجوانب الميتافيزيقية للعلم الحديث.

بالنسبة إلى فلسفة العلم التجريبية في القرن العشرين، فإن الميتافيزيقا نسق من القضايا القبلية^(*) a priori عن العالم. ومن وجهة النظر التجريبية، فإن الميتافيزيقا هي نقيض التجريبية. وتعد رؤية كانط للميتافيزيقا كتفسير للعالم غير رياضي وغير تجريبي دعامة هذا الفهم للميتافيزيقا^(٢). ووفقاً لخلفية كارناب ورايشنباخ الكانطية الحديثة، فإن ذلك يمتد بجذوره في الفلسفة التقليدية، خاصة في معارضة التجريبية والعقلانية. وعلى الرغم من اختلافها مع آراء كانط عن الميتافيزيقا^(٣)، فإنها تسير على خطى ماخ في ازدرائها.

وانظر أيضاً الهوامش التالية. Quine 1951; Kuhn 1962, 1970. (١)

(*) التمييز بين القبلي a priori، والبعدي a posteriori يلج بنا في مروج الإستمولوجيا - نظرية المعرفة - الخصبة؛ فالقبلي هو ما لا تتطلب معرفته خبرة على حين يشترط البعدي وجود الخبرة. لعله من الواضح أن قضية "كل المثلثات لها ثلاثة أضلاع" قضية قبلية، إلا أن الفلسفة التجريبية عموماً بتأكيدا على أهمية الخبرة في وجود أي معرفة ستدفع بأن حتى هذا النوع من القضايا لا يمكن أن يخلو من مدخلات التجربة. (المترجمان)

(٢) انظر: Kant 1781/87, A 837-850/B 865-878.

(٣) انظر: Falkenburg 2004

ما زالت الاعتراضات الحديثة الموجهة لوجود الكيانات النظرية وافتراس وجود قوانين صادقة للطبيعة تدين بوجودها لهذا الأصل. وهي مرتبطة بالاعتراضات المنطقية والأبستمولوجية المعرفية التقليدية ضد الكيانات غير القابلة للملاحظة. تشمل هذه الكيانات غير القابلة للملاحظة على: ذرات جاسيندي أو جاليليو - والتي تعود بجذورها إلى الفلسفة الطبيعية القديمة - وجسيمات ديكارت الميكانيكية - الشبيهة بالذرات - وفضاء نيوتن المطلق - والذي دافع عنه كلارك في مواجهة ليبنتز - والعلاقة العلية بين الأحداث المنتظمة وفقاً لما يشبه القوانين - والتي ارتاب فيها هيوم - والجوهر بالمعنى الذي قدمته الميتافيزيقا التقليدية، كحامل للخصائص العرضية للموضوعات المادية. ووفقاً لكانط، فإن السجال التقليدي حول هذه الكيانات كان يستهدف المفاهيم الميتافيزيقية. فبحسب كانط، فإن المفاهيم الميتافيزيقية من هذا القبيل تفتقر إلى الحقيقة الموضوعية، أو لا تنطبق على الموضوعات التجريبية في المكان والزمان⁽¹⁾.

تتعامل النظريات الفيزيائية حالياً مع الذرات وبنيتها الداخلية، ومع القوى، ومع المكان والزمان، والكون. ومن حيث اللغة المستخدمة، فإنها تشير بدورها إلى كيانات أشارت إليها من قبل الفلسفة الطبيعية والكونيات والميتافيزيقا التقليدية. إلا أن الفيزياء الحديثة على النقيض من الميتافيزيقا التقليدية تتمتع بالإمكانات التجريبية لرصد الإشعاع الكهرومغناطيسي ومجال

(1) ... مادامت شروطاً ليست ضرورية لإمكان الخبرة على وجه التحديد، انظر: Kant 1781/87. رفضت كل من الكانطية الجديدة والوضعية المنطقية نظرية كانط للمكان والزمان بوصفها صوراً للحس قبلياً؛ انظر الفصل السابع من: 2000 Falkenburg

الكلمات، والمكونات دون الذرية للمادة وللقوى التي تُبقي عليها معاً، والإشعاع الكوني المحيط للكون. تُمكن قوانين النظريات الفيزيائية العلماء من عمل تنبؤات كمية دقيقة حول الظواهر التجريبية والإمبيريقية. انسحبت الأشياء الفيزيائية والأنساق والبنى التي يمكن قياسها من مجال الميتافيزيقا التقليدية حيث توجد موضوعات تند عن الملاحظة يتم التسليم بها دون إثبات أو تفنيد. على حين بقيت الذرات كأجزاء مكونة للمادة في نطاق عالم الميتافيزيقا طالما ظلت الإلكترونات ونواة الذرة تفتقر للدليل التجريبي. تم التسليم بالمكان والزمان المطلقين ككيانات منفصلة مثل خلفيتهم المكانية-الزمانية. وظلت هذه الكيانات في العالم الميتافيزيقي نفسه حتى قدم أينشتين مفهومه الإجرائي عن الآنية ومبادئه عن التكافؤ مما وضع حجر الأساس لظهور النسبية الخاصة والعامة. والكون في مجمله كان خاضعاً لبراهين قبلية مع أو ضد إمكانية العُمَر المتناهي للعالم، على حين تركز الفيزياء الكونية الحديثة على ملاحظات تجريبية كمحك لنماذج كونية معينة.

إلا أن الأساس التجريبي للفيزياء الحديثة ليس على هيئة إدراك حسي مباشر، على نحو ما سوف تحبذ النزعة التجريبية. إنها تركز بدلاً من ذلك على ملاحظات وقياسات تجريبية محملة بالنظرية theory-laden. لذا، فمن منظور الفيزياء الحديثة يفقد التمييز بين المعرفة التجريبية والميتافيزيقا براعته. ومن أجل تأسيس تمييز جديد، ربما تستطيع الاعتبارات الآتية المساعدة. تسربت موضوعات النظريات الفيزيائية من مجال الميتافيزيقا الخاص بالفلسفة الطبيعية التقليدية كنتيجة لسمتين أبستمولوجيتين للفيزياء الحديثة:

١- لم يتم النظر قط إلى موضوعات النظريات الفيزيائية بوصفها خارج نطاق الشك أو أنها نهائية^(١). فعلى نقيض النظريات الدوجماتيقية للميتافيزيقا التقليدية، تكون النظريات التجريبية مطروحة للتحخيص. فالتجارب الجديدة قد تكشف عن خصائص غير متوقعة للظاهرة. ولا تتعاطم الشكوك حول عودة الفيزياء إلى أسر الميتافيزيقا إلا حين تتشد الأولى التوصل إلى تفسيرات نهائية. فالبحث عن تفسيرات نهائية يحمل عبئاً ميتافيزيقياً ثقیلاً. هنا يثور الشك حول الوقوع في براثن الدوران أو الانتكاس إلى الخلف. فالسعي خلف نظرية فيزيائية نهائية يتبنى متطلبات بعد-نظرية من قبيل استبعاد وجود نظريات منافسة وشطب كل المحددات المحتملة، بما في ذلك الثوابت الأساسية للطبيعة (ثابت الجاذبية ...، سرعة الضوء c، ثابت بلانك ...).

٢- إن مادة بحث النظريات الفيزيائية تُعد تجريبية مادامت اعتمدت مفاهيمها على التجربة. وفي هذا السياق، يُمكن فهم معنى "تجريبي" و"مُعتمد على التجربة" بالمعنى الضيق أو بالمعنى الواسع؛ حيث تُعتبر محتويات النظرية الفيزيائية الممكن قبولها مؤسسة على الإدراك الحسي والمنطق وحدهما - كما تفترض الوضعية المنطقية، أو على نحو بديل يتم التسليم بأن العلاقة المتبادلة بين النظرية والتجربة تؤسس لمعرفة تجريبية بالمعنى التعميمي، وهو ما يكون على قدم المساواة مع الإدراك الحسي.

(١) أي إنها ليست موضوعات غير مشروطة أو تنتمي لعالم النومينا [عالم الشيء في ذاته في مقابل عالم الفينومينا - المترجم] بالمعنى الكانطي، والتي قد ينشأ عنها كونييات ضد النومينا. انظر:

Kant 1781/1787, B 432-596/A 406-567; and Falkenburg 2000, Chap. 5.

تفي كل النظريات الفيزيائية الناضجة بهذه المعايير. وعلى وجه الخصوص تتعرض وجهات النظر حول الأجزاء المكونة للمادة للمراجعة من وقت لآخر. إن ذرات الفيزياء الذرية ليست ذرات بالمعنى الحرفي الذي نقابله في الفلسفة الطبيعية القديمة. فهي مكونة من أجزاء ويمكن تقسيمها. تُظهر التجارب أن الذرات تتكون من إلكترونات وبروتونات ونيوترونات. وتتكون البروتونات والنيوترونات من الكواركات. لا يمكن فصل الكواركات، إلا أنها السبب في عمليات تفتيت البروتونات والنيوترونات. أما مسألة وجود أجزاء مكونة للكوارك (وبأي معنى يمكن أن توجد) فما زالت غير معروفة. والنموذج المعياري الحالي لفيزياء الجسيمات لا يُعد نهائيًا. وحتى الآن ما زالت كل النظريات الفيزيائية مطروحة للمراجعة. يقترح المعيار أن البحث الحالي عن نظرية نهائية للفيزياء، ولتكن الجاذبية الكمية والفلك الكمي، قد يكون ميتافيزيقيًا^(١). سوف يوافق الكثير من الفيزيائيين - ولكن بشكل أساسي لأن المحاولات الحالية للتوحيد تنتهك أيضًا المعيار الثاني للتأسيس على التجربة.

ومع ذلك فمن وجهة النظر التجريبية المتزمته نجد أن المعيار الثاني مثير للمشكلات. سعت التجريبية المنطقية خلف مشروع تأسيس محتويات النظريات الفيزيائية بناء على الإدراك الحسي. إلا أن مشروع كارناب الأصلي كان مقدرًا له أن ينحدر نحو صورة أضعف فأضعف. فقد آل أمر

(١) فيما يتعلق بالعناصر الميتافيزيقية للنظريات الفيزيائية الموصوفة في الفقرة (١-٥)، فإنها في واقع الأمر ميتافيزيقية. إنها تعتمد على المبادئ المابعد - نظرية الضرورية لصياغة النظرية في الفيزياء.

تحديد معايير واضحة للدلالة التجريبية للمفاهيم النظرية^(١) إلى الفشل، ولم يتبق في نهاية الأمر سوى مفهوم تعميمي للخبرة للتمييز بين المواقف التجريبية والميتافيزيقية. لكن اتضح أن هذا بمثابة عيب قاتل للمشروع التجريبي لتقديم معايير للتمييز بين المعرفة التجريبية والميتافيزيقية. فأى مفهوم تعميمي للخبرة ينطوي بالضرورة على مواقف غير تجريبية، والتي تكون بدورها ميتافيزيقية إذا ما نظرنا إليها من وجهة النظر التجريبية. وعبر هذا السبيل ظهر خلف للسجلات الميتافيزيقية التقليدية حول الذرات أو المكان والزمان المطلقين؛ أعني التساؤل حول ما إذا كان ثمة معنى تعميمي مشروع يمكن لنا بمقتضاه أن نحوز معرفة تجريبية عن الذرات والجزيئات دون الذرية. وعلى حين تتطلب الأسئلة حول وجود الذرات وطبيعة المكان والزمان محتوى تجريبياً في إطار الفيزياء، فإنها تظهر في إطار الفلسفة في ثياب جديدة.

إن أية محاولة فلسفية لإلقاء الضوء على التساؤل حول إمكان وجود معرفة عن الذرات تواجه معضلة الخبير. فغير الخبراء تنقصهم معرفة المناهج والمفاهيم التجريبية لدى الفيزيائيين. وحين لا يستطيع غير المتخصص أن يلاحظ أية ظواهر على الإطلاق، يتكلم الفيزيائي عن الدليل التجريبي. فليس لدى غير المتخصصين أي معيار لتقرير ما إذا كان الفيزيائيون يحصلون على دليلهم المحمل بالنظرية بطريقة اعتباطية تماماً وبشكل دائري أم لا. والخبراء وحدهم؛ أعني الفيزيائيين أنفسهم، في الغالب الأعم لا يابهون لما يبدو أنه مشكلات فلسفية صغيرة تنشأ عن نتائجهم. فمن

(١) انظر : Carnap 1956 and Stegmuller 1970, Chap. V .

الواضح أنه ليس من شأنهم الاهتمام بالتساؤل حول أي المعاني التعميمية لكلمة "تجريبي" تتفق مع النتائج التجريبية التي تجعل من نظرياتهم تجريبية. ببساطة هذا التساؤل ليس له محل من الإعراب بالنسبة إليهم، لقد أجابت عنه بالفعل النتائج التجريبية والتنبؤات النظرية. إلا أن أي شخص غير فيزيائي لن يتمكن من فهم تجارب الفيزياء الذرية وما دون الذرية، ليتبين كيف اعتمدت على خلفية معرفية آمنة. إن حجج كل من المعسكر المناصر للواقعية والمعسكر المناوئ لها بشأن وجود الكيانات غير القابلة للملاحظة وحقبة قوانين الفيزياء لتتحقق دون شك في إصابة أهدافها، إذا ما أغفلت البنية المعقدة للفيزياء الحديثة. وفي الواقع فهذا ما فعلته اتجاهات عديدة في فلسفة العلم. ولم يثبت أن أيًا منها مثمر للنهوض بالحوار بين الفيزياء والفلسفة. وفي واقع الأمر فإن أفضلها إما أن يكون شديد التعقيد أو شديد التحديد^(١).

(١) إن ما يُدعى بالنهج "التركبي" في منطق الدرجة الأولى (Ramsay 1929; Carnap 1956, 1966) اتضح أنه غير عملي. وارتكز خلفه، نهج النموذج النظري، على مجموعة ساذجة من النظريات وسيمانطيقا تارسكي (Suppes 1969)؛ وقد كانت أكثر نجاحًا؛ ويدعوها فان فراسن (١٩٨٠، ١٩٨٧) بالنظرة "السيمانطيقية" للنظريات. وتم استخدامها بشكل أكثر تفصيلاً في النهج البنيوي (Sneed 1971)؛ ولنظرة عامة انظر: Balzer et al. 1987; Balzer and Moulines 1996. إن النهج البنيوي تم توظيفه بشكل أكثر تعقيدًا في: Ludwig 1990 and Scheibe 1997b, 1999. أصبح من قبيل الموضة في العقد الأخير إعادة تأسيس ليس النظريات الفيزيائية ومحتواها التجريبي ولكن النماذج ذات المجال المحدود وحدها والطريقة التي ترتبط بها مع الظواهر: انظر: .Morgan and Morrison 1999; Bailer-Jones 2004

ودون الدخول في أية تفاصيل لهذه الاتجاهات، فإن مشكلة ما إذا كان ممكناً اعتبار الأشياء الفيزيائية تجريبية أم لا يمكن تحديدها على النحو التالي. تنشأ أي شكوك بشأن المحتويات التجريبية للنظريات الفيزيائية من السمة البنائية لتكوين النظرية والتجربة. فالإنجاز الأساسي للعلم الجديد عند جاليليو كان استبدال التجربة والقياس بالإدراك الحسي. لم تضع الفيزياء الحديثة فقط شبكة من التشييد النظري حول الظواهر التجريبية. فتحت الظروف العملية تقوم التجارب أيضاً بإحداث الكثير من الظواهر الجديدة التي لا تحدث في الطبيعة؛ إذ لم يرق المنهج التجريبي للفيزياء بتوسيع قدراتنا التجريبية على إدراك الحقيقة بل قام أيضاً بتغييرها جذرياً. تهدف التجارب إلى بحث الأنساق المنعزلة تحت ظروف أقرب إلى المثالية. ومن أجل القيام بذلك، يتم تحليل الظواهر على خطى منهج جاليليو للحل والتركيب (التحليلي - التركيبي)^(١). مثال ذلك ما قام به جاليليو من تحليل سلوك الجسم الساقط تحت تأثير الجاذبية وإعاقة مقاومة الهواء. كما قام - علاوة على ذلك - ببحث هذه المسألة تحت ظروف تجريبية متفاوتة. هل نحن مؤهلون للقول: إن شبكة النظريات الفيزيائية تمثل شيئاً في الطبيعة إذا ما كانت تقوم - على هذا النحو - بهيكله وتوسعة قدراتنا التجريبية على التوصل للحقيقة؟ إذا لم نكن كذلك فإن معظم الموضوعات الفيزيائية ليست خاضعة للتجريب. وإذا ما كانت الإجابة بنعم فإن قدرتنا التجريبية على التوصل للحقيقة نظرية إلى حد بعيد. ومن ثم نحتاج معياراً فلسفياً جديداً للتمييز بين الأجزاء الآمنة (أو التجريبية) وغير اليقينية (أو الميتافيزيقية) لنظرياتنا.

(١) انظر: Losee 1993, 57-62, and Sect. 2.2

وفي الواقع فإن نظرة عن قرب إلى السجال حول الواقعية العلمية توضح أنه لا يتعامل مع أشباه المشكلات الميتافيزيقية بالمعنى الذي تقدمه التجريبية المنطقية^(١). على النقيض تمامًا يتناول المشاركون في السجال بشكل محدد للغاية مسألة أي أشباه العبارات والبني النظرية يمكن تأويلها حرفياً وأيها لا يمكن. ثمة هدف مشترك لمعسكر أنصار الواقعية ومعارضيهما: إنهم يريدون إيضاح إلى أي مدى تقدم النظريات الفيزيائية وصفاً كافياً للموضوعات والعمليات الواقعية في الطبيعة، أو إلى أي مدى تسمح هذه النظريات بتأويل واقعي.

أما وقد وصلنا إلى هذه النقطة، فإننا بحاجة إلى توضيح للمفاهيم. يستخدم الفلاسفة كلمة "واقعي" بطريقة تختلف جوهرياً عما يفعله العلماء حين يتحدثون عن وصف واقعي للظاهرة أو النسق. يسبغ العلماء صفة الواقعية على النموذج النظري حين يكون جيداً؛ أي إذا لم يكن مؤسساً على تصورات مثالية غير كافية (وغير واقعية). على حين يجد النموذج لنفسه تأويلاً واقعياً على يد الفلاسفة إذا ما كان له دلالة. وفيما يلي بيان للاختلاف بين الاستخدامين. تنصب اهتمامات فيلسوف العلم على ما إذا كانت نظرية ما تشير إلى شيء في الطبيعة أم لا. من ناحيته يتساءل العالم عن كيف يقدم

(١) ومع ذلك فأحياناً ما تتميز المواقف في السجال بطريق تدعم هذا الشك؛ مثال ذلك: Fine 1984, 97: "لذا فحين يتفق الواقعي و ضد الواقعي، على سبيل المثال بشأن أنه بالفعل ثمة إلكترونات وأنها تحمل بالفعل وحدة شحنة سالبة وأن لها بالفعل كتلة صغيرة (حوالي 9.1×10^{-31} جرام)، فإن ما سوف يود الواقعي أن يضيفه هو التأكيد على أنها كذلك بالفعل - "بالفعل ثمة إلكترونات، حقاً!" يقدم فاين مقاربتة الأنطولوجية الطبيعية من أجل استبعاد المشاكل الزائفة من هذا القبيل.

النموذج وصفاً جيداً للنظام الذي يُشير إليه (أو يتتبع سلوكه) دون البحث في وجود هذا النظام. ومن وجهة نظر برجماتية فإن معظم العلماء واقعيون من وجهة نظر الفلاسفة. وفي الممارسة الفيزيائية، فإنهم عادة ما يتصرفون كواقعيين حين يصنعون النماذج ويقومون بالتجارب. وفي مراحل العلم العادي^(*) فإنهم لا يضعون نظرياتهم ومدلولات مصطلحاتهم النظرية موضع البحث. فهذه المدلولات وفقاً لهم ليست من حيث المبدأ على المحك، ولكن فقط من حيث ارتباطها بمفاهيم فيزيائية معينة لم يتم التحقق منها بعد عن طريق التجربة. (علاوة على ذلك، يصدق هذا على وظائف الموجة الميكانيكية الكمية وحزم الموجة التي يوظفونها في النماذج المادية لفيزياء الكم ويعدهونها في تجاربهم^(١)). إن نضالهم الأساسي من أجل تقديم وصف نظري ملائم وتفسير الظواهر. وهذا المسلك البراجماتي تجاه المدلول يشترك فيه كل العلماء، بشكل مستقل عن وجهات النظر الأبستمولوجية المحددة التي سوف يؤكدونها حين ينخرطون في الإجابة عن الأسئلة الأبستمولوجية، من قبيل موضوعات نظرية الكم.

إن اتخاذ قرار فلسفي مع أو ضد التفسير الواقعي للقوانين وكيانات الفيزياء أمر جد مختلف؛ إذ يعتمد بشكل حاسم على الافتراضات الفلسفية أو الميتافيزيقية المسبقة حول ادعاءات صريحة عن الواقعية. فمن وجهة نظر تجريبية تستلزم الواقعية المعطيات التجريبية وحدها، وأسبابها مادامت مستمدة من المعطيات^(٢).

(*) راجع الهامش ص ٢٠. (الترجمان)

(١) انظر الفقرة ٧-٣.

(٢) قد تكون التجريبية أكثر تحرراً أو أكثر صرامة. يقر كارترابيت ١٩٨٣ بالعلل، ويخالفه فان فراسن ١٩٨٠ في ذلك.

إن الواقعية العلمية، على النقيض من التجريبية، هي افتراض أن العالم المادي شيء شبيه بحاصل جمع الموضوعات الخاصة بأكثر نظرياتنا العلمية قبولاً. وفي العقود القليلة الماضية، أصبح الخلاف موضوعاً للسجال على مستويات عدة، المجرد أو العيني، العام أو الخاص، للنظريات بأكملها أو في حدود الكثير من الحالات البحثية. ومع ذلك، فقد أصبح السجال منفصلاً عن السجال الفلسفي حول الطرق التي تبحث الفيزياء الحديثة من خلالها رؤيتها التقليدية للواقعية. إن هذه الرؤية في حد ذاتها ميتافيزيقية، وقد هزت نظرية الكم دعائمها^(١). على الرغم من ذلك يمكننا التسليم بأن موضوعات النظريات الفيزيائية الناضجة قد نجت من الوقوع في برائن الفلسفة الطبيعية التقليدية وفقاً لمعيارين ذكراً آنفاً: (١) أي من محتويات هذه المعرفة مطروح للمراجعة، و(٢) إن مفاهيمها تتأسس على التجربة.

وبهذا المعنى فإنها تنتمي إلى الواقعية التجريبية أو الظاهرية بأوسع معانيها؛ أي أنها تمثل أجزاء أو بنى من العالم المادي، أو من الطبيعة، التي هي موضوع دراسة النظريات الفيزيائية (أو العلم الطبيعي في عمومه). إن

(١) يمكن القول: إن السجال الحالي حول تأويلات نظرية الكم لا يتداخل مع النقاش الحديث حول الواقعية العلمية، حتى إن كان متصللاً بمواقف يمكن الدفاع عنها في توافق مع الفيزياء الحديثة. إن الواقعية العلمية بالمعنى الكلاسيكي للواقعية تتعارض مع واقعة أن جسيمات ما دون الذرة لا تظهر سلوكاً كلاسيكياً، أو أنه ما من وجود زمكاني بالمعنى الكلاسيكي المعتاد. تتخلص التجريبية الصارمة من هذه المشكلة - ولكنها تتعارض مع واقعة أنه دون الاعتقاد في وجود جسيمات ما دون الذرة فإن مشروع بحثها على وجه التحديد في التجارب المنطقية لفيزياء الكم ليس لها معنى على الإطلاق. تتم مناقشة المشكلة الحاسمة لميتافيزيقياً أي جسيم في الفقرة (٤-١).

الواقعية التجريبية هي تجسيد لأي شيء يمكن أن يكون موضوعاً للتجريب ويمكن أن يخضع للبحث من خلال مناهج العلم الحديث. ويهتم تفسيرنا الأبيستمولوجي للواقعية بمفهوم عام من هذا القبيل للواقعية التجريبية. ففي حدود هذا المفهوم، يمكن تبسيط السجال حول الواقعية العلمية على النحو التالي. إنه يتعامل مع التساؤل حول ما الذي يمكننا - من حيث المبدأ - أن ندعوه "الواقعية التجريبية" من وجهة نظر العلم الحديث. إلى أي مدى من القوة أو الضعف يمكن للنظرية أن تخترق تصور الواقعية التجريبية، إذا ما طابناها أن تتفق مع الفيزياء الحديثة؟ وإلى أي مدى تحدد محتويات أفضل النظريات لدينا وجهات نظرنا حول الواقعية التجريبية، وبالعكس إلى أي مدى تحدد تلك الأخيرة المحتوى التجريبي لما لدينا من نظريات؟ دعونا الآن نلقي نظرة على ما يمكن للتجريبية أن تعلمه لنا حول هذه الأسئلة الأبيستمولوجية.

٢-١ تمييزات أكثر أو أقل تجريبية

لا تُسلم التجريبية الصارمة إلا برؤية ضيقة للواقعية التجريبية، ولمعرفتنا التجريبية للواقعية. وبالنسبة إلى ما لا سبيل لمعرفته عن طريق خبرتنا الحسية فإنها تتخذ الموقف الشكي أو اللا أدري. إن الأبيستمولوجيا التجريبية للعلم لديها جذور عميقة في التقليد الفلسفي الذي يعود إلى أرسطو. إلى أي مدى تكون التجريبية ممكنة إذا ما أردنا أن نفسر ظواهر تجريبية؟ ما زالت التجريبية التقليدية تتحو إلى تفسير الظواهر في حدود الكيانات غير القابلة للملاحظة: كجوهر أرسطو، ذرات لوك للخصائص الأولية، عناصر ماخ الأساسية للإدراك الحسي. كان هيوم الوحيد الذي التزم بنزعة شكية لا أدريية جذرية.

كان مشروع كارناب الأساسي لإعادة تأسيس المحتوى التجريبي للنظريات الفيزيائية مؤسساً على محتويات الخبرة الحسية ويمكن فهمه كمحاولة للتوفيق بين التفسيرات النظرية والتجريبية الصارمة. طور كارناب فيما بعد نسخة مخففة من هذا المشروع، مع التوسع في وجهات نظره المبكرة حول الواقعية التجريبية. في عام ١٩٥٦ اعتقد أن الواقعية التجريبية تشمل كل الموضوعات التي تشير إليها المصطلحات النظرية، مادامت هذه المصطلحات النظرية تنتمي إلى نظريات مقبولة ولها مغزى تجريبي، أي تشير إلى معطيات تجريبية ما^(١).

أخفق مشروع كارناب لإعادة تأسيس النظريات الفيزيائية في نهاية الأمر بداعي بنية النظريات الفيزيائية نفسها؛ إذ لا تسمح هذه البنية لأحد بأن يعطي معايير مبهمة للمغزى التجريبي بالمعنى الذي قدمه كارناب^(٢)، كما تقود المرء إلى الريبة في أن يكون الخط الفاصل بين ما هو تجريبي وما هو ميتافيزيقي يسير عبر منتصف النظريات التجريبية. وفي محاولة مهمة لتصحيح مشروع كارناب، سلم فلاسفة العلم بأن هذا الخط الفاصل يسير بالفعل مخترقاً نطاق العلم؛ إذ لم يرفضوا بالتحديد فكرة أن ثمة وجوداً لهذا الخط الفاصل. أكد دوهم وكواين أن النظريات التجريبية لا حتمية تجريبياً. بمعنى أنها لا تكون كاملة الحتمية أبداً بناء على المعطيات التي تؤلف أساسها

(١) انظر Carnap 1956. يُترجم كارناب مصطلحات فريجه (الحس)، و(الإشارة) إلى "المعنى" و"الدلالة"، على التوالي. ومن ثم فإن ما يتطلبه من أجل الدلالة التجريبية هو البحث عن الإشارة إلى بعض المعطيات التجريبية.

(٢) انظر: Stegmüller 1970, Chap. V.

التجريبي. إضافة إلى ذلك، دافع كواين عن وجهة النظر التي مفادها أن النظريات التجريبية قابلة للاختبار فقط في مجملها، وليس كأجزاء منفصلة. تلك هي أطروحة دوهم-كواين الشهيرة^(١). لم يدافع دوهم نفسه عن مثل هذه الأطروحة الصارمة. فقد اعتقد أنه حين تخفق تجربة ما، فإن الأمر يكون متروكاً لخبرة العالم في أن يقرر أي أجزاء النسق النظري الداعم يوضع موضع البحث. يمكن تفسير اعتقاد دوهم في حدود التمييز بين الخلفية المعرفية والافتراضات النظرية الخاضعة للفحص. ومع أن فلسفة العلم التجريبية قد قبلت فكرة أن كل النظريات لا حتمية تجريبياً، فإنها قامت بمتابعة مشروع إعادة تأسيس النظريات التجريبية بحيث تقوم بعزل بنيتها التحتية التجريبية عن أجزائها غير التجريبية.

يمكن إنقاذ برنامج البحث التجريبي (بخلاف كارناب) عن طريق تمييز الأجزاء التجريبية وغير التجريبية للنظرية. ووفقاً لهذا التمييز، يتم التسليم بأن النظريات التجريبية تحتوي على أجزاء ميتافيزيقية لا سبيل لاختبارها. وفقاً لفان فراسن فإن البنية التحتية التجريبية للنظرية وحدها تتناظر بوضوح أشياء في الواقعية التجريبية^(٢). ومع ذلك فإن ما ينتمي إلى البنية التحتية التجريبية لنظرية ما يعتمد مجدداً على ما يمكن اعتباره "تجريبياً"؛ إذ ينبغي أن تزعم التجريبية الصارمة لنفسها الالتزام بالإدراك الحسي. أما ما إذا كانت

(١) انظر: Quine 1953, Duhem 1906.

(٢) انظر van Fraassen 1980, 1987. من المعروف جيداً في واقع الأمر أن النظريات الفيزيائية تحتوي على عناصر غير تجريبية، واصطلاحية من قبيل اصطلاح أينشتين ١٩٠٥ بشأن سرعة الضوء ذات الاتجاهين وتعريف الأنية.

هذه المحاولة لإنقاذ التجريبية الصارمة ممكنة أم لا فهو موضع شك^(١). ولكن الآراء الأكثر تحرراً بشأن الجزء التجريبي للنظرية يدين أيضاً لتفسير تجريبي للواقعية. إن الخط الفاصل بين الأجزاء التجريبية وغير التجريبية (أو الميتافيزيقية) لنظرية ما يمكن أن يُرسم بطرق متعددة. وتقوم هذه الخطوط الفاصلة الأكثر أو الأقل تحرراً بإلقاء ضوء جديد على السجال حول الواقعية العلمية. إنها تُظهر للعيان طيفاً من المواقف الأبستمولوجية التي نقابلها بالفعل عبر هذا السجال.

يعتمد الخط الفاصل على نوع التجربة التي يمكن اعتبارها ذات صلة من أجل أن يكون محتوى نظرية ما تجريبياً. فقد كان بالنسبة إلى التجريبية المنطقية عصا القيادة لجهاز القياس الذي يمكن تسجيله في سجل التجربة^(٢). وبالنسبة إلى فلاسفة العلم الذين قاموا بتعميم المعيار التجريبي للقابلية للملاحظة فهو أي شيء يمكن أن يظهر للعيان من خلال الأجهزة البصرية أو الإلكترونية من قبيل التليسكوب والميكروسكوب أو الميكروسكوب الإلكتروني. بالنسبة إلى الفيزيائيين الممارسين هو أي كمية فيزيائية تظهر في نظرية ويمكن قياسها. بالنسبة إلى معظم الفيزيائيين وفلاسفة العلم الذين لديهم دراية بتجارب الفيزياء فهي بالإضافة لذلك أي نتيجة تجريبية مؤسسة على تحليل المعطيات والخلفية المعرفية النظرية الآمنة. لا تختلف هذه المواقف إلا في الحد الفاصل بين ما هو تجريبي وما هو غير تجريبي على مستويات نظرية مختلفة، بحسب درجة الثقة في الافتراضات النظرية

(١) انظر مناقشتي في الفقرتين (٦-٢)، و(٦-٣) لتجريبية فان فراسن الصارمة.

(٢) ومع ذلك فقد أوضح ناجل ١٩٣١ بالفعل أن العلاقة بين موضع القائم على الملاحظة وقيمة الكمية الفيزيائية معقدة للغاية.

المسموح لها باحتواء المعطيات. ثمة موقفان يتموضعان على طرفي نقيض هذا الطيف. فينسجمان مع التسليم بأنه لا وجود لأجزاء من نظرية فيزيائية مقبولة لديها تلازم مع الواقع. وبهذه الطريقة، نحصل على تصنيف مبدئي لخمسة اتجاهات أبستمولوجية متميزة بشأن الموضوعات الفيزيائية غير القابلة للملاحظة وقوانين الفيزياء: (١) الواقعية الشاملة، (٢) الواقعية النقدية، (٣) التجريبية المعتدلة، (٤) التجريبية الصارمة، (٥) البنائية. من الجلي أن الاختلافات بين هذه المواقف الأبستمولوجية الخمسة ليست بعيدة المدى. إنها اختلافات من حيث الدرجة وليست من حيث المبدأ. ثمة أيضاً مواقف مختلطة، على نحو ما نرى في "التجريبية البنائية"^(*) لدى فان فراسن.

١- الواقعية الشاملة هي الموقف الأقصى. تفترض أن كل أجزاء النظرية الناضجة تناظر شيئاً في الواقع. ووفقاً لها فأي شيء يمكن أن يكون موضوعاً للفيزياء الحالية يوجد في الطبيعة: إن جسيمات النموذج القياسي الحالي لفيزياء الجسيمات بما فيها بوزون هيغز، وكمات المجال الواقعي والافتراضي لنظريات مجال الكم، وحزم الموجة الميكانيكية الكمية والتقوب السوداء تناظر الواقعية الشاملة ما يشيع تسميته بالواقعية "السادجة". ومن بين المدافعين عنها علماء مندفعون وغير متخصصين.

(*) أصبحت التجريبية البنائية Constructive Empiricism علماً على رؤية فيلسوف العلم فان فراسن. قام فراسن بتقسيم العلم إلى عبارات الملاحظة وعبارات النظرية. وهذه الأخيرة وإن كانت يُمكن أن توصف بالصدق أو الكذب، إلا أننا نقبلها فقط باعتبارها - في أفضل الأحوال - الأكثر ملاءمة تجريبياً. عادة ما يُنظر إلى التجريبية البنائية باعتبارها نسخة منقحة من البراجماتية والأداتية، إلا أن المواقف الأكثر تشدداً من كليهما تنفي عن عبارات النظرية قيمة الصدق. (المترجمان)

٢- الواقعية النقدية هي الاعتقاد الكانطي الذي يذهب إلى أن كل موضوعات التجارب الفيزيائية الممكنة وحدها موجودة. وتعني "نقدية" هنا المعنى الكانطي لنقد الميتافيزيقا التقليدية، وأن التجربة الفيزيائية ينبغي فهمها بالمعنى الواسع للنتائج التجريبية والملاحظات التجريبية؛ لذا، فما يهم هو الدليل التجريبي المحتمل في حدود المعطيات التجريبية ذات الدلالة. وفقاً لهذه الرؤية فليس ثمة وجود فعلي للمكان المطلق عند نيوتن ولا نظيره الحديث المتمثل في التفسير الاسمي للنسبية العامة، ولا الجسيمات الافتراضية لنظرية مجال الكم^(١). فالموضوعات الفيزيائية، والنظم، والعمليات توجد حين يتفق المجتمع العلمي للفيزياء على وجود دليل تجريبي عليهم أو ما إذا كان ثمة طريقة لقياسهم، كما هو الحال في حالة بوزون هيجز. إضافة إلى ذلك، فإن القوانين التي تصف هذه الكيانات يمكن اعتبارها على الأقل حقيقية بشكل تجريبي.

من وجهة نظر أنصار الواقعية النقدية فإن السؤال التالي ربما لا يزال مطروحاً: هل يسوغ التشوش المتوسع لنظرية مجال الكم على الأقل الاعتقاد في السحب لكلمات المجال الافتراضي باعتبارها أجزاء منفصلة تقريبية للواقعية؟^(٢) هل ينتمي برنامج الخط الفائق^(*) للفيزياء بدلاً من الميتافيزيقا

(١) انظر على سبيل المثال: Earman 1989.

(٢) انظر الفقرتين (٦-٤-٣) و (٦-٦-٦).

(*) نظرية الأوتار الفائقة Superstring theory محاولة لشرح طبيعة الجسيمات الأولية والقوى الأساسية في الطبيعة ضمن نظرية واحدة عن طريق نمذجتهم جميعاً في إطار اهتزازات لأوتار فائقة التناظر شبيهة بالأوتار في نظرية الأوتار. وتتصب هذه =

حتى إذا ظلت خلواً من أي محتوى تجريبي محدد⁽¹⁾ إلا أن الحالات الغامضة من قبيل الكيانات المفترضة للمادة أو النظريات غير الناضجة لا تهز اعتقاد أنصار الواقعية النقدية في وجود المجال المغناطيسي، والموجات الكهرومغناطيسية، والذرات، والإلكترونات، والبروتونات، والفوتونات، والنيوترونات. وإذا ما طُرح الأمر للتساؤل، فربما يدافع معظم الفيزيائيين عن هذا الموقف. كما يميل أيضاً فلاسفة العلم الذين لديهم معرفة تفصيلية ببعض أجزاء الفيزياء إلى اعتناق هذا الموقف، أو أحد الموقفين الفرعيين الموصوفين فيما يلي. ميزة الواقعية النقدية أنها تتبنى جدياً موقف التجريبية فيما يتعلق بالاتجاه الشكي، إلا أنها تظل أيضاً منفتحة على نمو الخلفية المعرفية النظرية. يفصل العديد من فلاسفة العلم ما بين الافتراضات الواقعية النقدية حول الموضوعات الفيزيائية وقوانين الفيزياء. ومع أنهما وثيقا الصلة، فإنهما يتألفان من الموقفين الفرعيين التاليين للواقعية النقدية:

إن الواقعية النقدية اسم حديث للاعتقاد في أن قوانين الفيزياء التي تستمر في البقاء عقب الثورات العلمية هي صادقة بشكل تقريبي، أو أنها تتأخر بنى ثابتة في الطبيعة⁽²⁾. تُسلم الواقعية البنوية بأن الثورة العلمية قد

=النظرية على دراسة المشكلة الأهم في الفيزياء النظرية التي تكمن في مواعمة نظرية النسبية العامة، التي تصف الجاذبية وتطبق على البنى واسعة المجال (نجوم، مجرات، تجمعات فائقة) مع نظرية ميكانيكا الكم التي تصف القوى الأساسية الثلاث الأخرى. (المترجمان)

(1) Hedrich 2006.

(2) انظر Psillos 1999, 146-161، والمادة المقتبسة هناك وخاصة Worrall 1989. وبناء على أساس دراسات تاريخية لتغير النظرية في الفيزياء والكيمياء، تبني كارير =

تؤدي إلى اختفاء كيانات مُسلم بها من قبيل المكان المطلق، أو الأثير^(*)، أو اللاهوب Phlogiston^(**) من النقاش العلمي. وإذا ما أدت ثورة علمية إلى

Carrier 1991, 1993= موقفاً مماثلاً. فيحاج بأنه من المعقول الدفاع عن تأويل واقعي للبنى في الطبيعة، التي يتم فهمها من خلال مفاهيم العلم التجريبي وقوانينه. ولكن على نحو ما تُظهر حالة الفلوجيستون (اللاهوب) فإن هذه المفاهيم والقوانين قد تكون مرتبطة بافتراضات مضللة عن الأنواع الطبيعية الداعمة؛ لذا لا يعتقد الواقعيون البنيويون في الأنطولوجيا التي تقف وراء هذه المفاهيم والقوانين. فالافتراضات النظرية حول الإطار المرجعي قد تتغير على حين لا تُطيح الثورات العلمية بالخصائص التجريبية للأنواع الطبيعية. دافع بوانكاريه عن نسخة من الواقعية البنيوية؛ انظر: Worrall 1989; Huber 1999.

(*) وسط افتراضي يملأ كل الفراغ، افترضت الفيزياء الكلاسيكية وجوده، وكان افتراضه في الأصل لتوفير وسط لانتشار الضوء، ثم استُخدم بعد ذلك عندما عُرِف الضوء كمجال كهرومغناطيسي متذبذب لتوفير وسط ينتشر فيه هذا المجال. واختفى المصطلح كمفهوم علمي نتيجة لتجربة ميكلسون. (الترجمان)

(**) تُعد نظرية الفلوجيستون من أفضل الأمثلة على المفاهيم التي يتجاوزها العلم في تقدمه المستمر. والفلوجيستون كلمة إغريقية تعني النار أو الشعلة أو الاحتراق. والفلوجيستون شيء مُشترك بين كل العمليات الكيميائية من احتراق وتكلس واستخلاص الفلزات من خاماتها. ومقدار الفلوجيستون في بعض الأجسام قليل، وفي بعضها كثير، وهذه الأخيرة سريعة الاشتعال. قال بهذه النظرية الألمانيان يوشيم يوهان بيشر وتلميذه إرنست جورج شتال، وحتى العقد الثامن من القرن الثامن عشر كان الفلوجيستون أساس الكيمياء التي تُدرس بالجامعات، مانعاً إياها من التكميم الرياضي والامتثال للمثل التي تمكّنها من اللحاق بفيزياء نيوتن. حتى جاء أبو الكيمياء الحديثة لوران لافوازييه فأثبت بالتجربة أن الكبريت والفسفور إذا احترقا لا يقل وزنهما لأن الفلوجيستون خرج منهما، بل يزيد لأن مقداراً ضخماً من الهواء يثبت=

استبصار أن كيانات معينة لا وجود لها، فإن النظرية الناتجة لن تحتوي بعد ذلك على مصطلحات تشير إليها كما يصير المجتمع العلمي مقتنعاً بأن المصطلحات المناظرة في النظرية السابقة لا يمكن أن يكون لها أية دلالة. ولكن إذا ما حدث ذلك بشكل متكرر، فلن يكون بمقدورنا الثقة فيما تشير إليه مصطلحات نظرياتنا المقبولة حالياً. تُعد الواقعية البنائية إجابة عن هذا الصنف من التفكير الذي كان يُسمى الاستدلال (أو ما بعد الاستدلال) التشاؤمي^(١). ومن حيث النموذج الإرشادي، فإن هذه الإجابة تنطبق على نظريات الكم الحالية. إنها تتمتع بنسقية بحيث تبدو وكأنها ثوابت للطبيعة. وينبغي على متبني الواقعية البنائية أن يؤمن بها. إلا أن الطريقة التي تُشير بها دالة الموجة الميكانيكية الكمية لما وراء تفسير بورن الاحتمالي لا تزال غير واضحة تماماً كما كان في ثلاثينيات القرن العشرين. إن معادلات ماكسويل للديناميكا الكهربائية الكلاسيكية (التي تم الاحتفاظ بها في الديناميكا الكهربائية الكمية، وفي تكميم سرعة السير pace quantization) يُمكن التسليم بصدقها دون أي اعتقاد واقعية المكونات الفردية لتوسع فورير Fourier expansion لمجال كهرومغناطيسي. إن الواقعية البنائية أساساً موقف لمنظرين وفلاسفة علم لديهم خلفية فلسفية نظرية.

الواقعية العلية هي وجهة النظر التقليدية التي تؤمن بوجود أسباب غير قابلة للخضوع للملاحظة لآثار قابلة للخضوع للملاحظة. وقد نشأت الفيزياء

=أثناء الاحتراق. انظر: يمني طريف الخولي، فلسفة العلم في القرن العشرين، عالم المعرفة، ديسمبر ٢٠٠٠، ص ٨٨. (المترجمان)

(١) انظر: Laudan 1981; Psillos 1999, 32, 81, 101-108.

الحديثة عن هذه الوجهة من النظر. شرح نيوتن هذا الموقف في البرنكيبييا باعتباره القاعدة الأولى من قواعد التفكير، وتهدف الفيزياء بمقتضى هذه القاعدة إلى التوصل إلى "العلل الحقيقية" الضرورية والكافية للظواهر^(١).
يميل الكثير من الفيزيائيين للدفاع عن هذا النوع من الواقعية العلية - على الأقل، ما داموا لا يحفلون بأسس نظرية الكم^(٢). وعلاوة على كل ذلك، فإن التجارب ينبغي أن تتبنى بعضاً من الموقف البراجماتي للواقعية العلية. واليوم فإن من ينافح عن الواقعية العلية هم فلاسفة العلم الذين لديهم معرفة مفصلة بتجارب الفيزياء، وأدوات الملاحظة، والقوانين الظاهرية. وكمحاولة للتغلب على المشاكل الفلسفية للثورات العلمية، تُعد الواقعية العلية أمراً مكماً للواقعية البنوية. يعتقد أنصار الواقعية العلية بشكل نمطي أن الإلكترونات موجودة لأنها تصنع مسارات يمكن ملاحظتها في الغرفة الفقاعية^(٣) Cloud Chamber. كما قد يؤمنون بوجود الإلكترونات دون الزعم بحقيقة الديناميكا

(1) Newton 1687, 794.

يُفترض هنا أن العلاقة بين العلة والمعلول واقعية ويتم التعبير عنها من خلال نوع ما من العلاقة الضرورية بين العلة والمعلول. من الواضح أن هذا الافتراض القبلي أكثر قوة من وجهة النظر الاعتيادية التجريبية للعية. وسوف أعنى فيما يلي بالموقف الكانطي، إلا أن حجتي لا تعتمد على الافتراضات الفلسفية المحددة لكانط بشأن العلية.
(٢) ينشأ عن نظرية الكم العديد من الحُجج ضد الواقعية العلية؛ انظر الفقرات (٢-٥)، (٣-٥)، ومن (٣-٧) إلى (٦-٧).

(*) وعاء مملوء بسائل شفاف تم تسخينه إلى درجات حرارة عالية (عادة ما يكون الهيدروجين السائل)، يُستخدم في الكشف عن الجسيمات المشحونة كهربياً في حركتها عبر هذا السائل. اخترع الفيزيائي دونالد جلاس هذا الجهاز، ونال عن هذا الاختراع جائزة نوبل عام ١٩٦٠. (الترجمان)

الكهربية الكمية. وبدعم مثل هذا الاعتقاد حقيقة أن الإلكترونات في حلقة التخزين في مُعجل للجسيمات تخضع لقوانين الديناميكا الكهربائية الكلاسيكية بدلاً من نظرية الكم. وعلى نحو ما تُبدي ظاهرة الإشعاع السينكروتروني، فإنها تكون مُشعة على خلاف الإلكترونات داخل الذرة. هناك العديد من النُسخ من الواقعية العلية. وتأتي مواقف كارتررايت وهاكينج في مقدمتها. تُدافع كارتررايت عن واقعية عليّة يكون للطبيعة بمقتضاها قوى عليّة أو إمكانيات خاضعة للتحليل العلي. ويقترح تفسيرها لإمكانيات الطبيعة بالاعتقاد في الصدق (التقريبي) للقوانين الظاهرانية⁽¹⁾. يقترح هاكينج نسخة أقوى من الواقعية العلية من أجل الحصول على معيار كاف لوجود كيان ما. حيث يقرن الواقعية العلية بمتطلبات الاستخدام الناجح لكيان ما بوصفه أداة تكنولوجية. وفقاً لمعياره عن الواقعية، تكون الإلكترونات موجودة لأنه يمكن استخدامها بنجاح كأدوات تجريبية مع الآثار القابلة للملاحظة في تجربة التشتت. أو - وعلى نحو ما يقرر هاكينج - "إذا ما كان بإمكانك رشها، فإنها واقعية"⁽²⁾.

٣- التجريبية المعتدلة هي وجهة النظر التجريبية التحررية للفيزيائيين التي تذهب إلى أنه بالإضافة إلى الظواهر الخاضعة للملاحظة بشكل فوري، فإن كل القيم المقاسة للكميات الفيزيائية لها تلازم تجريبي في الواقع. أنا لا أعرف أي فيزيائي لن يدافع عن هذا الموقف. وفقاً لهذه الواجهة من النظر يكمن المحتوى التجريبي للنظريات في التنبؤات بقيم الكميات الفيزيائية من قبيل الموضع، والزمن، والكتلة، وكمية

(1) Cartwright 1983, 1989

(2) Hacking 1983, 23.٤-٢ انظر الفقرة

الحركة، والطاقة، والشحنة، ودرجة الحرارة... إلخ. وتُعتبر القيم المقاسة لهذه الكميات صادقة (بالنسبة إلى بعض الوحدات الثابتة للكمية محل النظر)، خاضعة لأخطاء القياس. ويُنظر إليها باعتبارها الخواص الفيزيائية للأشياء الطبيعية، إلا أن النظريات التي تنتمي إليها ليس بالضرورة اعتبارها صادقة، ويظل التساؤل حول ما وراء هذه الخصائص مفتوحًا. مرة أخرى فإن أفضل حجة للواقعية المعتدلة هي الإشارة إلى نظرية الكم. وإذا ما تحدثنا عن الإلكترونات، فإن نظرية الكم تخبرنا بضرورة ألا نعتبرها عوامل لقيم قاطعة من قبيل الموضع وكمية الحركة في الوقت نفسه. إضافة إلى ذلك فإننا لسنا ملزمين بالاعتقاد في الديناميكا الكهربية الكلاسيكية ولا في الديناميكا الكهربية الكمية. فكل ما يتعين عليها الاعتقاد فيه ووفقا للتجربة والقياسات هو أن الإلكترون كمية معينة من الشحنة، وأن ما يُدعى إلكترونًا ما هو إلا مجموعة من القيم المعينة للكتلة والشحنة التي تسير باستمرار جنبًا إلى جنب بالمعنى الذي نجده في الجواهر التجريبي لدى لوك^(*) (1). ويشغل هذا الموقف القلب من النظرية التجريبية للقياس، على نحو ما نمت في حدود نظرية النموذج لسوبس Suppes وزملائه⁽²⁾.

(*) جون لوك (1632-1704) فيلسوف إنجليزي يُعد رائد الاتجاه التجريبي، بتأكيده على أن الإنسان يولد وعقله صفحة بيضاء، وتأتي المعرفة عبر الخبرة وحدها وعن طريق الحواس. (المترجمان)

(1) Locke 1689, Book II, beginning of Chap. XXIII.

(2) انظر Suppes 1980; Krantz 1971، وانظر أيضًا Falkenburg 1997.

٤- التجريبية الصارمة هي وجهة النظر الملحمية التي تذهب إلى أن الواقعية التجريبية لا تكمن إلا في الظواهر التي يمكن أن تخضع للملاحظة والإدراك الحسي بالمعنى الضيق. ووفقاً لها يكمن المحتوى التجريبي للنظريات فيما يمكن ملاحظته بالمعنى الحرفي؛ بمعنى أن يكون في مجال يناظر معطيات حسية. والمجالات الفيزيائية التي تنتمي إلى الموضوعات القابلة للملاحظة وحدها حتى الآن هي ما يكون له تمثل مكاني-زمني. إن هذا الموقف وفقاً لماخ فقرة (١-١)، الذي قام فان فراسين بالدفاع عنه مؤخراً هو موقف ملحمي^(١). ومع ذلك فإنه غير خال من شوائب الميتافيزيقا. فالزعم أن - على سبيل المثال - النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات الحالية يمتلك بالفعل محتوى تجريبياً يستند فعلياً إلى ثقة شديدة في وحدة نظريات القياس المتتافرة الحالية لفيزياء الجسيمات^(٢). إن تمييز كارناب الأصلي بين مفاهيم الملاحظة ومفاهيم النظرية لم يكن حقاً له أية فائدة لهذه المشكلات^(٣).

٥- تعتنق البنائية الكثير من المواقف التي تتراوح ما بين المثالية الكانطية الجديدة لمدرسة ماربورج^(٤) ومدرسة إرلانجن^(٥) إلى وجهات النظر المؤسسة على علم الإدراك الحالي^(٦) والدراسات

(١) انظر van Fraassen 1980، وأيضاً الفقرة ٣-٦.

(٢) انظر الفصل الخامس.

(٣) انظر Carnap 1956. غالباً ما يتم فهم التمييز في يومنا هذا بالنسبة إلى نظرية

معينة، ولتكن كميات T النظرية لسنييد، انظر Sneed 1971 and Balzer et al. 1987.:

(٤) Cohen 1896; Natorp 1910.

(٥) Janich 1996; Butts and Brown 1989; Tetens 1987; Lorenzen 1974.

(٦) von Foerster 1981.

الثقافية؛ ونشأت عن تلك الأخيرة البنائية الاجتماعية^(١). وطالما أننا نتحرك في إطار فلسفة العلم، تلتزم المواقف البنائية بالنظرة الأرسطية للطبيعة، وبمقتضى هذه النظرة لا يكون ثمة نظائر في الطبيعة للظواهر التجريبية ولا النظريات التي تصف أسباب حدوثها؛ لأنها كلها نواتج للنشاط الإنساني. وبالنسبة إلى كل من البنائية والتجريبية الصارمة ينحصر ما هو واقعي فيما تتم ملاحظته مباشرة سواء كانت النجوم في السماء، أو الزهور في حديقتي، أو صورة الغرفة الفقاعية لمسارات الجسيمات. ومع ذلك نجد أن التجريبية البنائية على نقيض التجريبية الصارمة تعتقد فقط في نجوم السماء والزهور باعتبارها صادقة أو واقعية (أو طبيعية). فصورة الغرفة الفقاعية بالنسبة إلى أنصار التجريبية البنائية هي عمل صناعي تقني وليس جزءاً من الواقع التجريبي أو الطبيعة. من هنا فإن البنائية تتبنى المفهوم القديم للفيزياء (φυσικ). تمثل البنائية الموقف الأدنى من الطيف الذي لدينا في هذا السجال. إنها لا تسلم بأن النظريات الفيزيائية المؤسسة على التجربة يمكن أن نخبرنا بخبر عن الواقع أو عن العالم الذي نعيش فيه. ووفقاً للبنائية فإن النظريات الفيزيائية مجرد أدوات ولا تهدف الفيزياء إلا للتوصل للحيل التقنية.

(١) Latour and Woolgar 1979; Knorr-Cetina 1984; Pickering 1984.

تم مناقشة مواقف تيتينس ١٩٨٧ وبيكيرنج ١٩٨٤ في الفقرات ٢-١ و ٢-٢. تسيء هذه النماذج من البنيوية فهم تفسير العالم لأهداف العلم؛ انظر: Scheibe 1997a.

٣-١ الواقعي والفظي

باعتبار أن الواقع التجريبي تجسيد لأي شيء يكون موضوعًا للتجريب وبتأويل مصطلح "تجريبي" بطرق مختلفة، نحصل على الطيف السابق من المواقف. وأي من هذه المواقف يستلزم تفسيرًا آخر للمعرفة التجريبية يحدد ما نخبرنا به النظريات الفيزيائية المكتملة النضج عن الواقع، على حين يحدد بشكل عكسي الاعتقاد في أي مما نخبرنا به النظريات الفيزيائية الناضجة عن الواقع التفسير الخاص للمعرفة التجريبية. والآن كيف لنا أن نتخير من بين البدائل؟ ومن أجل الهروب من فخ الدوران، فإننا نحتاج معيارًا مستقلًا لما ينتمي إلى الواقعية التجريبية من وجهة نظر الفيزياء الحديثة: معيارًا للواقعية مستقلًا عن المواقف المذكورة أعلاه هنا وبنية المعرفة الفيزيائية هناك.

للأسف لا يُقَم السجل الحالي حول الواقعية العلمية معيارًا كهذا للواقعية. فكل مواقف الطيف السابق نكرها يدين إلى التفسير التجريبي للواقعية نفسه. تختلف المواقف بشكل أساسي في فهم ما هو تجريبي بشكل أكثر أو أقل تحررًا بشأن المعطيات المحملة بالنظرية، من خلال الاختلاف في التمييز بين ما هو تجريبي وما هو غير تجريبي. وعبر هذا السبيل، يبدو أنها تعتمد النظرة التجريبية للجوانب الميتافيزيقية. فوفقًا لتجريبية القرن العشرين، الميتافيزيقي هو ما ليس بتجريبي، على حين يُعد التجريبي وحده علميًا. تزعم التجريبية الشاملة أنه لا وجود للميتافيزيقا بين أفضل ما لدينا من مفاهيم علمية. تسعى الواقعية النقدية، والتجريبية المعتدلة، والتجريبية الصارمة إلى أن تجد لنفسها طريقًا بين هذه المتناقضات، زاعمة أن بعضًا من مفاهيم العلم التجريبي ميتافيزيقية وأن بعضها الآخر ليس كذلك. ونظرًا إلى أن ما هو غير تجريبي

فهو ميتافيزيقي وأن ما هو تجريبي موضع للخلاف، فإن السجال حول الواقعية العلمية يدور حول نفسه، مادام يتعامل مع التساؤل حول أي المفاهيم العلمية ينشأ عن المعرفة التجريبية في مقابل الميتافيزيقا.

إن الطريقة الوحيدة لكسر هذه الدائرة هي التخلي عن النظرة التجريبية للميتافيزيقا. فهذه النظرة غير ممكنة لسبب بسيط هو أنه من المستحيل أن تفصل بشكل كامل بين الأجزاء التجريبية وغير التجريبية في النظريات العلمية. ووفقاً لأطروحة دوهيم-كواين وما يتعلق بها من استبصار للبنية الكلية للعلم، فلا وجود لعلم تجريبي دون ميتافيزيقا⁽¹⁾. وتحتوي كل النظريات العلمية على عناصر ميتافيزيقية بشكل لا يمكن تفاديه؛ لذا فإن التفسير التجريبي للميتافيزيقا في مقابل العلم التجريبي هو على خلاف مع بنية النظريات الفيزيائية. (أكد هيجل منذ زمن بعيد أن التجريبية هي الميتافيزيقا اللاواعية⁽²⁾). والسؤال الحاسم هو إذن: ما القدر الذي لا يمكن الاستغناء عنه من الميتافيزيقا للفيزياء الحديثة، وما القدر الذي يمكن الاستغناء عنه، أو حتى أن يكون زائداً عن الحاجة؟ بعبارة أخرى، ما السمات التي تؤهل المعطيات الحسية للتجريبية الصارمة وأيضاً المعطيات التجريبية للفيزياء المحملة بالنظرية لتصبح معلومات عن الواقع؟

عند هذه النقطة تظهر الواقعية بمعنى العالم الخارجي المستقل. ويكون السجال حول الواقعية العلمية عما نعرفه حول الواقع وفقاً للعلم الحديث، مع

(1) Quine 1951.

(2) Hegel 1830, § 38.

كانت رؤيته العامة هو أن التجريبية العلمية نفسها، مثلها في ذلك مثل أي نظرية فلسفية، تستخدم المفاهيم غير التجريبية والمنطق.

التسليم بأن الواقع يوجد على هذا النحو. هل ثمة أي معيار أبنستمولوجي مستقل لما هو واقعي، لا يعتمد على بعض الخيارات التعسفية بشأن التساؤل حول ما قد تكون عليه المعرفة التجريبية؟

من الجلي أن "الواقعية" مفهوم ميتافيزيقي. وأي محاولة للتوصل لما هو واقعي، على النقيض مما هو مثالي، أو خيالي، أو غير موجود تواجهه المعضلة الميتافيزيقية التالية. فمن ناحية يُتصور أن ما هو واقعي مستقل عن الأنشطة البشرية. إلا أن الواقع المستقل بشكل مطلق هو غير متاح أبنستمولوجياً. ومن ناحية أخرى؛ فأياً ما كانت المصطلحات التي نتصور بها الواقعي، فليس ثمة إمكانية لتصوره بمعزل عن لغتنا، أو مخططاتنا الإدراكية، أو تقسيماتنا، أو أيا ما كانت الأفكار النظرية. فما من شيء يمكن أن يكون موضوعاً لتفكيرنا يمكن تصورها بمعزل عن أفكارنا. أثارت هذه المعضلة سجالات لا ينتهي بين الواقعية والمثالية بشكل عام، وهو بالفعل قديم قدم الفلسفة نفسها وليس ثمة إمكانية لعرضه هنا. ثمة نقطة واحدة واضحة: وهي أن المعضلة السابقة مشكلة أبنستمولوجية؛ لذا فمن الأفضل استبدال التساؤل حول ما نعرفه عن الواقعي باعتباره شيئاً مستقلاً عن كل المفاهيم والأنشطة البشرية بالتساؤل حول ماذا عساه أن يكون واقعياً. وما نعرفه يقيناً عن الواقعية هو أنها ليست تحت إمرتنا بشكل اعتباطي. والسبب الكافي لشيء ما ليكون واقعياً هو أن يكون حقيقة عمياء تُصاب على إثرها أحكامنا المسبقة وتوقعاتنا بالإحباط.

يقترّب هذا المعيار للواقعية الكافية من متطلبات بوبر بضرورة أن تكون النظريات التجريبية قابلة للتكذيب. إنها تنامية لمعيار هاكينج للواقعية: "إذا ما كان بإمكانك أن تنترها، فإنها موجودة" كما هو مذكور آنفاً؛ حيث

يتطلب الأخير وجود شيء ما يكون متوافقاً مع أفكارنا بدلاً من إحباطها. ومع ذلك فإنها أكثر عمومية. إنها منفصلة عن الواقعية النقدية والمواقف المتفرعة عنها، التي تنتمي إليها آراء هاكينج وبوبر. فعن طريق إحباط توقعاتنا، تبرهن الواقعية على وجودها، بشكل مستقل عن تفسيرنا للمعرفة التجريبية. فالحقائق العمياء ليست تماماً على نحو ما نبتغيها: وهذا يحدث في الحياة اليومية، وفي العلم عموماً، وفي الفيزياء. فحينما ذهبنا نقابل الواقع كما لو كان عاملاً مستقلاً لا يستجيب لإرادتنا. ولكن عادة ما لا يسلك هذا العامل المستقل بطريقة فوضوية تماماً. ففي الفيزياء توضع البنى الشبيهة بالقوانين لما يحدث فعلياً موضع البحث تحت ظروف تجريبية محددة جيداً.

تأخذ العديد من المفاهيم الفلسفية التقليدية للواقعية هذه القدرة على السلوك المستقل في اعتبارها. فقد يُصيب الواقع التجريبي توقعاتنا النظرية بالإحباط، ونتيجة لهذا الواقع فإنها قد تتسبب في ظهور المعرفة الموضوعية. وفقاً لكانط فإن الطبيعة هي الشاهد الذي يجيب بـ"نعم" أو "لا" عن الأسئلة التي تثيرها تجاربنا^(١). تبنى بيري - مؤسس البراجماتية - هذه النقطة، وإدجار ويند نصير الكانطية الجديدة الذي قام بصياغة نظرية براجماتية عن التجربة. ووفقاً لبيري وويند، فإن الطبيعة كيان ميتافيزيقي يترك بعضاً من نظرياتنا وتجاربنا للفشل، ويدع البعض الآخر ليصيب النجاح^(٢). إلا أن

(١) انظر: Kant 1787, B XIII.

(٢) انظر: Wind 1934 and Falkenburg 2001. تأثر ويند بالمذهب البراجماتي (العملي) لبيري والمذهب الواقعي الميتافيزيقي. سبق لويند افتراض أن العلم التجريبي ينبغي أن يتبنى معيار التناظر للصدق أيًا ما كانت نظرية الصدق التي قد يدافع عنها المرء من وجهة نظره الفلسفية في نهاية المطاف.

التقليد الذي يقف وراء هذا التفسير للواقعية أكثر قدامًا. فالنموذج الإرشادي للواقعية، أو للطبيعة، كعامل مستقل لديه قواه العلية الخاصة به هو المفهوم الأرسطي القديم للطاقة. ولا يزال المفهوم الفيزيائي الحديث للطاقة محتفظًا بجنور أصله اللغوي. وتُشير كوانتم الفعل عند بلانك إلى أنه في طبيعة مجال الكم لا يسلك كما هو متوقع منه في الفيزياء الكلاسيكية.

ومن أجل وضع هذه النقطة عن الواقعية في شكل أكثر دقة، فمن المفيد العودة إلى التمييز الذي قام به كل من لينينيتس وكانط بين الواقعية والفعلية. يكمن الواقعي في سمات وخصائص الأشياء qualia؛ على حين يكون الفعلي - متميزًا عن الممكن والضروري - مقولة شكلية^(١). تعلمنا فلسفة كانط أن أي خبرة تعتمد على مفاهيم أولية وقوالب للحدس. ووفقًا لأبستمولوجيا كانط، فإن الواقعية التجريبية هي من ناحية تخضع في بنيتها لمقولات^(*) ومبادئ العقل الخالص، بينما تتألف من ناحية أخرى من المعطيات الحسية. بحسب كانط فإن بنية الواقعية تُعرف عالمنا النظري، على حين تتألف الفعلية من السمات التجريبية الفعلية للشيء الذي ندركه. وبحسب كانط أيضًا فإن الواقعية

(١) انظر مقولات ومبادئ العقل الخالص عند "كانط" Kant 1781/87. إن المصطلح الإنجليزي (فعلي actual) يستبقي فكرة أن ثمة شيئًا ما في حالة الفعل، كما يعني المصطلح الألماني (wirklich).

(*) المقولات Categories بصفة عامة هي فئات أساسية في تصنيف معين. يستند تصنيف الأشياء إلى مقولات إلى إرث فلسفي يعود إلى أرسطو وهي عنده عشر (الجوهر والكم والكيف والإضافة...إلخ). وفي الفلسفة الحديثة قدم كانط تصنيفه للمقولات التي تنتظم وفقًا لها الإدراكات؛ وهي: الكم والكيف والإضافة والجهة، وكل منها تحتوي على ثلاث مقولات. (المترجمان)

التجريبية تتألف من كل من المكونين، الواقعي والفعلي. ويأتي الاثنان على هيئة خصائص ذاتية وكيفية للمعطيات الحسية. إنها تقع تحت مقولات الواقعي (بالأخص المفهوم الخالص للكلمة المكتف) والفعلي؛ فتسير وفقاً للمبدأ القبلي بأن الكميات المكتفة لها درجة. وأن هذه الدرجة - التي يدعوها كانط "واقع الإحساسات" - فعلية بحيث تكون بعدية مُعطاة من خلال المعطيات الحسية^(١).

ومن أجل تمييز مقولات الواقعي والفعلي تبنى كانط التقليد الخاص بمنطق وأبستمولوجيا لايبنتس^(٢). يُميز لايبنتس بين الإمكانية المنطقية والواقعية. وهنا تسير الإمكانية المنطقية وفقاً للمبدأ المنطقي للتناقض وتهتم بالاتساق، على حين تسير الإمكانية الواقعية وفقاً للمبدأ الميتافيزيقي الخاص بالعلة الكافية. بالنسبة إلى لايبنتس يكمن الواقعي في كل الاحتمالات الواقعية، أو كل العوالم الممكنة، على حين يكمن الفعلي في العالم الموجود فعلياً^(٣).

وفي الفلسفة الحديثة تم تجريد هذه التمييزات التقليدية بين الواقعية والفعلية من تضميناتها الميتافيزيقية كما تم إعادة إنتاج على النحو التالي:

(١) Kant 1787, B 207.

إضافة إلى ذلك يدعم تفسير "كانط" للواقعية الموضوعية شروط نظريته للزمان والمكان كأشكال للحس الخالص، وهو ما يتم إهماله هنا.

(٢) انظر على سبيل المثال: Poser 1981.

(٣) تهتم "الإمكانية الواقعية" عند لايبنتس بـ"إمكانية التشكيل" أو المواءمة المفاهيمية لكل الجواهر في العالم، المونادات أو موضوعات التنبؤ المونادي. يدعم العالم الفعلي مبدأ ميتافيزيقي إضافي للايبنتس، وهو مبدأ أنه الأفضل على الإطلاق. انظر: Leibniz

.1714; Poser 1981

الواقعية هي شيء ما شبيه بالفضاء المنطقي للسمات الذي يؤلف عالمنا النظري. وتكمن الفعلية في السمات العارضة للظواهر، على نحو ما يتم إدراكها من قبلنا في الخبرة الحسية أو يتم قياسها من قبل أدواتنا التجريبية في الفيزياء. إن مصطلح "عارض" حاسم. فالفعلي هو ما قد يكون بخلاف ذلك، وفقاً لعالمنا النظري ولمعرفتنا. وهنا يتم تبني التمييز الأبستمولوجي للإينتنس بين حقائق العقل وحقائق الواقع.

إن حقائق المنطق والرياضيات نواتج للعقل البشري (الذي ينسب إليه لاينتنس القدرة على امتلاك بصيرة تنفذ إلى البنية الموضوعية للعالم)، على حين تكون حقائق العلم التجريبي نواتج للوقائع وللطريقة التي ندركها بها. إن الفعلي بالنسبة إلينا أمر عارض بقدر ما لا يكون للعقل الإنساني البصيرة للنفاد إلى بنية العالم والقوى العلية للواقعية. تعمل الواقعية عملها فيما يتعلق بالمعرفة النظرية بشكل مستقل عن إرادتنا، إنها عارضة بالنسبة إلينا. فبالقدر الذي يمكننا به التنبؤ على أساس النظريات المنطقية والرياضية، فإنها تنتمي إلى معرفتنا حول العالم، وقد نجحنا في الحد من العرضية عن طريق إرساء روابط شبيهة بالقوانين بين الوقائع. وبقدر ما تكون تلك الروابط مؤسسة على المنطق والرياضيات، فسوف يعتبرها أي فرد بخلاف المدافعين عن التجريبية الصارمة أو البنيوية ضرورية.

من هنا فلكي نفهم ما يمكننا أن نعرفه عن الواقعية، يتعين أن نضع في اعتبارنا تمييزين: (أ) التمييز الشكلي بين الواقعي والفعلي، و(ب) التمييز الأبستمولوجي للضروري والعارض. يُمثل الواقعي عالمنا العقلي، فضاء منطقياً من الخصائص والروابط النظرية التي تسمح بالكثير من العوالم

الممكنة. أما الفعلي فهو الكيان المستقل المدعو "واقعية"، أو "العالم الخارجي"، أو "الطبيعة" التي ننشد فهمها من خلال مفاهيمنا. وعنها تنشأ حوادث أحياناً ما لا تتواءم مع توقعاتنا النظرية. والسمة الكافية (وإن كانت غير ضرورية) للفعلي هي الحوادث العارضة من قبيل ما لا يمكننا استباقه أو التنبؤ به. من هنا فأياً حقيقة تكون عارضة (أو متى ما كانت عارضة حين لا يمكننا التنبؤ بها)، تنتمي إلى العالم الفعلي، وأياً ما كانت المفاهيم النظرية، والبنى، أو التفسيرات العلية التي نجدها من أجل التنبؤ بالوقائع والحد من عرضيتها فإنها مرشحة جيداً لتوصيفات كافية للعالم الفعلي. وعند هذه النقطة، قد يثور العديد من الأسئلة في السجال بشأن الواقعية العلمية. إنها تهتم بتعزيز نظرياتنا والعلاقة بين الصدق Truth والتأكيد المضمون. وقد نترك هنا هذه الأسئلة مفتوحة؛ لأنها لا تخص المعيار الأبيستولوجي بأن العارض، أو ما كان ذات يوم عارضاً، سمة للعالم الفعلي، أو حالة ماضية له؛ وذلك على التوالي. إننا قد نخدع أنفسنا بشأن ما نعتبره ضرورياً أو شبيهاً بالقانون. إلا أننا لا يمكن أن نكون مخطئين بشأن توقعاتنا حين يتم تنفيذها أو تعزيزها.

إن جزءاً من الفعلي أن السماء تكون صافية في بعض الأيام وملبدة بالغيوم في أيام أخرى، وأن قياسات ميليكان لقطرات الزيت نتج عنها نسبة للكتلة والشحنة هي (بوحدة الكهرواساتاتيكية) بقيمة $1,761,011 \text{ As/kg}$. وأي حقيقة تجريبية خلاف ذلك قد تقايننا تنتمي إلى السمات العارضة للواقعية التجريبية للعالم الفعلي. وفي خبرة الحياة اليومية يشترك كل المتحدثين باللغة العادية في معرفة حقائق من هذا القبيل. وفي الفيزياء، يتم إدراك الفعلي في حدود الأحداث، والظواهر الكيفية الملاحظة، ومؤشرات

أجهزة القياس، والبيانات المسجلة، والقياسات العددية؛ لذا لا يختلف العالم العقلي للخبرة اليومية عنه للفيزياء من حيث المبدأ، حتى إن تم التعبير عن الأول باللغة العادية وعن الثاني بالكميات الرياضية والفيزيائية. فكلا العالمين يتشاركان في تبني خصائص كيفية وشكلية. إنهما مؤلفان من فضاء منطقي من الخصائص (التي تكون لها بنية جبرية في الفيزياء) زائد القيم العارضة لهذه الخواص التي يمكن أن ننسبها إلى أشياء أو أحداث أو مواضع زمكانية^(*) spatio-temporal.

المشكلة الأبستمولوجية الأساسية بشأن العلم الفيزيائي هي أن ثمة العديد من العوالم العقلية المتداخلة. فهناك العديد من النظريات الكلاسيكية والكمية، والنظريات النسبية وغير النسبية وراء ما ندعوه الخلفية النظرية المعرفية، إنها في الواقع طيف من الموضوعات النظرية التي تؤلف الخلفية المعرفية المقبولة للعلم عموماً وللفيزياء. ليس ثمة نظرية موحدة؛ فالعلم تعددي والخلفية المعرفية التي توفرها الفيزياء الحالية غير متجانسة إلى حد بعيد، وفي تحليل المعطيات الخاصة بأي تجربة معاصرة في الفيزياء يتم استخدام الكثير من النظريات والقوانين والنماذج؛ ومع ذلك فإن كل حقيقة لا تجد لنفسها تفسيراً كاملاً في إطار هذه الخلفية المعرفية النظرية تنتمي إلى

(*) الزمكان Space-time: يُشير هذا المصطلح إلى اتحاد المكان والزمان في منظومة واحدة تُدرك كوحدة أولية، وتُمثل رياضياً بمكان مجرد، رباعي الأبعاد. وهناك طرق عديدة لإدخال إحداثيات في هذا المكان المُجرد، يفرض كل منها بنية خاصة للمكان والزمان يمكن التحقق من صحتها إمبيريقياً عن طريق شخص يضطلع بالرصد في منطقته المجاورة. (المترجمان)

السمات العارضة للواقع التجريبي. تُعد فكرة الحادثة Event أقرب ما يكون إلى معيار الحدوث العارض وعدم تحقيق توقعاتنا. والحادثة هي شيء يحدث موضوعياً بطريقة تسمى اختلافاً يمكن ملاحظته من بينته: التماع الضوء، ضغطة على عداد جيجر^(*)، نقطة على سطح فوتوغرافي. إن مفاهيم الظواهر الفيزيائية، والمعطيات، والمؤشرات، ونتائج القياسات أكثر تعقيداً: إنها تعتمد على الخلفية النظرية المعرفية. والخبراء وحدهم يعرفون أن التجارب تكون لها دلالة أستمولوجية بالنسبة إلى الأخيرة كأجزاء مكونة للفعل. فالأولى غير مهيكلة، إنها ببساطة تخضع للملاحظة. والطريقة التي تقوم بها تلك الحوادث غير المهيكلة بإحداث الخلفية النظرية المعرفية، والتي ينتج عنها بدورها مفاهيم الظواهر الفيزيائية، والنماذج، وإنتاج أجهزة القياس، وتسجيل المعطيات، وقراءة المؤشرات، ونتائج القياسات؛ هي في غاية التعقيد. فيتغير الخط الفاصل بين الحقائق العارضة والخلفية النظرية المعرفية حينما تكون نظرية ما أو نموذج ما مقبولاً ولكن لا يزال مطروحاً للتقيح. بالنسبة إلى أي أحداث، ومفاهيم، ونظريات القياس لفيزياء الجسيمات للسوف يتم بحثها في الفصول المقبلة من هذا الكتاب.

إن أحداث ومعطيات وظواهر ونتائج قياسات الفيزياء حقائق بالقدر الذي لا تكون فيه طريقة استنباطها مشتقة من النظريات أو العناصر الاصطلاحية في النظريات التي قد يتم اختيارها تعسفياً. وسواء كانت هذه

(*) أنبوبة بها غاز وداخلها مصعد (أنود) على شكل سلك دقيق يُحيط به مهبط (كاتود) ويُستخدم لعد الإشعاعات النووية المؤينة، ويُنسب هذا الجهاز إلى الفيزيائي الألماني "جيجر" (١٨٨٢-١٩٤٥). (المترجمان)

الأحداث... إلخ، تحدث أم لا، وأيًا ما كانت سماتها العارضة، فربما أمكن للنظرية أن تنتبأ بها، ولكن مثلها مثل كتلة صماء من الوقائع فإنها لا تكون تحت إمرتنا؛ فالحقائق العارضة فجوات في الخريطة النظرية لعالمنا العقلي، يجب ملؤها بالملاحظة، والقياس والتجريب، وكما ذكر "فان فراسن" من خلال قياس "ميليكان" لـ e/m ⁽¹⁾. إن هذه الحالة في صالح التجربة - وضد أي نسخة أصولية من البنائية، يكون الواقع التجريبي للعلم وفقاً لها ليس سوى بناء نظري. ولكن التجربة الصارمة تؤكد بشكل ضعيف جداً بنية الواقع التجريبي. إنها لا تمكننا من حساب الظواهر العارضة أو المعطيات بوصفها تجريبية إذا ما اعتمدت بشكل جوهري على الخلفية النظرية المعرفية للفيزياء. (ولنأخذ على سبيل المثال، كتلة جسيم غير مستقر فيما دون الذرة تم قياسه عبر عرض الرنين الذي يظهر في تجربة للتشتت لفيزياء الطاقة العالية؛ هي دون شك عارضة)؛ لذا تعجز التجربة الصارمة عن الالتقاء بالكثير من محتويات الفيزياء الحديثة.

ولهذا السبب فإن ثمة مخرجاً برجماتياً للمعضلة السابقة تكون فيه الواقعية إما مستقلة ولكن غير متاحة أبستمولوجياً، أو معروفة من قبلنا ولكن مستقلة عن طريقة إدراكنا لها. ويمكننا الهرب من ذلك بمساعدة المعيار الأبستمولوجي القائل: إن الفعلي هو في حالات كثيرة عارض بالنسبة إلينا. إن ما يمكن أن يحدث بطريقة تخالف ما اعتدنا عليه يمثل السمة المميزة للواقعية التجريبية التي نسعى خلفها. قد تضع الطبيعة حدوداً على تطبيق

(1) "[...] تظهر التجربة أنه ما لم يكتب عدد معين في الفراغ (أو عدد في مدى معين)

فإن النظرية ستصبح غير كافية تجريبياً" van Fraassen 1987, 119-120.

نظرياتنا، وهذه الحدود مستقلة عن قدراتنا الإدراكية وأيضاً عن عوالمنا العقلية النظرية؛ فالعارض هو ما يخرج عن سيطرة النظرية، تتكون الواقعية التجريبية من الأحداث، والمعطيات، والظواهر، وما إلى ذلك مما هو مُعطى حتى الآن باعتباره عارضاً. إنها تجريبية بالقدر الذي يمكن أن تكون به (أو كانت به) خلاف ذلك، مقارنة بحالة المعرفة في الحاضر (أو الماضي).

وبهذه الطريقة نحصل على نسخة من الواقعية تكون مؤسسة على تميزات شكلية. بإمكاننا أن ندعوها الواقعية الشكلية، إلا أنها لن تختلط بالواقعية الشكلية بمعناها لدى فان فراسن؛ الموقف الواقعي الوحيد المُعترف به في إطار تجريبته البنوية. وبالنسبة إليه تعني "الواقعية الشكلية" النظرة الشكية القائلة: إن الطبيعة وراء الظواهر التجريبية- قد تكون مجرد الأجزاء غير التجريبية من مقترح لنظرية مقبولة⁽¹⁾. إنه يرسم الخط الفاصل بين البنية الفوقية التجريبية والأجزاء غير التجريبية لنظرية ما بمعنى تجريبي ضيق ويقوم بتطبيق المقولة الشكلية بشأن الممكن على ما هو غير تجريبي. على النقيض من آرائه، أدافع أنا عن واقعية ترسم الخط الفاصل بين الأجزاء التجريبية وغير التجريبية لنظرية ما في حدود العارض (أي الأحداث ونتائج القياسات)، والضروري (أي القوانين التي تضع مُحددات نظرية على المعطيات). وهنا تُعد العرضية معياراً أبستمولوجياً كافياً للفعلية، على حين تأتي الضرورة إلى المشهد مرتدية عباءة الفيزياء الرياضية.

(1) انظر: Van Fraassen 1991, 4: "حين نأتي إلى نظرية معينة، فإن التساؤل: "على أي نحو يمكن أن يكون العالم وفقاً لهذه النظرية؟" يهتم بالمحتوى وحده.

إن كلا المفهومين أبستمولوجي، والخط الفاصل بين العرضي والضروري هو أيضاً كذلك، وفي الواقع فإن التمييز نسبي ويعتمد على الخلفية المعرفية النظرية. ونظراً إلى تساؤل مساحة العرضي بسبب النظريات المقبولة، فإن الخط الفاصل بين العارض والضروري يتعرض للتغير بمرور الزمن بطريقتين. فمن ناحية تتبأ صياغة النظرية بالأحداث. وفي هذه الحالة يُصبح حدوثها أشبه بقانون؛ أي أنها تكون ضرورية بالنسبة إلى معرفتنا، إن قانون نيوتن للجاذبية والشروط المُقيدة له داخل المجموعة الشمسية يُمكننا من التنبؤ بكسوف الشمس المقبل بدرجة عالية من الدقة. ما من أحد يعرف ذلك سوف يدعو هذا الحدث بالعرضي، ولكنه سوف يكون على النقيض، بالنسبة إلى مَنْ عاشوا قبل بزوغ فجر العلم القديم على سبيل المثال، فكانت مشاعرهم يغمرها الرهبة تجاه هذا النوع من الأحداث؛ من ناحية أخرى تدخل الخلفية النظرية المعرفية تحليل المعطيات في الفيزياء؛ ونتج عن ذلك ظهور الظواهر المحملة بالنظرية والمعطيات التي تبدو عرضية بالنسبة إلى الفيزيائي، على حين سوف يعتبرها أنصار البنائية الاجتماعية بُنى نظرية.

إن التمييز بين العارض والضروري، ومعه نمط الواقعية الشكلية المقترح هنا، لا يمكن رده أبستمولوجياً. مقارنة بالمواقف المعروضة آنفاً في الفقرة (١-٢)، فإنها قريبة من الواقعية النقدية وأيضاً من التجريبية المعتدلة. وفي الواقع فإنه موقف كانطي، أو نسخة من الواقعية التجريبية بالمعنى الكانطي^(١). وفقاً لهذه النظرة فإن أي ظواهر عارضة، ونتائج قياسات،

(١) ينتج عن ذلك أن جميع الخصائص الفيزيائية والأشياء والأنساق والعمليات تعتبر مُنتمة لعالم الظواهر وليس لعالم النومينا بالمعنى الكانطي. نجد موقفاً مُتعلقاً بذلك =

ومعطيات تجريبية، وقوانين فينومينولوجية للفيزياء تُعتبر جزءًا من العالم التجريبي. إضافة إلى ذلك، فإن البنى النظرية من قبيل التماثلات التي تُشتق مباشرة (خطوة الخلفية المعرفية الآمنة) من الظواهر أو المعطيات يُمكن اعتبارها تحوز شيئاً من البنية في الواقع. إنه رهان آمن أن تعتمد عليها حتى إذا ما ارتاب المرء في صدق القوانين الأساسية في الفيزياء⁽¹⁾. إن أجزاء الواقع التجريبي التي تتعامل معها نظريات وتجارب الفيزياء قد يصح تسميتها حينئذٍ واقعية فيزيائية.

ماذا يُفسر بالضبط الواقع التجريبي بالمعنى الشكلي المقترح هنا؛ أعني أنه بالنسبة إلى العالم الفعلي الذي يحتوي على تاريخه وإمكانياته المتأصلة، فينبغي فحصه بشكل أكثر قرباً في الحالات المبحوثة. إن الأشياء تصبح معقدة أكثر فأكثر بسبب الرد النظري للعرضية المذكور سابقاً. ووفقاً للمعيار السابق فإمكاننا تفسير كل حقيقة كانت يوماً ما عارضة في نطاق الواقع التجريبي، حتى إن كان ثمة إمكانية فيما بعد لأن نكون قادرين على الاستدلال عليها من النظرية؛ لذا فمن أجل أن نتوصل إلى المحتوى العارض لنظرية ما فإنه يلزم دراسة عملية صياغة النظرية وليس النظرية الكاملة بعد أن تم قبولها. ومن أجل التوصل إلى ما تقوله نظرية ما عن العالم الفعلي، فإنه يلزم دراسة قاعدة الملاحظات الأساسية التي تقف عليها والطريقة التي

في الواقعية الداخلية لبتنام؛ انظر: Putnam 1980, 1990. ومع ذلك لم يكن من المفيد لأغراض فلسفة الفيزياء أن نضع مفهوم الصدق موضع التساؤل، على نحو ما فعل بتنام.

(1) انظر: Cartwright 1983.

تحولت بها إلى خلفية معرفية آمنة. من الممل دراسة تلك التفاصيل. وسوف نعرض في الفصل الثالث خطوة بخطوة أي أنماط المعطيات العارضة يكمن في قلب فيزياء الجسيمات التجريبية.

١-٤ الواقعية ونظرية الكم

إنها لحقيقة عمياء أن الأحداث العارضة ونتائج القياسات لفيزياء ما دون الذرة غير متوافقة مع بنية الفيزياء الكلاسيكية. من هنا، ووفقاً لمعيار الواقعية الأبستمولوجية المذكور آنفاً، فإننا ندرك دون شك أن (١) يوجد موضوع لدراسة فيزياء ما دون الذرة، و(٢) إنه لا يتمتع ببنية كلاسيكية. تتفق نظرية الكم والنتائج التجريبية العارضة كما أنها غير متوافقة مع بنية الفيزياء الكلاسيكية أيضاً^(١).

إن آراء بلانك وأينشتين تظهر مع ذلك أن الواقعية العلمية انبثقت عن ميتافيزيقاً وثيقة الصلة بالافتراضات الكلاسيكية حول الموضوعات الفيزيائية^(٢). إنها واقعية للموضوعات التي لها خصائص زمكانية وعالية معرفة جيداً، ولا يمكن نسبة هذه الخصائص إلى حالات الكم لجسيمات ما دون الذرة، دعونا ندعو هذا النوع من الواقعية الواقعية الكلاسيكية. دافع

(١) تعني "نظرية الكم" هنا ميكانيكا الكم النسبوية وغير النسبوية، والكهروديناميكا الكمية وأي نظرية مجال كم. (مع استبعاد نظرية الكم القديمة، فهي تركز على محاولة إنقاذ ما يمكن إنقاذه من الفيزياء الكلاسيكية والواقعية الكلاسيكية قدر الإمكان).

(2) Planck 1908; Einstein 1936, 1949; Scheibe 2001, 142-155.

أينشتين عن هذه الواقعية في سجاله الشهير مع بور في مقابل رؤية بور التنامية^(*) للظواهر الكمية^(١).

من اليسير أن نَظْهر أن ظواهر الكم ليست على خلاف مع الواقعية الكلاسيكية؛ إذ تُظهر القياسات الكمية أن جسيمات ما دون الذرة ليس لها مسار بالمعنى الكلاسيكي. فسيرها في صورة الغرفة الفقاعية يرجع إلى قياسات مواضع متتالية إلا أن نظرية الكم لا تخول لنا أن نربطها بمسار متصل^(٢)؛ فالقيم الخاصة بالموضع وكمية الحركة لا يُمكن قياسها معًا بطريقة تؤدي إلى قيم محددة. إنها تتدرج تحت علاقة عدم التعيين لهايزنبرج. ووفقًا لها فإن سلوك الجسيمات دون الذرية لا يمكن تحديده بشكل كامل. فتُصَف نظرية الكم فضاءها المنطقي من الخصائص في فراغ هيلبرت^(**). إنها تمتد

(*) مبدأ التتام Principle of Complementarity: مبدأ يربط بين صيغتين، بحيث يُمكن أن تُوصف ظاهرة فيزيائية بدلالة إحداهما أو بالأخرى، وهو أحد أعمدة ميكانيكا الكم، وعلى أرض الواقع كان يُشير إلى المعرفة المكتسبة باستخدام وسيلتين تجريبيتين مختلفتين؛ مثال ذلك: إذا سببت بلورة سليكون حيودًا لنيوترون، فإنه يجب علينا عندئذ - طبقًا لنظرية بور- أن نتحدث عن النيوترون بوصفه موجة، بينما نجد أن الكشف عنه بواسطة عداد يُجبرنا على أن نُفسره كجسيم. يوضح منطق الكم أن تعددية التمثيل هذه لا تفرضها علينا الأجهزة الخارجية، لكنها في حقيقة الأمر أصيلة ومتضمنة في عالم الكم، حتى لو ظلت غير ملاحظة. (المترجمان).

(1) Bohr 1928; Bohr 1949.

(٢) انظر الفقرة (٣-٥). التغير المقابل في معنى مفهوم الجسيم تتم مناقشته في الباب السادس. (***) مفهوم رياضي يقوم بهجران السطح الإقليدي ذي البُعدين، والفراغ ذي الأبعاد الثلاثة إلى فراغات لها أي عدد محدود أو غير محدود من الأبعاد. يُنسب إلى دافيد هيلبرت D. Hilbert (١٨٦٢-١٩٤٣). (المترجمان).

لحوالي نصف الخصائص الزمكانية والديناميكية للجسيمات الكلاسيكية. وحالة الكم في فراغ هيلبرت يمكن أيضاً تحديد موضعها بدقة أو كمية حركتها بدقة، ولكن ليس الاثنان معاً. ينطبق الأمر نفسه بالنسبة إلى كل زوج مما يُمكن ملاحظته أو عوامل فراغ هيلبرت.

من وجهة نظر نظرية الكم، فإن الجوانب العلية للواقعية النقدية المعروضة آنفاً تُصبح مثيرة للمشاكل إلى حدٍ بعيد. وعبارة حالة القياسات القابلة للإعادة تحديداً، لا تسمح نظرية الكم للمرء أن يعزو عللاً ديناميكية لأحداث فردية. وفيما يتعلق بالواقعية العلية، فإن نظرية الكم تُجئنا إلى التخلي عن العلل الفردية^(١). إضافة إلى ذلك، فإن قوانين الحفظ لنظرية الكم تؤدي إلى التنبؤ بعلاقات شبيهة بالقانون غير العلي بين الأحداث الفردية، أعني تلازمات (أينشتين - بودولسكي - روزن) EPR. إن هذه التلازمات غير موضعية. ومن وجهة نظر أينشتين لشرط العلية (وفقاً له فإنه لا يمكن نقل أية إشارة من خلال مسافات شبيهة بالفضاء)، إنها غير عليّة كما أنها غير متوافقة مع عدم مساواة بيل^(٢) Bell. وفيما يتعلق بالواقعية البنائية فإن نظرية الكم تُجئنا إلى البنى غير الموضعية.

(١) لقد اقترح "كاسيرر" عام ١٩٣٧ أنه في نظرية الكم يمكن الحفاظ على العلية فقط على مستوى معادلة "شرودنجر"، أي على مستوى المجموعة الإحصائية. انظر أيضاً الفصل السابع، وخاصة الفقرة (٧-٦).

(2) Einstein et al. 1935; Bell 1964; Aspect et al. 1982.

لُوحظ وجود تلازمات (أينشتين - بودولسكي - روزن) EPR في التجارب التي أُجريت مؤخراً على مسافة ١٢ كم.

تُعد نظرية الكم أقل إزعاجًا للتجريبية الصارمة منها بالنسبة إلى الواقعية الكلاسيكية. فإذا لم يتساعل المرء بشأن العلل غير القابلة للملاحظة لظواهر الكم وأيضًا بشأن مجال الكم فيما وراء البنية التحتية التجريبية، فلن تكون ثمة مشكلة على الإطلاق فيما يتعلق بتأويل نظرية الكم. وفي الواقع فإن السمات غير الموضوعية لنظرية الكم تنتمي إلى بنيتها التحتية التجريبية. ومن وجهة نظر التجريبي، فليس ثمة حاجة لاستعادة تفسير كلاسيكي للواقعية من أجل فهم أفضل لظواهر الكم. إذ تأتي التجريبية الصارمة جنبًا إلى جنب مع تفسير أداتي لوظيفة الموجة الميكانيكية الكمية، والتي يتم فهمها فقط باعتبارها أداة مفيدة للتفسير والتنبؤ بما ينجم عن القياسات.

حينما قدم بورن مخططة التمهيدي لتفسير المعيار الاحتمالي لميكانيكا الكم، في أولى رسائله المشهورة بشأن ميكانيكا الكم للتصادم، كان قد تساعل بالفعل عما إذا كان مجال الكم يعرض لـ"تناغم مؤسس قبليًا"، ووفقًا لذلك فإنها ليست بأي حال ناتجًا للمصادفة أن تتفق نظرية وتجربة مع الافتقار للظروف العلية لعملية كمية فردية⁽¹⁾. من الجلي أنه في معرض هذا التساؤل لم يدافع عن التجريبية ولكنه لفت انتباهنا إلى قضية أن نظرية الكم يُمكن اعتبارها حنطة مطحن التجريبي. وفي الواقع فإنه من وجهة نظر التجريبي فإن السجال بأسره حول تأويلات نظرية الكم أمر غير ضروري لأنه يتعامل مع الأسئلة نفسها حول ماذا يحدث في مجال الكم فيما وراء الظواهر التجريبية؛ لذا فإن التجريبية الصارمة ببساطة تتجنب المشاكل الفلسفية لنظرية الكم التي ظلت موضوع السجال بين بور وأينشتين لعقدين من

(1) Born 1926a, 806.

الزمان⁽¹⁾. بعبارة أخرى؛ لا سبيل للتجريبية الصارمة للدخول في المشاكل التأويلية لنظرية الكم؛ إذ لا تظهر هذه المشكلات إلا في حالة وجود تفسير أقوى أو أكثر تعقيداً للواقعية الفيزيائية.

إن تفسير الواقعية، الذي بمقتضاه تتعارض نظرية الكم مع الواقعية، هو الواقعية الكلاسيكية؛ إنها تنبثق عن وجهة النظر الكلاسيكية للميكانيكا والديناميكا الكهربائية. لقد تطورت نظريات الفيزياء الكلاسيكية في إطار روح الميتافيزيقا العقلانية. والواقعية الفيزيائية وفقاً لهذه الأخيرة هي مُحددة بشكل كلي. وعلى هذا الأساس كان أينشتين مقتنعاً بأن الوصف الميكانيكي الكمي للواقعية الفيزيائية غير كامل⁽²⁾. تعتق الواقعية الكلاسيكية افتراضات أكثر دقة حول بنية الواقعية الفيزيائية من التمييز بين السمات الكيفية والشكلية للواقع التجريبي الذي اقترحته في الفقرة السابقة (أعني التمييز بين الواقعي والفعلي). إنه يربط على وجه الخصوص بين افتراضات بشأن العالم العقلي النظري للفيزياء وخصائص النظم الفيزيائية بافتراضين ميتافيزيقيين قبايين راسخين في الميتافيزيقا العقلانية. الأول هو مبدأ أن الأشياء الفيزيائية هي جواهر. والجوهر بالمعنى الذي قدمه ديكارت أو لايبنتس هو شيء في ذاته،

(1) لا شك في أن "فان فراسين" كان واعياً جيداً بهذه الحقيقة. فهو يرى تفسيره الشكلي لنظرية الكم كفهم ممكن للنظرية التي لا يُمكن إخضاعها بثتى الوسائل؛ انظر: Van Fraassen 1991, 9.

"على أن المتطلبات التفسيرية للسؤال: ماذا يحدث بالفعل (طبقاً لهذه النظرية)؟ أو حتى السؤال الأكثر اعتدالاً: كيف يمكن أن يكون العالم وفقاً لما تقررته هذه النظرية؟ لن تختفي إذا ما قُدر للعلم أن يساعدنا لتأسيس ومراجعة صورتنا للعالم".

(2) 1982 Einestien et al. 1935; Einestien 1949.

يُمكن شرحه على النحو التالي: إنه مستقل عن بقية العالم، إنه حامل للخصائص الأولية، ويُمكن تعريفه من خلال ما يُسند إليه من موناتات^(١). (بحسب ديكرات فإن الجواهر الفيزيائي، أو المادة مؤلفة من مكونات مادية جسمية. ووفقاً له فإن خصائصها الأولية هي الامتداد، والدوام، والحركة. وأضاف نيوتن إلى هذه القائمة السمات الديناميكية من صلابة وقصور الكتلة). والافتراض الميتافيزيقي المسبق الثاني هو افتراض أن كل الأحداث والعمليات الفيزيائية تُحددها قوانين الطبيعة بشكل كلي، بالتوافق مع مبدأ العلية.

طالما تعرضت هذه الافتراضات الميتافيزيقية السابقة للنقد من قبل التجريبيين. فانتقد لوك المفهوم غير التجريبي للجواهر^(١)، وانتقد هيوم مبدأ العلية. وفي معالجته لهذا النقد فهم كانط كلا المبدئين كشرط قبلية لإمكانية الخبرة لدينا. وبحسب كانط، فإن الواقعية التجريبية، أو الطبيعة هي رابطة شبيهة بالقانون لكل الظواهر التجريبية. إن نظريته في الطبيعة تحذو حذو بنية ميكانيكا نيوتن^(٢). ففي نظريته حول الطبيعة، يؤدي قانون بقاء الجواهر ومبدأ العلية دوراً حاسماً. ففي كتابه الأسس الميتافيزيقية للعلم الطبيعي يتصل هذان القانونان لمفاهيم الكتلة والقوة في ميكانيكا نيوتن. في مرحلة لاحقة

(*) الموناتات Monads في ميتافيزيقا لايبنتس هي الوحدات الأساسية للواقع. وتصور الموناتات كمراكز نفسية ليس بينها علاقات عليّة، غير أن كل واحدة منها تعكس الواقع كله. (المترجمان)

(١) ... والذي يتميز بغموض معنى حامل للخصائص لا يتمتع بأي خصائص، وذلك على خلاف مفهومه للجواهر التجريبي؛ انظر: Locke 1689, Book II, beginning of Chap. XXIII

(2) Friedman 1992; Falkenburg 2000.

سيتحلى ماخ بروح لوك وهيوم في انتقاده لمفاهيم نيوتن للكتلة والقوة من وجهة نظر تجريبية.

إن مبادئ الجواهر والعلية هي بواقي للميتافيزيقا العقلانية. لقد دخلا الفيزياء الكلاسيكية فيما يتعلق بالموضوعات الفيزيائية والقوانين الحتمية. ففي ميكانيكا النقاط الكلاسيكية نجد أنهما يأتیان في سياق النقط الكتلية ومساراتها. وفي الديناميكا الكهربية الكلاسيكية، فإنهما يأتیان في إطار نقاط الزمكان كحوامل لقوى المجال الكهربى والمغناطيسى، وفي إطار الإمكانيات ذات الصلة التي تُعد في العرف المدرسي "فيزياء" (حيث يتم نبذ استخدام الإمكانيات المتطورة "غير الفيزيائية" وفقاً لمبدأ العلية^(١)). فنقاط الكتلة هي حوامل للخصائص الفيزيائية من قبيل الكتلة، وكمية الحركة، والطاقة والشحنة. وتصلح قوانين البقاء بالنسبة إلى هذه الخصائص^(٢).

إن كتلة نقطية مشحونة تشترك مع الجواهر بالمعنى التقليدي في الخصائص التالية إنها تُعد شيئاً في حد ذاته له وجود مستقل وتحمل خصائصها الفيزيائية في استقلالية عن باقي العالم، وفقاً لقانون القصور

(١) إن استخدام الإمكانيات المتقدمة في الواقع أمر خلافي؛ فقد تم استحداثها في نظرية الكم للإشعاع عن طريق ويلر Wheeler و فينمان Feynman ١٩٤٥. يقترح كرامر Cramer ١٩٨٦ تفسيراً تفاعلياً كمياً transactional لنظرية الكم على هذه الخطوط.

(٢) في الميكانيكا غير النسبوية ينقسم مفهوم الكتلة إلى الكتلة القاصرة inertial والكتلة الجاذبة gravitational فنكون الكتلة الجاذبة هي المسؤولة عن الجاذبية، فيما تُحفظ الكتلة وكمية الحركة والطاقة كل على حدة. وفي النسبية الخاصة لدينا كتلة السكون والكتلة النسبوية المعتمدة على السرعة؛ وتستبدل قوانين الحفظ المجمع للكتلة - الطاقة والطاقة - كمية الحركة، بقوانين الحفظ غير النسبوية.

الذاتي. تُسبب القوى انحرافات في مسارات القصور الذاتي. وتُعتبر حالة انعدام اللزوجة حالة أولية، ويتم أخذ التفاعلات في الاعتبار في مرحلة لاحقة. والأمر نفسه يسري على نظرية المجال. إنها تبدأ من المجالات الحرة، على حين تأتي تفاعلاتها مع بعضها ومع المادة فيما بعد. وحين تصير التفاعلات غاية في التعقيد، يتم استخدام نظرية الاضطراب. فتبدأ من حالة عدم الاضطراب، أي الكتل متحررة النقاط والمجالات غير المتجاورة، وتقوم بتقريب تفاعلاتها بشكل تدريجي. وفي واقع الأمر فإن المفهوم المينافيزيقي لجوهر ما يكون مستقلاً عن باقي العالم يشكل دعامة لأشهر المحاولات لصياغة الفيزياء في قالب مثالي^(١). إن الروابط أشباه القوانين بين الخصائص العارضة للجسيمات الكلاسيكية (أو نقاط الكتلة) في الكثير من نظم الجسيمات يتم التعبير عنها من خلال مسار في فضاء المرحلة phase space. فإذا ما كانت قيم الموضع وكمية الحركة لكل الجسيمات في وقت معطى تأتي على هيئة شروط مبدئية، فإن المسار يتم تحديده بشكل كامل وواضح لكل الأوقات.

وعلى نحو ما أوضح كاسيرر، فإن ميكانيكا الكم ليست متوافقة مع المفهوم التقليدي للجوهر (أي مبدأ نسبة الصفات إلى حامل الصفات) ولا مع مبدأ العلية في الاستخدام الشائع للنظم الفردية والعمليات^(٢). تنتمي هذه

(١) انظر: Falkenburg 1993a, 1993b, 2000b.

(٢) Cassirer 1937، انظر أيضاً: Falkenburg 1993b. يُعد نهج بوم (Bohm 1952)

لنظرية المتغير الخفي محاولة لإنقاذ كل من المبدئين في نطاق الكم. ومع ذلك تدفع أي نظرية للمتغير الخفي ثمن تقديم الأعمال - على - بُعد للفيزياء؛ أعني إمكانية غير موضعية تنتهك علياً أينشتين وتتعارض مع النسبية الخاصة. انظر بيل (Bell 1964، 2000): "علاوة على ذلك يجب أن تنتشر الإشارة المتضمنة أنياً؛ لذا فإن نظرية من -

المبادئ التقليدية إلى عالمنا العقلي الكلاسيكي، إلا أنها ليست على خصام مع بنية ظواهر الكم. ففيما يتعلق بالتمييز بين الواقعي والفعلي المذكور في القسم السابق يعني هذا أن تفسيرنا للواقعي وخبرتنا بالفعلي يتعارضان في نطاق ما دون الذرة. إن إدراكنا للواقعي يأتي من جهة أنه حامل للصفات الفيزيائية وحميتها الكاملة، إلا أن علاقات عدم التعيين عند هايزنبرج ونظرية الكم في تفسيرها الاحتمالي المعتاد يخبرانا أن النتائج العارضة لقياسات الكم لا تُرد إلى هذا البناء construal النظري من قبيل ما هو موجود في الواقعية الفيزيائية. ليس ثمة مخرج يسير من هذا النزاع، وما يصدق على الرواية التي لا تنتهي للواقعي، والأداتي، والكلي، والمنطقي - الكمي - quantum-logical، والفيزيائي، والميتافيزيقي... إلخ، يصدق أيضاً على تأويلات نظرية الكم. ثمة سبب يصعب إدراكه في ثنايا السجلات الأخيرة بشأن نظرية الكم يقف خلف هذه المشكلة. إن بناءنا المعتاد للواقعية يمكن أن يكون مفيداً ومعقولاً بالنسبة إلى الخبرة اليومية. ومع ذلك فإن جذوره منغمسة بشدة في ميتافيزيقا القرن السابع عشر، وعندما نضعها في مواجهة نظرية النسبية ونظرية الكم يتضح أنها قوية للغاية بشأن مفاهيم المكان والزمان، والجوهر، والعلية⁽¹⁾.

= هذا القبيل لا يمكن أن تكون ثابت لورنتز". وفي نطاق نظرية مجال الكم النسبوي يصبح هذا الثمن باهظاً حقاً. إن نظرية كمية نسبوية من نمط بوم Bohm-type هي الأفضل مع وجود الكثير من الصعوبات، من بينها مشكلة أن الجسيمات النسبوية لا يمكن أن تتوضع؛ انظر: Clifton and Halvorson 2002، والفقرة (٦-٤-١).

(١) أظهر ميتلشتيت Mittelstaedt 2006 كيف تنتقد النسبية الخاصة ونظرية الكم الواقعية الكلاسيكية كبناء من الواقعية التجريبية فائق التحديد من جانبين. تقرر النسبية=

لذلك تتعارض نظرية الكم مع الواقعية الكلاسيكية؛ حيث إن بناءنا الكلاسيكي للواقعية يتعارض مع بنية الكم العارضة للعالم الفعلي. إن الواقعي - كما اعتدنا على إدراكه من خلال خلفية ميتافيزيقية تقليدية (ديكارتيّة) - والفعلي - كما يظهر من خلال تجارب فيزياء ما دون الذرة؛ لا يتفقان. وفي الأغلب يتفق ما اعتدنا أن نحوزه من ميتافيزيقا مع محتويات الفيزياء الحديثة بالنسبة إلى موضوعات خبرة الحياة اليومية والفيزياء الكلاسيكية. إننا ندرك - بشكل كلاسيكي - الواقعي من خلال رابطة زمكانية مُحددة بشكل كامل وديناميكية للأشياء، والأحداث، والعمليات. ومع ذلك فالواقعي عارض، وحينما نتكلم بلغة الكم فإن ثمة تعارضًا مع بنائنا الكلاسيكي للواقعي. وفي الواقع فإن المبادئ الكلاسيكية للجوهر والعلية تقوم بعملية تحديد زائد لمجال الكم، كما هو الحال في مفهوم شيء فيزيائي ما له خصائص كاملة التحديد.

وإذا لم نلتزم بصيغة ما للبنائية، وإذا لم نؤمن بإمكانية إعادة تأسيس البناء الكلاسيكي للعالم الفعلي، فإننا نجد أنفسنا مضطرين إلى الاستغناء عن بناء كلاسيكي شامل للعالم. اضطر فيزيائيون أمثال بلانك وأينشتين وبور - هي إطار فيزياء الكم - إلى الاستغناء عن الافتراضات الكلاسيكية الحاسمة بشأن المادة والإشعاع حتى إن كان ذلك على خلاف إرادتهم. في الواقع أن هذه الواقعة تحديدًا تمثل حالة ضد البنائية، وشاهدًا مؤيدًا لتأويل واقعي للبنى الكمية. لقد أخفق البناء الكلاسيكي لمجال ما دون الذرة. وبقدر ما تتعارض

=الخاصة أن المفاهيم الكلاسيكية للزمان والمكان والآنية ليست عامة بالقدر الكافي؛ وتقرر نظرية الكم أن المفهوم الكلاسيكي للجوهر أقوى مما يلزم.

مسارات الجسيمات الكلاسيكية والنظرية الكلاسيكية للإشعاع مع الظواهر الكمومية، فإن قوانين الفيزياء الكلاسيكية تكون خاطئة على حين ينبغي اعتبار قوانين نظرية الكم صادقة. إلا أن السجال حول تأويلات نظرية الكم يُظهر أن المصطلحات التي يمكن من خلالها تحديد الواقعية البنيوية للظواهر الكمية لا يزال غير واضح إلى حد بعيد.

حتى المصطلحات التي يمكن من خلالها إيضاح واقعية عليّة للجسيمات دون الذرية بوصفها عللاً للظواهر الكمومية أقل وضوحاً أيضاً. وفي الواقع فإن هذه هي إحدى المشكلات الرئيسية التي يناقشها هذا الكتاب، التي سوف يتم بحثها بشكل أكثر تفصيلاً في الفصول اللاحقة. وحيث إن مفهوم الجسيم دون الذري تحديداً له جانب علي، فمن وجهة نظرة نظرية الكم يصير من غير الواضح ما الذي يعنيه الفيزيائيون تحديداً حين يتحدثون عن الجسيمات دون الذرية من قبيل الإلكترونات، والبروتونات، والفوتونات، والكواركات.

ومع ذلك فإن ثمة نقطة واضحة فيما يتعلق بالتمييز بين الواقعي والفعلي، أو بنياتنا النظرية والعارض. ليس ثمة بناء كلاسيكي شامل لمجال الكم، حتى إن وجدت نماذج جزئية وتقريبية للظواهر الكمومية. إن السمة الرئيسية التي تسم الظواهر الكمومية هي أن الكثير منها لا يمكن أن ينضوي تحت راية النظريات والنماذج الكلاسيكية على الإطلاق، على حين تتناظر^(*)

(*) تم استخدام مادة التناظر **correspondence** على مدار الصفحات السابقة - بشكل أكثر أو أقل دقة - بالمعنى الفلسفي الذي يعني معياراً من معايير الحكم على صدق العبارة، فتكون العبارة صادقة إذا تناظرت مع الواقع. أما استخدام التناظر في هذا السياق، وفيما سيلي منسوباً لبور فيشير إلى القاعدة الفيزيائية التي تُقرر أنه عندما تكون لنظام-

ظواهر أخرى مع الحالة الكلاسيكية على المستوى الإحصائي. وعموماً لا يمكن رد نتائج قياسات الكم إلى العرضية؛ لذا ففي مجال الكم يجب استبدال البنية الكمية للظاهرة العارضة بالبناء الكلاسيكي للواقعية الفيزيائية.

إن هذه البنية الكمية عند الحد الأدنى. إنها تعتمد على الحد الأدنى من التأويل لنظرية الكم؛ أعني تأويل بورن-فون نيومان الاحتمالي⁽¹⁾. إنها ترتد إلى الظواهر الكمومية وإلى القيم التي تم قياسها والتنبؤ بها للكميات الفيزيائية. ولكن في الفصول اللاحقة سوف نرى أن الظواهر والنماذج الخاصة بالفيزياء الجسيمية لا تمثل حنطة لمطحن التجريبي. وعلى قدر ما تُسهم الفيزياء الجسيمية بنصيب في فهمنا للعالم الواقعي، لا ترتد البنية الكمية للظواهر لتفسير تجريبي للواقعية الفيزيائية. وفي الواقع فإن أية ظاهرة كمية وخصوصاً قياسات فيزياء الجسيمات لا تفترض مقدماً فقط وجود عالم بالشكل الكلاسيكي، ولكنها تفترض أيضاً لغة الفيزياء الكلاسيكية. فالكثير من هذه القياسات يتم تفسيره من خلال نماذج نصف-كلاسيكية معقدة لا يمكن تأويلها من خلال تجريبية فان فراسن مثلاً. والكثير من هذه النماذج يستخدم ضمناً نسخة معقدة من مبدأ بور للتناظر. ومن أجل فهمها من المفيد أن نلجأ إلى تفسير بور للتتام في ميكانيكا الكم⁽²⁾.

سزري أعداد كمية عالية القيمة تكون نتائج نظرية الكم لهذا النظام موافقة لنتائج الفيزياء الكلاسيكية - انظر رولان أومنيس: فلسفة الكوانتم، ت: أحمد فؤاد باشا، معنى طريف الحولي، عالم المعرفة، أبريل ٢٠٠٨، هامش المترجمين ص ٢٤٦. (المترجمان).

(1) Born 1926a, 1926b; Von Neumann 1932, 101-110.

(2) انظر الفقرات (١-٤-٥)، و(٢-٤-٥)، و(٢-٢-٧).

إن السمة المميزة لمجال الكم هي أن تفسيرنا النظري للواقعي وقدرتنا على التجريب بالنسبة إلى الفعلي لا يمكن أن يلتقيا أبدًا. فتُظهر نتائج القياسات الفعلية في العالم الميكروسكوبي الكلاسيكي أن ميكانيكا الكم لا يسعها التفسير. على العكس فإن اتجاه عدم الترابط الذي يُفسر ظهور نتائج قياسات معينة على الأقل على المستوى الإحصائي، على أساس ميكانيكا الكم للأنساق المفتوحة، يجب أن يفترض مقدمًا بيئة محلية ميكروسكوبية تتضاءل فيها فرص التراكيب الكمية⁽¹⁾. هذه خطوة مهمة نحو رأب الصدع بين الواقعي والفعلي، أو بين نظرية الكم (كنظرية احتمالية)، وأحداث كمية (فردية) في عالم كلاسيكي. ولكن بهذه الطريقة تم فقط رأب الصدع جزئيًا. أما السؤال المُحير عن كيفية انبثاق عالم كلاسيكي من واقعية دون ذرية فلا يزال موجودًا. وما دامت الواقعية الكلاسيكية فقط هي المتاحة، فستظل تُثير مشكلة القياسات الكمية العويصة نزعة ضد الواقعية. يبدو إذاً أنه ما من تفسير للواقعية دون الذرية.

١-٥ ميتافيزيقا الفيزياء

من وجهة نظر نظرية الكم يصبح من الواضح أن السجال حول الواقعية العلمية يتعامل مع أسئلة الفلسفة الطبيعية التقليدية، وتقف خيارات الواقعية الكلاسيكية أو التجريبية الصارمة في جانب التقاليد الفلسفية للعقلانية والتجريبية. فكلا الخيارين يخفق في تقديم تفسير مُرضٍ لنظرية الكم. إن البناء الكلاسيكي للواقعية الفيزيائية قوي للغاية، والتجريبية الصارمة ضعيفة

(1) Giulini et al. 1996.

للمعابة لفهم قوانين الكم للطبيعة. والموقف مشابه لما شرحه كانط في مذهبه لتناقض العقل الخالص. تخبرنا العقلانية بالكثير حول البنية الزمكانية للعالم، هل حين لا تخبرنا التجريبية بشكل كاف. في هذا السياق تعامل كانط مع المشكلات التقليدية بشأن بداية العالم في المكان والزمان ووجود الذرات كأجزاء مكونة نهائية للمادة^(١). كان حله أن يبحث الأسس الميتافيزيقية للعلم الطبيعي، التي هي الافتراضات القبلية التي تستند إليها نظرياتنا عن العالم الزمكاني ومكوناته.

إن مشروع كانط - في واقع الأمر - لتقصي الأسس الميتافيزيقية للعلم الطبيعي لم يتم هجرانه، كما تود الفلسفة التجريبية للعلم أن تلقي في روعنا. أخفقت تجريبية القرن العشرين في محاولاتها للتوصل للتمييز بين العلم التجريبي والميتافيزيقا. واضطر برنامج كارناب البحثي إلى إعادة تأسيس النظريات الفيزيائية من مفاهيم لها دلالة تجريبية لمواجهة استبصار كواين عن أن العلاقة بين النظرية الفيزيائية وبياناتها علاقة كلية. ومع ذلك فالمخططات العامة للفيزياء معقدة. إنها شبكة متعددة الأبعاد من البنى التراتبية، من العناصر التجريبية وغير التجريبية التي تتشابك في الكثير من الحالات. إن بحثاً أعمق لنظريات فيزيائية معينة يسمح بعزل الأنماط التالية من العناصر غير التجريبية في النظريات الفيزيائية:

(أ) المعايير القياسية: نفترض القياسات مقدماً أن ثمة نظاماً قياسياً؛ ومع ذلك فإن خيار النظام القياسي يفترض مقدماً نظرية لأجهزة القياس، فيمكن قياس العرض والزمن من خلال مؤشرات ثابتة والساعات

(١) انظر: تحليلي في الفصل الخامس من: Falkenburg 2000.

النيوتونية أو من خلال إشارات ضوئية، أي من خلال نظم قياس جاليلية أو لورنتزية. والأمر نفسه على هذا النحو بالنسبة إلى السرعة، التي يُمكن قياسها في إطار جاليلي أو لورنتزي. يُمكن قياس الكتلة بالمصطلحات الكلاسيكية؛ أعني من خلال مرسمة طيف الكتلة التي تعمل وفقاً لقانون لورنتز للقوة، أو من خلال مصطلحات غير كلاسيكية كأن تكون من خلال متوسط الطاقة لرنين تضاؤل لجسيم دون ذري غير مستقر وتكافؤ أينشتين للكتلة والطاقة.

(ب) العناصر الاصطلاحية: تحتوي الكثير من النظريات الفيزيائية كميات غير محددة تجريبياً ويمكن تعيينها بفضل بنية بسيطة وملائمة رياضياً للنظرية. ويُعد الاصطلاح على سرعة الضوء ذات الاتجاهين التي تأسس عليها تعريف أينشتين الإجرائي الشهير للآنية مثالاً ذاتعاً. ففي بحثه الرائد عن الجاذبية الخاصة، اقترح أينشتين أنه حينما نقيم رابطة تزامنية بين الساعات من خلال إشارات الضوء، فإن الضوء يذهب في كلا الاتجاهين بالسرعة نفسها⁽¹⁾.

(1) استقى كل من أينشتين ورايشباخ وجرونباوم (Einstein 1905, 894. Reichenbach 1957 and Grünbaum 1963) مواقف اصطلاحية من وجود مثل هذه العناصر الاصطلاحية في النظريات الفيزيائية. على حين اتخذ فريدمان (Friedman 1983, 264-339) موقفاً مناوئاً للاصطلاحية. فقد أوضح البنية الكلية للنسبية الخاصة عبر شرح "كيف تلحم علاقة التزامن القياسية بحسم بنظرية النسبية. ليس بوسع المرء التساؤل حول موضوعية هذه العلاقة دون أن يضع أيضاً أجزاء مهمة من بقية النظرية موضع التساؤل. وعلى وجه الخصوص، لا يمكن الاعتقاد في أن التزامن =

(ج) المبادئ الما بعد نظرية: تعتمد هذه المبادئ على الافتراضات الميتافيزيقية التقليدية حول بنية الواقع التجريبية وحول مبادئ الطبيعة. فتحدد فئات للنظريات. وبهذا المعنى يمكن تسميتها بما بعد النظرية^(١). ومعظم المبادئ الما بعد نظرية موروثه عن العقلانية. تفترض الواقع الكلاسيكية أن الواقع التجريبية كاملة التحديد والموضعية. وتخبرنا بنية ميكانيكا الكم بالعكس. فأي أنماط التماثلات نجدها في قوانين الطبيعة؟ إن الميكانيكا الكلاسيكية غير متغيرة في إطار الانعكاس المكاني والعكس الزماني. والميكانيكا غير النسبية هي ثوابت جاليلية. والإلكتروديناميكا ثوابت لورنتزية. قدمت الديناميكا الحرارية سهم الوقت. إن التفاعلات الضعيفة تنتهك التكافؤ. إستمر حتى الآن افتراض أن القوانين الأساسية للطبيعة يجب أن تكون ثوابت^(٢) CPT. تُظهر هذه الأمثلة أن بعضًا من هذه المبادئ الما بعد

=البعيد اصطلاحياً دون أيضاً الاعتقاد في أن مثل هذه الكميات الأساسية من قبيل المقياس الدقيق للزمن اصطلاحياً أيضاً". (Friedman 1983, 317) .

(١) لا يُستعمل مصطلح "المابعد-نظرية" هنا بوصفه مصطلحاً لغوياً ولكن على غرار نهج فيجنر. لاحظ فيجنر (Wigner 1964, 16). "أن ثمة تشابهاً عظيمًا في العلاقة بين قوانين الطبيعة والأحداث من ناحية، والعلاقة بين مبادئ النسبية وقوانين الطبيعة من ناحية أخرى". انظر: Falkenburg 1988. إن المبدأ ما بعد نظرية يقوم بتثبيت سمة بنوية معينة للنظرية. ويمكن التعبير عنها بلغة النظرية وأيضًا بلغة بعد-نظرية غير صورية.

(٢) انظر: Streeter and Wightman 1964, 142-146.

انتقالية الندية هي P للنظير دون الذري للمرايا؛ C هي شحنة المترافق وهي انتقالية الجسيمات إلى الجسيمات العنيدة؛ T هي انعكاس الزمن.

نظرية في فيزياء القرن العشرين قد صارت مما يمكن اختباره. والسمة الجيدة بشأن التجارب ذات الصلة هي أنها لا تختبر نظرية بعينها بل بالأحرى فئة من البنى النظرية^(١). وفي واقع الأمر فإن التجارب الحاسمة لعدم التساوي عند بيل تستبعد كل النظريات المتغيرة الخفية فيما يتعلق بالاقتران الموضوعي^(٢).

هذه الأصناف الثلاثة من العناصر غير التجريبية للنظريات الفيزيائية متداخلة؛ فالتمائل الزمكاني لنظرية ما يُحدد اختيار نظام القياس الجاليلي أو اللورنتزي، ويؤثر اختيار العناصر الاصطلاحية لنظرية زمكانية على نظام القياس أيضاً. فأن تتبذ اصطلاح أينشتين للنسبية الخاصة يعني أن تلجأ لاختيار نظام قياسي غاية في التعقيد^(٣). والأنواع الثلاثة من الافتراضات بأسرها تؤثر على ما ندعوه بأنطولوجيا النظرية، أي نوع الكيانات التي تُلمننا بها النظرية^(٤). فالاعتقاد في إطار القصور الذاتي يعني إعادة تأسيس

(١) بحث فرانكلين (Franklin 1986, 35-38) هذه السمة للاختبارات التجريبية لندية الانتهاك.

(٢) انظر على سبيل المثال: Scheibe 1986, 1991.

(٣) انظر مناقشة علاقات التزامن غير المعيارية في Friedman 1983, 165-176، والنقاش المتعلق بها للنظريات المكافئة تجريبياً، Friedman 1983, 165-176 والمناقشة المتعلقة بالنظريات المكافئة تجريبياً، loc.cit.266-339

(٤) يعني التحدث عن الأنطولوجيا بهذه الطريقة قبول الالتزامات الأنطولوجية لنظرية ما بالمعنى الذي قدمه كواين. انظر المقولة الشهيرة: "إن توجد يعني أن تكون قيمة متغير [مُقيد]" (Quine 1953, 15)، وفقاً لذلك فإن أنطولوجيا نظرية ما هي مجال الأفراد التي تقوم عبارات النظرية بقياسها. في إطار الرؤية التجريبية لما دون الحتمية والسجال بشأن الواقعية العلمية، قد يحاج المرء أن هذه الفكرة للأنطولوجيا ليست مفيدة حقاً. =

زمكان نيوتوني جديد ومطلق، ويعني نبذ الثابت اللورنتزي، والعكس بالعكس. والاعتقاد في نظرية كمية لها متغيرات خفية يعني إعادة تأسيس مفهوم الفعل عن بُعد^(*) action-at-a-distance مع نبذ الثابت اللورنتزي، وهكذا.

إن التصنيف المذكور عاليه للافتراضات الميتافيزيقية لا يزال يستند إلى تفسير تجريبي للميتافيزيقا، تكون المفاهيم التجريبية وفقاً له خلواً من الميتافيزيقا، وبالعكس تكون كل المفاهيم غير التجريبية ميتافيزيقية. ونظراً إلى أن هذا التمييز بين التجريبي والميتافيزيقي ينبغي مراجعته في ضوء البحث العميق عن معيار للتمييز، يتعين على المرء أيضاً أن يعيد اختبار المفهوم الذي تتأسس عليه الميتافيزيقا. إن الأنواع الثلاثة من العناصر غير التجريبية في النظريات الفيزيائية والمشار إليها آنفاً تمثل ثلاثة أنماط من الافتراضات الميتافيزيقية مختلفة تمام الاختلاف. وسوف أضعها في ترتيب معكوس على النحو التالي:

(ج) مبادئ ما بعد نظرية يمكن أن تصير قابلة للاختبار. وتخفق محاولة تعيين تمييز بين المفاهيم التجريبية والافتراضات الميتافيزيقية في كلا الاتجاهين. فبعض الأجزاء الميتافيزيقية صارت علماً تجريبياً. نقول

=ومع ذلك، فإنها تساعد على توضيح الاعتقادات الميتافيزيقية التي يلتزم بها اختبار معين لقياس ما أو ما إلى ذلك.

(*) مفهوم يقصد منه إمكانية تحرك أو تغيير جسم ما أو خضوعه لتأثير ما؛ من قبيل جاذبية جسم آخر، دون أن يلمسه مباشرة هذا الجسم الآخر. إنه تفاعل غير موضعي لأشياء منفصلة مكانياً. (الترجمان)

هذا نظراً إلى أنه في تجارب فيزياء القرن العشرين اتضح أن العديد من الافتراضات المأ بعد نظرية في الفيزياء لها محتوى تجريبي وتم تكذيبها في مجال الكم. وعلى وجه الخصوص فإن مبادئ الموضوعية وبقاء التكافؤ مشتقة من افتراضات ميتافيزيقية تقليدية عن الطبيعة، لكنها أخفقت. ففي مجال الكم تم دحض الموضوعية عن طريق انتهاكات تفاوت بيل. تم انتهاك التكافؤ عن طريق التفاعلات الضعيفة التي تم تأكيدها لأول مرة من خلال انحلال كو⁽¹⁾. مبادئ أخرى بعد نظرية في الفيزياء، من قبيل الثبات البعدي للكميات الفيزيائية⁽²⁾ وثبات CPT بعد مما يمكن اختباره. إن مبدأ بقاء الطاقة تم وضعه مراراً وتكراراً موضع البحث⁽³⁾. ومع ذلك، فحتى يومنا هذا فإن هذه المبادئ العامة للفيزياء تهرب من محك التكذيب وليس من الواضح إلى أي مدى يكونون غير محددين تجريبياً.

(ب) الافتراضات التي تظل غير محددة تجريبياً لأسباب رئيسية. إن الافتراضات الاصطلاحية للنظريات الفيزيائية هي حالة واضحة لعدم التحديد التجريبي، ولكنها ليست الوحيدة. ثمة أمثلة أخرى نجدها في تفسيرات ميكانيكا الكم فيما وراء التفسير الاحتمالي لبورن وفون نيومان، مثل نظرية بوم للمحددات الخفية، تفسير العوالم المتعددة لعملية القياس، أو التفسير الإجرائي الحديث لميكانيكا الكم. وبقدر ما

(1) انظر الملحق (ب) والفقرة (٤-٢).

(٢) على سبيل المثال، ما جاء بنظرية Bks (Boher et al.1924)، أو ما قبل تأكيد فرض

النيوتريينو.

(3) Cramer 1986.

يكونون فقط متوافقين تجريبياً مع المعرفة الحالية حول نظم الكم، فإنهم قد يصيرون يوماً ما خاضعين للاختبار. وبقدر ما يكونون مكافئين تجريبياً بشكل شامل لميكانيكا كم عادية غير نسبية (مثل منحى العوالم المتعددة)، فإنها غير محددة تجريبياً لأسباب من حيث المبدأ. وتمثل ميكانيكا نيوتن ذات المكان المطلق أو دونه مثلاً أبعداً^(١).

(أ) المبادئ المنهجية التي لا يمكن الاستغناء عنها. إن المبادئ الميتافيزيقية الأكثر شيوعاً في الفيزياء هي الأكثر تعرضاً للإهمال في ظل فلسفة الفيزياء حالياً. إن المعايير القياسية للفيزياء تبدو واضحة للغاية حتى إنها لم تجذب أي اهتمام على الإطلاق في فلسفة الفيزياء في العقود الأخيرة. ومع ذلك فإنها حالات واضحة لمبادئ منهجية لا غنى عنها في الفيزياء. فدون القياسات، لن يكون ثمة إمكانية لعلم تجريبي كمي. ثمة مبادئ أخرى لا غنى عنها تؤسس للمنهج التجريبي. والمبدأ الأكثر أهمية هو أن ظواهر ونظم الفيزياء يمكن تفكيكها وإعادة تركيبها، بمعنى تحليلها إلى أجزاء (تحليل ميربولوجي)، وعوامل عليّة ذات صلة (تحليل علي)، والتي بدورها يُفترض أن تتدمج بشكل أكثر أو أقل وضوحاً في موضوعات التفسيرات الفيزيائية. وكل هذه المبادئ المنهجية تكون الفيزياء كعلم تجريبي. إنها المبادئ الترانسندتالية للفيزياء بالمعنى الكانطي لكونها شروطاً على وجه الخصوص لإمكانية الخبرة الفيزيائية. إنها وثيقة

(١) هذا المثال لعدم التحديد التجريبي والنظريات المكافئة تجريبياً تمت مناقشته في Van

.Fraassen 1980, 44-74

الصلة بالمبادئ التقليدية للجوهر والعلية. إن سماتها البنائية سوف يتم تحليلها في الفصل التالي. ثمة أيضاً مبادئ تنظيمية لا يمكن الاستغناء عنها في الفيزياء، من قبيل مبادئ الوحدة والبساطة لقوانين الفيزياء، وقد عبر عنها نيوتن بقوله: "ستكون الطبيعة متوافقة مع نفسها إلى حد بعيد كما ستكون شديدة البساطة"⁽¹⁾.

ومن ثم، فمن ناحية قد يتم فهم النظريات الفيزيائية بوصفها نماذج نظرية معقدة لنظرية ميتافيزيقية في الطبيعة ذات بنية صورة أضعف. وتعتمد مثل هذه النظرية الميتافيزيقية على مفاهيم ومبادئ قبل-نظرية وغير صورية. وحين تصير هذه الافتراضات الميتافيزيقية مُحددة من أجل صياغة نظريات فيزيائية، يتضح أن بعضها على المدى البعيد ذو محتوى تجريبي. من ناحية أخرى، تعتمد النظريات الفيزيائية والممارسة الفيزيائية على مبادئ منهجية لا غنى عنها ولا يمكن اختبارها؛ حيث إن التخلي عنها سيعني التخلي عن الفيزياء كعلم تجريبي. ومع ذلك فإنها متشابكة؛ لذا فما من سبيل لكي نعرف مقدماً ما إذا كان أحد هذه المبادئ قد يحصل ذات يوم محتوى تجريبياً ويصير مما يمكن اختباره إلى مدى معين في مجال معين.

فالافتراضات الميتافيزيقية التقليدية على سبيل المثال بشأن نظام الطبيعة نشأ عنها مبادئ النسقية التي استخدمها لايبنتس كأدوات قوية ضد مبادئ نيوتن بشأن المكان المطلق والزمان المطلق في السجال الشهير بين لايبنتس وكلارك⁽²⁾. بعض من مبادئ النسقية تلك أصبح قابلاً للاختبار وتم

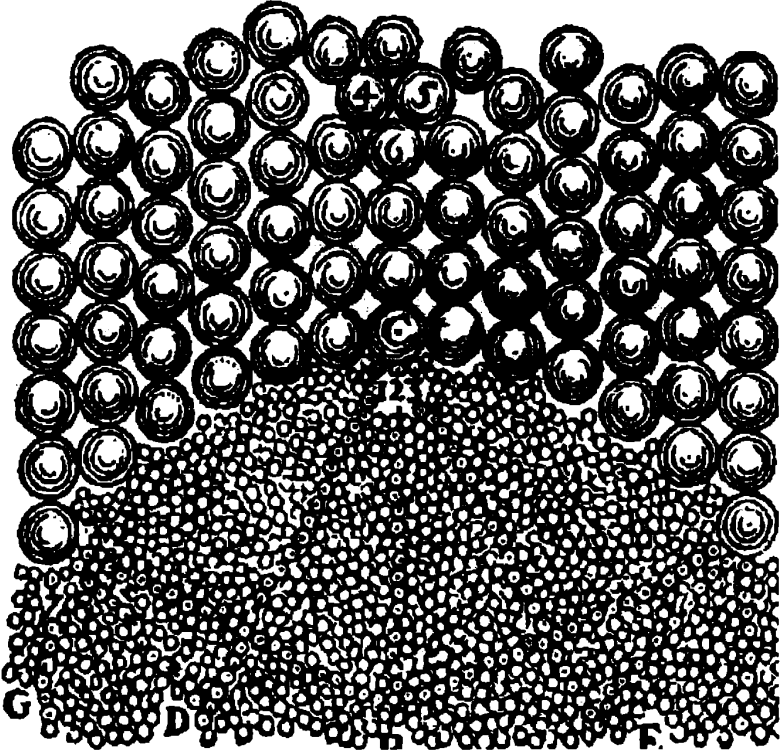
⁽¹⁾ Newton 1730, 397.

وعلى وجه الخصوص خطاب لايبنتس الثالث، Leibniz and Clarke 1715-1716، ⁽²⁾

تكذيبه، كما تُظهر انتهاكات التكافؤ. إلا أن الافتراضات الميتافيزيقية نفسها حول النظام العقلاني للظواهر نشأ عنها المبادئ المنهجية للوحدة والبساطة لقوانين الفيزياء. لقد اتخذنا مكانهما في القلب من الفيزياء الحديثة، ولا يمكن اختبارهما. وكلا المبدأين وثيق الصلة بالآخر. فالتوحيد هدف مركزي للفيزياء. أكد بلانك على أن هدف الفيزياء اكتشاف وحدة رياضية ثابتة، والتي تكون فعليا الواقع فيما وراء الظواهر^(١). وبمعزل عن واقعية بلانك الميتافيزيقية (التي يبدو أنها نتاج تلاحح البنيوية مع الأفلاطونية الرياضية)، فإن السعي خلف التوحيد لا يزال مبدأً منهجيًا ضروريًا في الفيزياء. وتُعد البساطة مبدأً مهمًا من أجل تأسيس النظرية الموحدة. تؤكد فلسفة العلم الحديثة على أن التفسير العلمي هو توحيد وأن البساطة هي المعيار الحاسم للاختيار بين النظريات المكافئة تجريبيًا^(٢). وكل المبادئ المذكورة هنا تنبثق عن العقلانية. إنها تعبر عن الاعتقاد في أن العالم عقلاني. إنها تزعم أننا قادرون على فك شفرة كتاب الطبيعة؛ لأنه كُتب بحروف رياضية يمكن وضعها في مصطلحات بديهية. وحتى إذا ما اتضح أن الطبيعة أقل نسقية، وتوحيدًا، وبساطة مما اعتقد مؤسسو الفيزياء الحديثة، فإن الاعتقاد في مبادئ النسقية، والتوحيد، والبساطة يظل لا غنى عنه لصياغة النظرية في الفيزياء.

(١) Planck 1908, 49.

(٢) انظر : Friedman 1983, 266-271, Friedman 1988



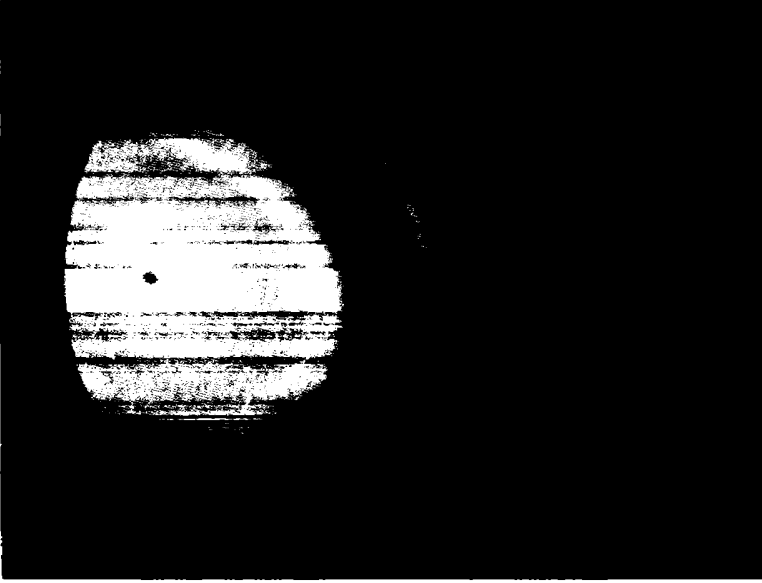
شكل رقم (١-١) نظرية ديكرت لجسيمات المادة ونظرية الأكثر لانتشار الضوء.

(ديكرت ١٦٤٤، شكل رقم ٢٤)

على نحو ما تُظهر انتهاكات النسبية وتلازمات الكم غير الموضوعية، فإن التجارب والتجارب الذهنية (الفكرية)^(*) Thought Experiments ليست فقط محكات لنظريات فيزيائية معينة. إنها أيضاً محكات لأساسها الميتافيزيقي. تختبر التجارب المُحصّلات التجريبية للنظرية، على حين تختبر التجارب الذهنية مُحصّلاتها المنطقية. كما يتم اختبار الأساس الداعم من الافتراضات الميتافيزيقية جنباً إلى جنب مع الكفاية التجريبية والاتساق الداخلي للنظرية. فإذا ما اتضح أن افتراضات ميتافيزيقية معينة أقوى مما ينبغي في ضوء النظرية، عندئذ يتعين نبذها. وبالنسبة إلى المبادئ المنهجية التي لا غنى عنها للفيزياء، فمن الواضح أن هذا مستحيل. ومع ذلك فقد نشور الريبة حول أنه بسبب مناهج الفيزياء نفسها فإن ثمة حدوداً حاسمة للمعرفة الفيزيائية. ويبدو أن هذه الريبة كانت خلف تفسير بور التنامي لنظرية الكم؛ حيث إنه وفقاً لبور، يُشير ثابت بلانك إلى حدود التحليل التجريبي⁽¹⁾.

(*) مصطلح يعني التفكير النظري في التدايعات المنطقية لفرض ما، وذلك حين يتعذر إجراء التجربة التي تختبر هذا الفرض في الواقع، أو حين يكون لها آثار غير مرغوبة. من أشهر هذا النوع من التجارب "قطة شرودينجر" وهي تجربة ذهنية قدمها إرفين شرودنجر ليبين فيها المشاكل التي رآها بتفسير كوبنهاجن وتأثير الوعي الإنساني في عملية الرصد والقياس الفيزيائي خصوصاً في الحالات الكمية. من أمثلة هذا النوع من التجارب أيضاً "مصعد" أينشتين، ومسائل ابن الهيثم. (المترجمان)

(1) في محاضرة كومو الشهيرة، أكد بور أن "ما يُدعى مصادرة الكم [...] ينسب إلى أي عملية ذرية انقطاعاً جوهرياً، أو بالأحرى فردياً، يكون دخيلاً كلية على النظريات الكلاسيكية ويُرمز له بكم بلانك للفعل". (Bohr 1928, 580). ونظرًا إلى أن "الفردية" =



شكل رقم (١-٢) ازدواجية الموجة-الجسيم. التأثير المغناطيسي على
حيود الإلكترون.

(طومسون ١٩٢٧، ثم جريمزيل ١٩٣٨، ٢٢١)

من وجهة نظر نظرية الكم، فإن المفاهيم التقليدية للجوهر والعلية تكون
على المحك. إن لهما دورًا متفردًا. إنهما من ناحية ينتميان إلى نظرية
ميتافيزيقية غير صورية عن الطبيعة تم تعيينها حين قدم نيوتن الديناميكا
الفيزيائية الأولى. ومن ناحية أخرى فإنهما وثيقا الصلة بالمبادئ المنهجية
الضرورية للفيزياء، أعني بالمبادئ الميرولوجية ومبادئ التحليل العلي اللذين
يُمثلان أساسًا للمنهج التجريبي. تركز الفيزياء الحديثة على افتراض أن

=عند بور تعني "عدم إمكانية التجزئة"، فيبدو أن ذلك وثيق الصلة بحدود التحليلي
والتركيبى للخبرة الذي قرره بور مرارًا وتكرارًا؛ انظر: Chevalley 1991, 373-378.

الظواهر تتكون من جواهر وقوى عليّة. وبناءً على هذا الافتراض، يسعى المنهج التجريبي خلف التحليل الميرولوجي والعلّي للظواهر بهدف الكشف عن هذه الجواهر والقوى. وبالمناسبة فإن هذه الجواهر تُدعى جُسيمات في العالم العقلي الذي أرسى أسسه مؤسسو الفيزياء الحديثة. سوف يبحث هذا الكتاب بشكل تفصيلي في مصير مفاهيم الجُسيم الميرولوجية والعلية التي تشكل أساسًا لفيزياء الجُسيمات حتى يومنا هذا^(١). إن الافتراضات الميتافيزيقية حول الأجسام الميكانيكية، وأدنى أجزائها (الذرات)، وغيرها من الجواهر كانت عناصر أساسية في تشكيل الفيزياء الكلاسيكية. وبطريقة مماثلة فإن هذه الافتراضات نشأ عنها الواقعية الكلاسيكية؛ ميتافيزيقا الفيزياء الكلاسيكية. ومع ذلك تخبرنا نظرية الكم أنها تتخذ صيغة أقوى من اللازم^(٢).

وفي الديناميكا الفيزيائية تم إدخال مفاهيم صورية لحالة النسق الفيزيائي وصورته الديناميكية لتحل محل المفاهيم غير الصورية للجوهر والعلية. وفي الميكانيكا الكلاسيكية، فإن الصيرورة الديناميكية لحالة ما يتم وصفها من خلال مسارها في المكان. وتستبدل ميكانيكا الكم الصيرورة المتكاملة لمتجه الحالة في فراغ هيلبرت وفقًا لمعادلة شرودينجر زائد الاختزال غير المتكامل لحالة الكم عن طريق القياس بالمسار في الفراغ. إن صيرورة حالة الكم لنسق فردي لا يمكن ترجمتها للعودة بها إلى المصطلحات التقليدية للجوهر والعلية؛ إذ يتعين التعبير عنها من خلال مصطلحات الموجات وتفسيرها الاحتمالي. إن انتشار الموجات أو احتمالاتها ينتهك الشروط الكلاسيكية للموضعية والعلية. ففي مجال الكم، لا تكون

(١) لقد تم تقديم هذه المفاهيم الجسيمية في الفقرة (٣-١). انظر أيضًا الملحق (هـ).

(٢) انظر: Cassirer 1937; Mittelstaedt 2006

الطبيعة على النحو الذي تنتبأ به الفيزياء الكلاسيكية. إن البنية العرضية لظواهر الكم هي على خلاف البناء الكلاسيكي للواقعية التجريبية التي طالما كانت تمثل عالماً عقلياً للفيزياء لأكثر من قرنين من الزمان. وهذا هو السبب في أن من الصعوبة بمكان العثور على تفسير مرضي لنظرية الكم.

٦-١ نحو واقعية الخصائص

لقد هزت نظرية الكم - في واقع الأمر - أسس الاعتقاد التقليدي في العقلانية، والاطراد، والبساطة في الطبيعة. ولكن الاستغناء الكامل عن تلك المبادئ يعني الاستغناء عن الفيزياء بوصفها علمًا. إن النسخ الأضعف من مبادئ الوحدة والبساطة بقيت بعد الانتقال إلى نظرية الكم. وسيتناول هذا الكتاب في الفصول المقبلة تفصيلاً كيف أن وحدة الفيزياء اليوم، على إثر نظرية الكم، وحدة سيمانطيقية(*) وليست وحدة أنطولوجية. فما زالت الفيزياء تستخدم لغة موحدة؛ أعني لغة الكميات الفيزيائية، حتى إن ذهبنا وحدة النظريات البديهية وموضوعاتها أدراج الرياح.

إن الوحدة السيمانطيقية للفيزياء اليوم تتأسس على تركيب المقياس المُدرج للكميات الفيزيائية. إن مقاييس الطول، والزمن، والكتلة تكون مُدرجة من صفر إلى ما لا نهاية كما لو كانت نظريات الفيزياء الكلاسيكية وغير الكلاسيكية، النسبية وغير النسبية؛ نظريات عن الأنواع الطبيعية نفسها. وفي واقع الأمر، فإن تركيب المقاييس في الكميات الفيزيائية يُعبر عن اعتقاد قوي في واقعية واضطراد الخصائص المناظرة في الطبيعة. ويتطابق هذا الاعتقاد

(*) السيمانطيقا أو علم دلالة الألفاظ: هو دراسة العلاقات بين اللغة والعالم. (المترجمان)

بأن الطول والزمن والكتلة هم من النوع نفسه على مقياس كبير أو صغير، مع افتراض أن وحدات هذه الكميات يمكن اختيارها اعتباطيًا. فالطول، والزمن، والكتلة، يمكن تحديدها من خلال نظام السننيمتر-ثانية-جرام، كما هو الحال في وحدات علم الكون، ووحدات الذرة، ووحدات مقياس بلانك.

إن تشييد مقاييس الكميات الفيزيائية يستند حقاً إلى أساس بديهي ضعيف للغاية. إن الاختيار الاعتباطي للوحدات يجد لنفسه شرعية في البديهية الأرشميدسية لنظرية الأعداد الحقيقية^(١). لا شك في أن نظرية الأعداد الحقيقية هي قاسم مشترك بين كل نظريات القياس المعروفة في الفيزياء؛ لذا فمن الممكن التوسع في مقاييس الكميات الفيزيائية من الكلاسيكي إلى المجال الكمي، حتى إن كانت الموضوعات الخاضعة للملاحظة كلاسيكياً متميزة صورياً عن الموضوعات الخاضعة للملاحظة في فيزياء الكم. ولسوف نرى أن هذا التوسع يقوم باستخدام ضمني لمبدأ الجسر أو قاعدة التناظر؛ أعني نسخة تعميمية من مبدأ بور الشهير للتناظر. وعن طريق إقامة مقاييس للكميات الفيزيائية بهذه الطريقة، تكون الفيزياء المعاصرة قادرة على تجاهل مشكلة اللامقياسية بالمعنى الذي ظهرت به لدى توماس كون. إن هذه المشكلة التي خضعت لنقاش موسع لعقود في إطار فلسفة العلم، ما هي في الواقع إلا مشكلة فلسفية ليس لها من دور في الممارسة الفيزيائية. إن التفاصيل السيمانطيقية لكيفية التغلب على هذه المشكلة هي مع ذلك مراوغة^(٢).

(١) لقد تأكد ذلك في: Hilbert 1918، كجزء أساسي من استخدام المنهج البديهي في

الفيزياء. انظر أيضاً الملحق (أ).

(٢) انظر الفصل الخامس.

ومع ذلك تظل الوحدة السيمانطيقية للفيزياء المعاصرة مرتبطة بالالتزامات الميتافيزيقية. فأن تقييم مقاييس للكميات الفيزيائية يعني أن تعتقد في أن خصائص الأنواع الطبيعية هي نفسها بالنسبة إلى عالم الكونيات، والكونيات الوسيطة وما دون الذرة. (وتعني "نفسها" هنا "من النوع نفسه"، أو "مشابهة" بالطريقة التي تصنع بها متصلاً من الأعداد الحقيقية الموجبة.) ويناظر هذا الاعتقاد نسخة من الواقعية العلمية أضعف من مواقف الواقعية الشاملة والواقعية العلية المعروضة في الفقرة (١-٢)، ولكن أقوى من الواقعية البنيوية، أو التجريبية الصارمة، أو البنائية. إنها اعتقاد معين في وجود الخصائص الفيزيائية^(١)، والتي لا تكون مرتبطة بالضرورة بالاعتقاد في وجود موضوعات فيزيائية منفصلة كحوامل لهذه السمات. حين صك ستوني مصطلح "الإلكترون" في عام ١٨٩١، فإنه أشار إلى "وحدة طبيعية للكهرباء"، أي شحنة تم قياسها في عملية تحليل كهربائي^(٢). إن الشحنة ما هي إلا كمية فيزيائية، فهي سمة فيزيائية مثبتة بطريقة معينة لعملية فيزيائية ويُمكن قياسها. على النقيض من هذه السمة الفيزيائية، فإن جُسيماً مشحوناً ذا

(١) ينبغي ألا يفهم ذلك بالمعنى الأفلاطوني، أي كاعتقاد في وجود الخصائص ككليات. إنها أقرب إلى المفهوم الأرسطي للخصائص الذي يذهب إلى أنها دائماً ما تكون محمولة من قبل أفراد. وفي فيزياء الكم، فإن هؤلاء الأفراد هم أجهزة القياس التي تحدث على مستواها العمليات دون الذرية، أو على مستوى البيئة الماكروسكوبية التي يتلاحم معها النسق الكمي، انظر: Falkenburg 1993b، وتقترب هذه الرؤية الفيزيائية للخصائص من مفهوم المجاز في الأنطولوجيا المعاصرة. انظر: Seibt 2002.

(٢) انظر Millikan 1917, pais 1986, 73-74، وأيضاً الفقرة (٣-٢-١).

كتلة كبيرة هو عبارة عن تجميع لسمات فيزيائية تأتي دائماً معاً عند القياس، أي ما يمكن أن ندعوه جوهرًا تجريبيًا بلغة لوك^(١).

إن الاعتقاد في السمات الفيزيائية التي تناظر كميات مقاسة له أساس إجرائي. إنها تناظر موقف التجريبية المعتدلة المعروضة في الفقرة (١-٢). ومع ذلك فإن إقامة مقاييس الكميات يُناظر اعتقادًا ميتافيزيقيًا أقوى. إنه يناظر الثقة في أن ثمة متصلًا من السمات في الطبيعة تُغطي الخاصية الزمكانية والكميات الديناميكية لكل العمليات الواقعية أو الممكنة الفيزيائية على كل المقاييس. يتجاوز هذا الاعتقاد في قوته النزعة الإجرائية في ملء الفجوات بين التعريفات الإجرائية المتنوعة للكميات الفيزيائية التي تكون مُقيدة بمناهج قياس معينة. كما أنها أقوى من الواقعية البنيوية في سماتها الكيفية. إن الواقعية البنيوية هي الاعتقاد في أن العمليات الفيزيائية تُعرض (تقريبًا على الأقل) بُنى صورية معينة. إن واقعية الخصائص تُعبر عن الاعتقاد في أن الطول، والزمن، والكتلة، والشحنة... إلخ، هي خصائص يُمكن نسبتها إلى نظم وعمليات في الطبيعة. ودون واقعية الخصائص من هذا النوع، فلن يكون ثمة إمكانية لوجود الفيزياء كعلم في واقع الأمر. ودون الاعتقاد في الخصائص الفيزيائية المشتركة بين كل الأنواع الطبيعية في كل المقاييس (أي ما كانت هذه الأنواع الطبيعية)، فلا فيزياء ما دون الذرة ولا علم الكونيات يمكن أن يكون ممكنًا كمباحث من العلم التجريبي.

(١) الجوهر التجريبي - وفقًا للوك - هو مجموعة من الخصائص توجد باستمرار معًا، ويكون مفهوم حامل هذه الخصائص مفهومًا ميتافيزيقيًا. انظر: Locke 1689, Book

من الجلي أن مقاييس الكميات الفيزيائية هي بالمعنى الكانطي شروط أولية للفيزياء بوصفها علماً تجريبياً. قُمت في الفقرة (١-٥) بتصنيف المعايير القياسية للفيزياء بين المبادئ المنهجية الضرورية للفيزياء التي تمثل قوام الخبرة الفيزيائية. ويصدق هذا على كل مناهج القياس بشكل منفرد. إن مقاييس الكميات الفيزيائية توحد - مع ذلك - مناهج القياس المختلفة في الفيزياء. من هنا فإنها ليست أولية بالمعنى الكانطي لمبدأ العلية أو المبدأ الآخر للفهم الخالص. إنها أولية بالطريقة نفسها التي يكون بها مبدأ وحدة القوانين التجريبية في الطبيعة أولياً وفقاً لنقد ملكة الحكم. ففي سبيلنا لإقامة مقياس للطول، والزمن، والكتلة، فإننا ندرك الطبيعة كما لو كان ثمة متصل من الخصائص الفيزيائية. فلا أحد يضمن أن إقامة هذه المقاييس لا ينتهج مقياس بلانك مثلاً. ولكن إذا ما انتهكته في موضع ما، فإن الوحدة السيمانطيقية للفيزياء تتحطم على المقياس، ومعه إمكانية الفيزياء بوصفها علماً تجريبياً على وجه التحديد.

توسيع مدى الواقعية الفيزيائية

يرتكز العلم الحديث على تفاعل مُعقد بين النظرية والتجربة. وينشأ عن الطريقة التي يقوم بها هذا التفاعل توسيع مدى الواقعية الفيزيائية فيما وراء العالم القابل للملاحظة النزاع بين جاليليو وخصومه الأرسطيين، وهو ما غدى السجال الأخير بشأن الواقعية العلمية حتى اليوم. ومن أجل التوصل إلى فهم أفضل للمشكلات التي يشتمل عليها السجال حول الواقعية دون الذرية، فإن هذا التفاعل يجب أن يخضع للتحليل بشكل أكثر تفصيلاً. وعلى وجه الخصوص فإن السمات البنائية للفيزياء الحديثة يجب أن يتم بحثها. إن البناء الكلاسيكي للواقعية دون الذرية اتضح أنه أقوى مما ينبغي. وهذه نقطة في صالح البنائية (حتى إن كانت البنائية كموقف فلسفي لا تستطيع مجاراة النجاحات التجريبية للفيزياء الحديثة وآليات التصحيح الذاتي المتأصلة في صياغة النظرية).

إن المناهج التجريبية والرياضية للفيزياء الحديثة وثيقة الصلة بالافتراضات الميتافيزيقية التقليدية المسبقة للنظريات الفيزيائية المعروضة في الفصل الأول. إنها تهدف إلى تفكيك الظواهر الطبيعية وتجميعها، وتعتمد على قابلية العوامل العلية للفصل في الطبيعة. تتناول الميتافيزيقا التقليدية هذه العوامل العلية من خلال فكرة الجوهر. لقد رأينا بالفعل أن هذا المفهوم قد

صنع من أجل مجاراة مجال الفيزياء الكلاسيكية، على حين يصبح الأمر مثيراً للمشاكل إلى حد بعيد في مجال الكم؛ لذا فإن الفصل الحالي يتناول المشاكل التي ظهرت في الفصل الأول من خلال مناقشتها الآن في سياق الجوانب المنهجية. وفي هذا الصدد، فسوف يتم أخذ العديد من الاعتراضات ضد الواقعية العلمية في الاعتبار بشكل أكثر تفصيلاً. فبعضها ينجم عن التجريبية، والبعض الآخر عن المواقف البنائية. إن بعضها عام تماماً، والبعض الآخر وثيق الصلة بالبنية الخاصة بقوانين مجال الكم. إنها تشترك في الانتماء إلى التقليد الأرسطي بشكل أو بآخر. إنها تعارض الطريقة التي توسع بها الفيزياء الحديثة من مجال الواقعية الفيزيائية.

تُدعى الفيزياء الحديثة بالعلم الجاليلي. ابتكر جاليليو الطريقة المحددة التي تقوم الفيزياء من خلالها بتوسيع مدى الواقعية التجريبية من خلال التجربة والتقنيات الرياضية. يرتكز العلم الجاليلي على ثلاث دعائم:

١- تطبيق الرياضيات.

٢- الأداء النسقي للتجارب.

٣- استخدام أجهزة الملاحظة.

لقد تم بالفعل استخدام الرياضيات في العلم الطبيعي القديم؛ أعني في علم الفلك البطليموسي والاستاتيكا الأرسطيدسية. كان جاليليو أول من طبق ذلك على الحركات الأرضية من أجل بحث الظواهر الميكانيكية. لقد قام بقياسات الحركات الميكانيكية وعبر عن نتائجها من خلال كميات كينماتية^(*)

(*) متعلق بعلم الحركة المجردة. (المترجمان)

من قبيل السرعة والعجلة. قام نيوتن بإضافة كميات دينامية مثل الكتلة. تم تصميم التجارب من أجل وضع شروط معيارية يتم أداء القياسات في ظلها. لقد بحثوا الظواهر تحت شروط اصطناعية مُعرفة جيدًا من أجل قياس كمياتها الفيزيائية. طور جاليليو ونيوتن طرقًا جديدةً للتحليل التجريبي تركز على النماذج الرياضية للظواهر. إن أجهزة الملاحظة حيل تكنولوجية. أتاح تليسكوب جاليليو أقمار المشتري وأوجه الزهرة للرؤية، ولكن بالنسبة إلى خصومه الأرستطيين فكان التليسكوب أداة مصنوعة لا تخدم ملاحظة الظواهر الطبيعية. من هنا استفادت التجارب من الحيل التكنولوجية. إنها تُقدم الملاحظة والقياس جنبًا إلى جنب، كما أنها تمد العلم الحديث بأجهزة ملاحظة جديدة وشديدة التعقيد من قبيل الميكروسكوب الإلكتروني أو حزم أشعة الجسيم ومجسات فيزياء الطاقة العالية المعاصرة.

يهدف العلم الجاليلي إلى الموضوعية العلمية ولكنه يدفع ثمنها. فعلى نحو ما رأينا في الفصل السابق، تعرض الفيزياء وحدة سيمانطيقية يتم التعبير عنها من خلال كميات فيزيائية. إنها تحقق الموضوعية عبر إجراء القياسات والتعبير عن نتائجها من خلال كميات من قبيل الطول، والزمن، والكتلة، والطاقة، والشحنة، ودرجة الحرارة وهكذا. إن هذه الكميات تحل محل الكيفيات الذاتية لإدراكاتنا الحسية. أكد ماكس بلانك أن هذا الإحلال عملية من نزع الصبغة البشرية، يُعوض فيها خسارة ما ندركه من كيفيات حسية مباشرة مكسبًا في الحصول على واقعية رياضية أصيلة فقرة (٢-١). وفي واقع الأمر فإن منهج جاليليو التجريبي فصل من أجل تطبيق الرياضيات على الظواهر. وتأتي عملية صياغة الظواهر في الصبغة الرياضية عبر خطوات

عديدة. إنها تتأسس على ما يُدعى بالأمثلة الجاليلية Galilean idealization، وينتج عنها ظواهر معيارية ونتائجها. تهدف التجربة في المقام الأول إلى تفكيك الظواهر وتجميعها؛ أي العمل على التحليل التجريبي. دعا جاليلو إلى تفكيك الظواهر بالمنهج التحليلي-التجميعي وتجميعها^(١). مثل المنهج التقليدي للتحليل والتركيب خلفية المنهج التجريبي لديه. من ناحية يهدف التحليل التجريبي إلى معايرة الظواهر. كما يهدف من ناحية أخرى إلى التحليل العلي (الفقرة ٢-٢). إن التساؤل حول ما إذا كنا نكتشف الظواهر التجريبية أو نشيدها، وما إذا كنا نكشف عن عللها أو نخترعها، تمت مناقشته في العديد من السياقات الفلسفية. وفي الفقرة (٢-٣) ناقش ونمحص بعض الحجج البنائية الحديثة ضد واقعية النتائج التجريبية ووجود عللها خارج سياق التجربة. وهنا تصير الواقعية العلية أمراً حاسماً (فقرة ٢-٤).

تُعد التجربة إحدى وسيلتين لتوسيع مدى الواقعية التجريبية، على حين تُمثل الملاحظة عن طريق الأدوات التقنية الوسيلة الأخرى. إلا أن امتداد الواقعية التجريبية إلى النطاق الكمي يحمل عبء سد فجوات المفاهيم بين الفيزياء الكلاسيكية ونظرية الكم. إن أجهزة الملاحظة المستخدمة في الفيزياء دون الذرية ليست فقط أكثر تعقيداً من تليسكوب جاليليو. إنها تقوم أيضاً بتوظيف التقنيات شديدة التطور التي يتم استخدامها بالتوافق مع فيزياء الكم. ومع ذلك ينبثق مفهومنا للملاحظة عن عالم كلاسيكي. ما الذي نلاحظه وبأي

(١) انظر: Losee 1993, 57-62. للتجربة غرضها: إنها تهدف إلى دراسة الطبيعة بشكل مستقل. على حين يكون اختبار الفروض النظرية خطوة ثانية في التفاعل بين النظرية والتجربة.

معنى نلاحظ عبر الميكروسكوب الإلكتروني أو كشاف الجسيمات مثلاً؟ وإلى أي مدى يُمكن تعميم التفسير التجريبي التقليدي للملاحظة ليشمل مجال الكم (فقرة ٢-٥)؟ ومع ذلك يظل الزعم بأن كشاف الجسيمات يفيد في ملاحظة الجسيمات أمراً مثيراً للجدل إلى حد بعيد؟ ترى ما هوية ذلك الجسيم دون الذري الذي يمكن ملاحظته؟ ترتبط المشكلة على نحو وثيق الصلة بالتساؤل حول ما إذا كان ممكناً تأسيس موضوعات في مجال الكم. بطريقة أو بأخرى يحالف التجريبي الصواب في رفضه الحديث حول الموضوعات النظرية. ومع ذلك فإن هذا لا يُسلمنا إلى تفسير تجريبي صارم للمحتوى التجريبي للنظريات. وفي الحالة الحاسمة لمسار الجسيم، يكون المحتوى التجريبي للنموذج النظري بناءً كلاسيكياً غير متوافق مع نظرية الكم (فقرة ٢-٦).

١-٢ عرض الكميات الفيزيائية

لا يجب أن تعتمد المعرفة الموضوعية على ملكاتنا الإدراكية الذاتية والشروط الأبيستولوجية. من هنا فإن الزعم بأن العلم يهدف إلى الموضوعية يعني أنه يهدف إلى التخلي عن ذاتية الملاحظ. إنه يركز على الموضوعات التي تؤخذ مستقلة عن وجهة النظر الذاتية للملاحظ. إن الإجراءات الرياضية والتجريبية للفيزياء تسوقنا بعيداً عن فهمنا العادي للواقعية، وبعيداً عن الخبرة الكيفية المعتادة عن الأحداث التي تجرى من حولنا، وبعيداً عن اللغة الطبيعية التي نُعبر من خلالها بشكل طبيعي عن خبراتنا وإدراكاتنا الحسية.

لقد تم تطوير مناهج القياس من قبل إجراء أي تجربة في الفيزياء الحديثة، من أجل التوصل إلى معايير موضوعية للطول والزمن والوزن. كانت القياسات - في أول الأمر - مبنية على المعايير البشرية ولكن في خلال الثورات العلمية التي نتج عنها ظهور العلم الحديث، بُذلت جهود كثيفة لمعايرتها. ومع ذلك بقيت بعض السمات الأساسية نفسها للقياس منذ أيام الهندسة القديمة. يضرب القياس بجذوره في المقارنة^(١). فأن تقيس يعني أن تقارن موضوعًا أو عملية، أو إحدى خصائصها الفيزيائية، بمعيار مثل المعيار المترى. فيؤخذ المعيار وحدة للمقياس. ويتم التعبير عن الخصائص المقاسة من خلال هذه الوحدة. إنه لأمر حاسم أن نقارن الكثير من الموضوعات أو العمليات بالوحدة نفسها. فتناظر خصائصها الفيزيائية مضاعفات الوحدة؛ أي تناظر كميات يتم التعبير عنها من خلال أعداد على المقياس. فيناظر العدد على المقياس خصيصة فيزيائية، كما يناظر في واقع الأمر كل الموضوعات أو العمليات التي تحوز هذه الخصيصة.

من هنا يفيد القياس في تشكيل تصنيفات معرفة جيدًا من الموضوعات أو العمليات الفيزيائية. ويناظر كل تصنيف من الموضوعات أو العمليات خاصية فيزيائية، ولتكن خاصية الطول بمقدار ١ سم، أو البقاء لمدة ٣ نانو ثانية، أو درجة الحرارة بمقدار ٣ كلفن. وتناظر الخاصية الفيزيائية تصنيف الموضوعات أو العمليات التي تتشارك في الخاصية. إن كل تصنيفات النتائج التجريبية يتم التعبير عنها من خلال أعداد حقيقية وأبعاد تخص الكمية موضع البحث من قبيل الطول، والزمن، والكتلة، ودرجة الحرارة. ويعبر كل عدد

(١) انظر: Carnap 1966, Part II، والملحق (أ).

حقيقي عن خاصية فيزيائية من خلال مضاعفات وحدة المقياس المناسب. يتراوح مدى المقياس من صفر إلى ما لا نهاية. إنها تعبر عن تصنيف من الخصائص الفيزيائية، مثل كل قيم الكتلة الممكنة. إنها تناظر كل الخصائص الفيزيائية من هذا النوع^(١). ويمثل مقياس الكتلة الكمية الفيزيائية للكتلة. إن مقياس الكتلة هو التصنيف المجرد من كل تصنيفات الأجسام المادية ذات الوزن المعادل.

من هنا تتمتع الكميات الفيزيائية بسمة مجردة ورمزية، على النحو الذي أكده بيير دوهم تحديداً^(٢). إنها رمزية من حيث إنها مفاهيم تشير إلى موضوعات وعمليات فيزيائية. إضافة إلى ذلك فإن معنى مفهوم فيزيائي مثل "الكتلة" هو مجرد للغاية. إنه لا يكمن في الموضوعات العينية ولكنه يكمن في فئة من الخصائص الفيزيائية مع مقياس كامل من القيم العددية المناظرة. وكل قيمة مقاسة تناظر بدورها فئة من الموضوعات أو العمليات العينية التي تعرض الخصائص الفيزيائية نفسها. إن السير على خطى تفسير فريجه للأعداد كمفاهيم من الدرجة الثانية^(٣)، يؤدي إلى أن تكون الكميات الفيزيائية مفاهيم من الدرجة الثانية أيضاً^(٤):

(١) تكون الخصائص الفيزيائية من النوع نفسه إزاء، وإذا فقط ما أمكن إضافتها، مثل كتلتي جسمين. أما الخصائص الفيزيائية مختلفة الأنواع فيمكن ضربها في بعضها، وإنتاج خصائص جديدة، من قبيل السرعة، وكمية الحركة، والطاقة، ... إلخ. وينشأ عن ذلك جبر الكميات الفيزيائية والمبرهنة الثانية للتحليل البُعدي؛ انظر الملحق (ب) وأيضاً:

Krantz et al. 1971, Chaps. 8 and 10.

(٢) انظر: Duhem 1906.

(٣) انظر: Frege 1884.

(٤) انظر الملحق (أ).

١- تناظر كل قيمة عددية لكمية فيزيائية فئة من الظواهر الفيزيائية المادية التي يعطيها منهج قياس مُعطى، مع وجود هوامش خطأ معينة، نتائج القياس نفسه.

٢- الكمية الفيزيائية - صورياً - هي دالة تقوم بربط فئة من الخصائص بمجموعة الأعداد الحقيقية الموجبة^(١). وهذه المجموعة - المقياس المُدرج لكمية ما - تكون مُعرفة فحسب في حدود اختيار الوحدة.

لذا فإن كل مفهوم لكمية فيزيائية يُشير إلى فئة من فئات الظواهر الفيزيائية المادية - أو إلى فئة من الخصائص الفيزيائية تُشكل مقياس الكمية. يعتقد معظم الفيزيائيين أن صياغة مثل هذه الفئات في الفيزياء يستند إلى الخصائص الفيزيائية الأساسية التي تنتمي إلى الأنواع الطبيعية، وكيانات مثل الذرات، وجسيمات أولية، أو تقوب سوداء لا يُمكن إخضاعها للملاحظة المباشرة. وهذا موقف جوهرى يُشير فيه مفهوم الكمية الفيزيائية إلى الخصائص الجوهرية (أو الكيفيات الأولية^(٢)) للأنواع الطبيعية، أي الكيانات التي تمثل العلة النهائية في حدوث الظواهر الطبيعية وفقاً لخصائصها ذات

(١) ينطبق هذا فحسب على الفيزياء الكلاسيكية إضافة إلى نظريتي النسبية كليهما. أما في النظريات الكمية، فإن الكميات لا تأخذ قيمة واقعية، ولكن قيمة عاملة.

(*) يُنسب التمييز بين الكيفيات الأولية Primary Qualities والكيفيات الثانوية Secondary Qualities إلى الفيلسوف جون لوك. والكيفية الأولية هي صفة للشئ تبدو ظاهرة بشكل واضح بمعزل عن إدراك الإنسان لذلك الشئ. بينما تعتمد الكيفيات الثانوية للشئ على الإدراك الحسى للفرد. المثال التقليدي على الأولى في مقابل الثانية هو الشكل في مقابل اللون. (المترجمان)

الصلة. ومع ذلك يمكن أيضاً تعريف فئة الخصائص المناظرة لمفهوم الكمية الفيزيائية تعريفاً إجرائياً - دون أي ميتافيزيقا جوهرية - عن طريق ربطها بالقياس. وهذا يتطلب تعريف سلسلة من طرق القياس المؤسسة جيداً عبر طرق يمكن بمقتضاها فهم مقياس الكمية فهماً كاملاً^(١).

على نحو مغاير يُعرف كل منهج قياس نوعاً متفرداً من الكمية - وفقاً لإجرائية بريدجمان الجذرية^(٢). فيُظهر موقفه أن المفهوم الإجرائي لمقياس ما يظل مؤسساً على الميتافيزيقا. وتكون صياغة مقياس ما هي إلا بناء نظري على وجه التحديد. يُفترض أن مناهج القياس المتميزة تقيس نوع الخاصية الفيزيائية نفسه حين تتعامل مع وحدات مختلفة مثل الطول، أو الزمن، أو الكتلة، أو درجة الحرارة. تؤسس المقاييس من مقياس بلانك وحتى حجم الكون كما لو لم تكن ثمة فجوة من حيث المفاهيم بين مجال الكم والعالم الكلاسيكي. تُمثل مقاييس الكميات الفيزيائية العالم العقلي النظري للفيزياء الحديثة تماماً كما لو لم تكن ثمة مثل هذه الفجوة. إن بناء هذا العالم العقلي النظري يتأسس على افتراض ميتافيزيقي حاسم. فيستفيد من اعتقاد نيوتن أن "الطبيعة متوافقة مع نفسها للغاية"^(٣). يرتكز هذا البناء على الثقة في أن تأسيس وحدة سيمانطيقية للفيزياء لا ينشأ عنه تناقض^(٤).

(١) انظر: Falkenburg, 1997، والملحق (أ).

(٢) انظر: Bridgman 1927.

(3) Newton 1730, Query 31.

(٤) سوف أعود إلى مناقشة هذه المشكلة في الفصل الخامس، بعد مناقشة مناهج القياس النمطية لفيزياء الجسيمات في الفصلين الثالث والرابع.

لا يعتقد دوهم سواء في الأنواع الطبيعية ولا في وحدة الطبيعة. فقد دافع عن تفسير ضد-ميتافيزيقي للغة المجردة والرمزية للكميات الفيزيائية. بحسب دوهم فإن المفاهيم والقوانين والنظريات الفيزيائية لا تمثل الأشياء أو الأحداث كما الأوركسترا. كما أنه لم يعتبرها عناصر للوصف الصادق لواقع فيزيائي ينبع في الأساس من الظواهر القابلة للملاحظة على هيئة خصائص جوهرية وعلل حقيقية⁽¹⁾. من وجهة نظر دوهم فإن المفاهيم المجردة للنظرية الفيزيائية مجرد وسائل، إنها أداة للتوحيد والتنبؤ. فأكد أن تعريفاتها دائماً ما تشتمل على درجة معينة من الاعتبارية، وأنها تهدف في المقام الأول إلى جمع -قدر ما تستطيع- أكبر عدد من الظواهر المتميزة كميّاً - بأكثر الطرق اقتصاداً - في حزمة واحدة. بالنسبة إلى المسألة الأولى فقد مال تجاه رؤية بوانكاريه الاصطلاحية للفيزياء. على حين كان قريباً في المسألة الثانية من وجهة نظر إيرنست ماخ التجريبية للنظريات الفيزيائية. لا تهدف النظريات الفيزيائية - وفقاً لماخ - إلا إلى أمثلة اقتصادية للظواهر التجريبية، ولا ينتمي افتراض وجود الذرات إلى أمثلة اقتصادية من هذا القبيل.

على النقيض من ذلك دافع مؤسسو فيزياء القرن العشرين عن الواقعية الفيزيائية. فقد كانوا على قناعة بأن الكميات والنظريات الفيزيائية تستهدف الخصائص الجوهرية والسمات البنوية للأشياء والعمليات العلية في الطبيعة. لقد كان كل من "بولتزمان" و"أينشتاين" و"رذرفورد" و"بور" علماء ذرة، ساهم

(1) في إطار القاعدة الأولى لنيوتن من قواعد التفكير في الفلسفة. (Newton 1729, 398)

كل منهم تحديداً بصفة شخصية في مجال أبحاث الذرة^(١). نأى ماكس بلانك بنفسه وبحسم - في محاضراته عن وحدة المنظور الفيزيائي للعالم ١٩٠٨ - عن تجريبية ماخ والتصور الظاهراتي للفيزياء، وقام بعرض رؤية واقعية وجوهريّة - إن لم تكن أفلاطونية - للغة المجردة للنظرية الفيزيائية. تهدف صياغة المفاهيم الفيزيائية - وفقاً لبلانك - إلى تحرير فهمنا للطبيعة أكثر فأكثر من المفاهيم المؤنسة.

على هذا النحو فقد حررنا تطور المفهوم الكلاسيكي للقوة في الميكانيكا الكلاسيكية من فكرة القوة الفيزيائية التي يجب تطبيقها من أجل بذل الشغل^(٢)، على سبيل المثال، عندما نريد أن نرفع جسمًا^(٣). لا يعتبر بلانك - على خلاف ماخ - المسافة المتزايدة بين النظرية الفيزيائية والخبرة الحسية المباشرة خسارة، بل مكسبًا، أو بعبارة أكثر ملاءمة، هي المكسب في عينه الذي يتجاوز بمراحل ما قد يرتبط به من خسارة:

(١) انظر: Scheibe 2001.

(*) الشغل work في الفيزياء: هو كمية الطاقة المتحولة لتحريك جسم بتأثير قوة ما لمسافة معينة. ومن الممكن أن ينعقد الشغل حتى في حالة وجود قوة مؤثرة، مثل القوة الطاردة المركزية في الحركة الدائرية لجسم حيث ينعقد الشغل نتيجة عدم تغير طاقة حركته، ومثال آخر عند وضع كتاب على منضدة؛ فالمنضدة لا تبدل شغلاً على الكتاب على الرغم من وجود قوة رد فعل منها عليه مساوية لوزنه وفي عكس اتجاهه؛ لأنه لم يتم نقل طاقة من الكتاب أو إليه . ويُمكن تعريف الطاقة بوصفها القدرة على أداء الشغل. ووحدة قياس الشغل الفيزيائي حسب النظام العالمي للوحدات هي الجول (Joule)، ذات الرمز "J"، كما يرمز للشغل بالحرف "W". (المترجمان)

(2) Planck 1965, 30.

"إذا ما نظرنا وراء إلى الماضي، فممكن أن نخلص إلى القول: إن بصمة التطور الماضي للفيزياء النظرية هو توحيد لنظامها تم تحقيقه من خلال تحرر من نوع ما من العناصر المؤنسة، وخاصة الإحساسات [...] وبالتأكيد، فالمزايا يجب أن تكون بالغة القيمة، إذا ما استحقت تلك التوضيحية الأساسية خاصة!"⁽¹⁾.

وتكمن "المزايا بالغة القيمة"، كما استرسل "بلانك" في التوضيح، في زيادة وحدة المنظور الفيزيائي للعالم. ويعنى هذا - بالنسبة إليه - ما هو أكثر بكثير من مجرد الاقتصاد في التفكير في تصور "ماخ". فهو يؤكد أن توحيد النظريات يؤدي إلى شمولية فيزيائية. والوحدة المفهومية لنظرية شاملة - تلك النظرية التي تستند فقط إلى أسس قليلة التي تكون أكثر تحرراً قدر الإمكان من الظروف المعينة التي ندرك من خلالها الظواهر الطبيعية - تجعل من نتائج البحث الفيزيائي مستقلة عن المكان والزمان، وعن فردية الباحث، وعن الأمة والثقافة⁽²⁾. وطبقاً لـ"بلانك"، فالمنظور الموحد للعالم يفوق على نحو نهائي فكرة ضبط نظريتنا على الوقائع، على النحو الذي طالب به ماخ⁽³⁾. إن الشمولية الفيزيائية إذ تحرر ما لدينا من معرفة علمية من عوارض الوجود الإنساني، تؤدي إلى ظهور واقع ثابت خلف المتغيرات والظواهر الحسية المتشعبة:

(1) Planck 1965, 31. من ترجمتي

(2) Planck 1965, 45.

(3) انظر: Mach 1926, 164.

"كما حاولت أن أوضح، فالمنظور الثابت الموحد للعالم هو على وجه التحديد الهدف الثابت الذي ينشده العلم الطبيعي، بكل تحولاته. [...] وهذا الثابت المستقل عن أي فردية إنسانية أو بالأحرى عقلية، هو تحديداً ما ندعوه بالواقعي⁽¹⁾.

تتكون اللغة الرمزية للفيزياء - وفقاً لدوهيم - من مجرد رموز تبتعد عن الواقعية. تحقق هذه اللغة - وفقاً لماخ - أفضل ضبط ممكن لأفكارنا على الوقائع مع دفع ثمن التجريد، والتبسيط، ورسم المخططات، والأمثلة⁽²⁾. من ناحية أخرى يرى بلانك أن هذه اللغة هي ما تؤدي أولاً إلى إدراك الواقع الثابت.

من الجلي أننا نجد أنفسنا هنا إزاء مفاهيم معاكسة بكل ما في الكلمة من معنى لما هو واقعي. تكمن الواقعية وفقاً لدوهيم وماخ في الظواهر التي يمكن ملاحظتها دون وسيط. ويُعرفها دوهيم - الفيزيائي التجريبي - بالنتائج الملاحظاتية التي نحصل عليها عبر تجارب الفيزياء. على حين يراها ماخ، الظاهراتي، في العناصر الأساسية لإحساساتنا - في ذرات الحس؛ لذا يمكن القول: إنها بديل الذرات الفيزيائية لبولتزمان، أو بلانك، أو أينشتين، أو رذرفورد، أو بور⁽³⁾. ومع ذلك يرى بلانك أن ثمة واقعية ثابتة توجد خلف العرض المتغير للظواهر التي تصل إلينا عبر الإدراك الحسي. إذ إن هذا

(1) Planck 1965, 49.

(2) See Mach 1926, 455.

(3) من الجلي أن ظاهراتية ماخ أكثر أصولية من أداتية دوهيم أو النسخ الحديثة من ضد- الواقعية العلمية. تَبَيَّنَ هذه الوجهة من النظر كارناب في كتابه "Der logische Aufbau der Welt"، ولكنها نُبذت فيما بعد من قبل تجريبية القرن العشرين.

العرض للظواهر الحسية مشروط، من ناحية بملكاتنا الإدراكية التي يتعين على الفيزياء أن تحرر نفسها منها قدر الإمكان، ومن ناحية أخرى بالقوانين الثابتة لواقعية ضمنية، والتي لا يمكن فهم تكوينها إلا عبر هذا التحرر.

لذا فإن التعارض الذي عرضنا لها بين واقعية بلانك العلمية وتجريبية ماخ أو موقف دوهم الأدا تي يضرب بجذوره في مناهج الفيزياء الحديثة وأهدافها. تهدف اللغة المجردة للكميات الفيزيائية إلى تأسيس موضوعية علمية. ولكن ما مُنجزات هذه الموضوعية العلمية؟ هل تكشف عن واقعية فيزيائية مستقلة تُشكل أساسًا للظواهر؟ أم هل تستبدل البناءات الرياضية بالظواهر؟

٢-٢ الأمتلّة والمنهج التجريبي

ليست القياسات هي الطريقة الوحيدة لصياغة الظواهر رياضياً؛ إذ إنها تسير جنباً إلى جنب مع العديد من الأنواع الأخرى للأمتلّة. ففي السجل بشأن الواقعية العلمية، نجد أن القياسات بأسرها موضع الشك في ابتعادها عن الواقع التجريبي بدلاً من الكشف عن القوانين الصادقة للطبيعة. ويظهر تحليلاً أعمق أن بعض أنواع الأمتلّة تكون على نمط العلم الجاليلي والنيوتوني، على حين كانت بعضها كذلك من قبل. تقترح الدراسة التي قام بها ماکمولين لرموز الأمتلّة الجاليلية التمييزات التالية^(١):

(1) McMullin 1985.

إنني أتوسع في تصنيفه عبر أخذ القياس في الحُسبان، مع تغيير طفيف في المصطلحات المستخدمة. انظر أيضاً: Hiittemann 1997, 86-104. إن الأمتلّة =

١- الأمثلة الرياضية. فرض الصورية الرياضية على الظواهر:
- القياس.

- الوصف الرياضي.

٢- إنشاء النموذج. إحلال نموذج بسيط محل موضوع معقد:

- أمثلة صورية، أو تمثيل مناسب.

- أمثلة مادية، أو تجريد.

٣- التحليل العلي. إحلال نموذج علي بسيط محل عملية معقدة:

- تحليل تجريبي.

- تجارب ذهنية.

إن الأمثلة الرياضية بالغة القدم. فيعود إجراء التجارب وتقديم التوصيفات الرياضية لظواهر معينة إلى أيام علوم الهندسة والفلك قديماً. إن نوعي الأمثلة الرياضية كليهما يمكن أن يأتيا بشكل أكثر أو أقل دقة. وكثيراً ما تركز التوصيفات الرياضية على التقريب وإجراءات التصحيح. فطالما كانت عملية التقريب الفكرة الأساسية بالفعل خلف النسق الفلكي المعقد البطلمي. وأى انحرافات ملاحظة عن المسارات الكوكبية محل التنبؤ كان يتم رصدها من خلال أفلاك التدوير^(*) ومركز الدائرة المرسومة خارج مثلث

"الصورية" و"المادية" لدى ماكملان تُناظر الأمثلة عند هوثيمان بالمعنى الضيق (وهو ما أسميه فيما يلي بـ"الأمثلة المناسبة")، و"التجريد". إن أيّاً من هذه التميزات ليس حاسماً. إنها تُعطي صورة مبدئية للأشكال المتعددة التي لا تتوافق بها البنى الرياضية مع الظواهر التجريبية التي تحل محلها.

(*) فلك التدوير: دائرة صغيرة يدور مركزها على محيط دائرة أكبر منها. (المترجمان)

وما إلى ذلك. وبحسب تحليل "فورير" الحديث، فإن أي ملاحظة يمكن أخذها في الاعتبار بالقدر المرغوب فيه من الدقة. ويُظهر هذا المثال أن الأمثلة الرياضية في حد ذاتها لا تُقيم بالضرورة أبنية من الظواهر. يؤكد ماکمولين أن "حد الأمثلة يتناقص باستمرار بقدر ما أصبحت اللغة الرياضية نفسها متكيفة بشكل متزايد مع مرامي "العلوم الطبيعية"⁽¹⁾. يهدف القياس أيضًا إلى إنقاذ الظواهر بالصرامة الرياضية. إلا أن نطاق ما يمكن ملاحظته لم يتزايد بعد عن طريق القياس التقريبي لبعض الظواهر التجريبية بدلالة بعض الوحدات التجريبية المتاحة (من قبيل المتر المعياري). ومع ذلك فمن الواضح أنه يحقق تقدمًا حين نؤسس مقاييس الكميات الفيزيائية من مقياس بلانك إلى حجم الكون في الفيزياء الحديثة.

ومع ذلك تأتي التوصيفات الرياضية والقياس في العلم الجاليلي معًا بأنماط جديدة من الأمثلة. فيتجاوز تأسيس النموذج، والتحليل العلي، والمنهج التجريبي نطاق ما يمكن ملاحظته.

فيحل تأسيس النموذج محل موضوع معقد عن طريق نموذج ذي بنية بسيطة. إن تأسيس النموذج يأتي على نمط الفيزياء الرياضية نفسه؛ إذ لا يتم تصميم النموذج من أجل تقديم توصيف صادق. ويتم تعمد أن يكون لها بنية تختلف عن الموضوعات المنمذجة. ويتم تأسيسها من أجل الحصول على توصيف رياضي بسيط لموضوع محل بحث. إن الأمثلة الصورية أو الأمثلة الملائمة تجعل من التوصيفات الصورية عملية. يمكن العثور على بعض الأمثلة النمطية في: وصف الميكانيكا الكلاسيكية للأجسام ككتلة نقطية

(1) Ibid., 254.

والأنساق ذات الجسمين بدلالة الكتلة المفقودة. يقوم النموذج الذري لبور باستخدام تقريب الكتلة اللامتناهية لنواة الذرة ويتجاهل الآثار النسبوية. تتعامل الديناميكا الكهربية الكلاسيكية مع عدد لا متناه من الأسلاك أو ألواح التكتيف من أجل تبسيط شروط التحديد لمعادلات ماكسويل وإتاحة عدد من الحلول يمكن إحصاؤه. وفي مثل هذه الحالات يصير النموذج أكثر بساطة صورياً من الموضوعات المنمذجة. وعلى خلاف الأمثلة الصورية، نجد أن الأمثلة المادية أو التجريد طريقة لإهمال خصائص فيزيائية معينة، أو جوانب مادية أو بُنى داخلية للموضوعات محل البحث. لا تُعين النظرية الحركية البنية الداخلية لجزيئات الغاز. بطريقة مماثلة لا يأخذ نموذج رذرفورد لتشتت جسيمات "ألفا" على شريحة الذهب في اعتباره حجم نواة الذرة. وفي كلتا الحالتين يمكن تصحيح ذلك عبر نماذج أكثر تعقيداً للموضوعات موضع البحث. ففي حالة تشتت رذرفورد يتم هذا عن طريق إدخال معاملات الشكل إلى جهد "كولوم" البسيط^(١).

ويمكن تنقيح الأمثلة شديدة الفجاجة في تأسيس النموذج عبر عملية عكسية من نزع الأمثلة. فيبدأ المرء من أكثر البنى أو توصيفات الأنساق بساطة وينظر إلى أي مدى تُفسر الظواهر ذات الصلة. ويكرن النموذج جيداً إذا ما أمكن تحسينه عن طريق إجراء التصحيحات. ويعني هذا أنه تتم إضافة مواصفات خصائصها غير المتعينة. فإذا ما كان النموذج جيداً، فلن تكون هذه الإضافات ذات صلة، وسيؤدي النموذج المُخصص تنبؤات مُحسنة. وبهذه الطريقة، يعقب عملية الأمثلة إعادة بعض السمات المحذوفة للموضوع

(١) انظر الفصل الرابع.

موضع البحث، أي عبر نزع الصبغة المثالية عنه. ويُبرر هذا الإجراء النجاح التجريبي. يذهب ماکمولين إلى أن تأسيس النموذج عبر سبل الأمثلة ونزع الأمثلة هو "حامل-لصدق بمعنى قوي للغاية"؛ وتُظهر التحسينات أن للنموذج "سبل تصحيح-ذاتي تمثّل أفضل بيئة على الصدق"⁽¹⁾. لذا فإنه يرى أن تأسيس النموذج يكون على قدم المساواة مع التوصيف الرياضي. وتُشبه عملية إعادة بعض العناصر المحذوفة عملية التقريب. وتُتيح عملية نزع الصبغة المثالية رصد الظواهر بشكل أكثر دقة وخطوة بخطوة.

يختلف التحليل العلي عن ذلك وفقاً لماكمولين؛ إذ يهدف إلى تفكيك العوامل أو الأدوات العلية الفردية التي تنشأ عنها عملية عليّة مُعقدة. يستند التحليل العلي إلى الأمثلة أيضاً؛ إذ يركز على الافتراضات التالية:

١- تعمل العوامل العلية المختلفة عملها بشكل مستقل.

٢- بعض من هذه العوامل ذو صلة وبعضها يمكن تجاهله.

٣- يُمكن عزل العوامل العلية ذات الصلة.

٤- تتضافر تأثيرات هذه العوامل خطياً.

يتم تنفيذ التحليل العلي في التجارب الواقعية وأيضاً في حالة التجارب الذهنية. تستقصى التجارب الواقعية عوامل عليّة مختلفة وتجميع آثارها تحت الظروف التجريبية المختلفة. والأمر الحاسم هو تنويع الظروف التي يتم في إطارها تنفيذ التجربة؛ فما من تجربة تأتي بمفردها⁽²⁾. تمتحن التجارب

(1) Ibid., 264.

(٢) انظر: Falkenburg and Ihmig 2004.

الذهنية الانسجام الداخلي للتفسيرات العلية. كما أنها يُمكن أن تُؤدَّى في الواقع أو لا تُؤدَّى. وفي الحالة الثانية تكون مفارقة للواقع^(*) counterfactual. يناقش ماکمولین هذه الحالات لأبحاث جاليليو عن سقوط الأجسام الميكانيكية. ينتج عن التحليل العلي التمييز بين السقوط الحر وتأثير مقاومة الهواء. ويتكون التحليل التجريبي من التجارب الشهيرة للسطح المائل والبندول. ويؤكد تنوع الظروف التي يتم تحتها إجراء التجربة فرض أن مقاومة الهواء تعوق السقوط الحر وأن السقوط الحر يسلك وفقاً لقانون التسارع الثابت. ويتم تصميم التجارب الذهنية من أجل بيان أن افتراضات أرسطو بشأن سقوط الأجسام محض هراء وأن الحد من تأثير مقاومة الهواء وصولاً إلى حالة تحييد هذه المقاومة في حالة السقوط في خلاء سوف يجعل من الممكن فيزيائياً عزل السقوط الحر كقوة عليّة وحيدة⁽¹⁾.

هل من الممكن تفسير نتائج الأمثلة العلية من خلال الصدق (التقريبي)، ونتائج العملية التدريجية العلية لنزع الصبغة المثالية من خلال التقريب الآخذ في التحسين؟ يهدف التحليل العلي - وفقاً لجاليليو أو نيوتن - إلى إدراك العلل الحقيقية للظواهر الطبيعية، في إطار القاعدة الأولى من قواعد التفكير عند نيوتن⁽²⁾. الواقعية العلية - وفقاً لماكمولين - بعيدة عن أن تكون واضحة؛ إذ يلاحظ أن:

(*) عبارة شرطية يكون معلوماً (أو على الأقل يُعتقد) أن الحد الأول فيها منافٍ للواقع. (المترجمان)

(1) McMullin 1985, 266-237, and Galileo 1638.

(2) Newton 1729, 398 and 1687, 794.

تعتمد المسألة على التكنيك الذي طالما عُرف بـ"تركيب العلل"، وهو التكنيك الذي استخدمه كلُّ من جاليليو ونيوتن وإن كان سبب لكل منهما المتاعب. [...] وسوف أُلخص إلى أن النجاح الباهر للعلوم الطبيعية منذ عصر جاليليو يوفر بيئة كافية على قيمة تكنيك الأمثلة العلية [...].

في واقع الأمر لا تدعُ هذه النتيجة الواقعية العلمية. إذ تُعبر عن تفسير أداتي للعوامل العلية التي تتبثق عن التحليل العلي والمنهج؛ التجريبي لجاليليو. تُدافع حجج ماکمولين عن الواقعية البنوية فيما يختص بالأمثلة الرياضية وتأسيس النموذج، إلا أنها لا تدافع عن الواقعية العلية فيما يختص بالعلل التي تقف وراء الآثار التجريبية. فهل هو محق في ذلك؟

يهدف منهج جاليليو التجريبي - مثل القياس - إلى تأسيس موضوعية علمية. إنه يهدف - مثله في ذلك مثل الكميات الفيزيائية - إلى صياغة الظواهر رياضياً. دعونا نلقي نظرة عن كثب على الطريقة التي يعمل بها. إنه يهدف إلى عزل جوانب جزئية معينة من الظواهر الطبيعية وتحليلها تحت أفضل الظروف المثالية الممكنة. فيتم تصميم التجارب في الفيزياء من أجل الحصول على ظواهر معزولة، ومُطرّدة، وقابلة للتكرار، ويتم تنويعها بطريقة خاضعة للتحكم. ولا يصير تطبيق الرياضيات على الظواهر الطبيعية ممكناً إلا عبر تفكيك الظواهر إلى مكونات قياسية معزولة. أما الأثر القابل

= تم فهم بحث نيوتن عن العلل الحقيقية بشكل كامل في إطار الواقعية العلية، إلا أنه كان في واقع الأمر أكثر حذراً، انظر ما سيلبي.

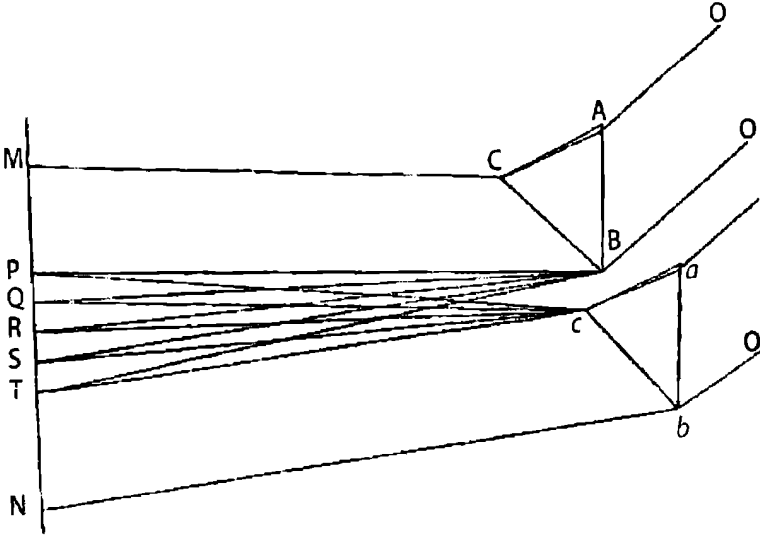
للملاحظة في ترتيب تجريبي ما - من ذلك النوع الذي يُمكن أن ينتج عشوائياً في تجربة محكمة - فهو وحده الذي يُمكن تناوله كعنصر من فئة مُعرفة جيداً من الظواهر الفيزيائية المتجانسة التي تصير أنثذ قابلة للتوصيف الرياضي.

وهكذا يفيد المنهج التجريبي في توليد فئات من الظواهر مُعرفة جيداً وبحث العلاقات النسقية لعناصرها. وتفيد نتائج التجارب في القياس، إنها تناظر الخاصية المجردة والرمزية للكميات الفيزيائية. تبحث التجارب، إضافة إلى ذلك، التوافق الدالي للكميات الفيزيائية. فيتم تصميم كل تجربة من أجل تفكيك العمليات الطبيعية المُعقدة إلى مكونات مُحددة، ويتم تنويع تركيباتها بشكل نسقي من أجل قياس القيم العددية والعلاقات الدالية للكميات الفيزيائية. وبهذا النهج تؤسس التجارب ظواهر مستقرة وقوانين ظاهراتية، وهي حين تفعل ذلك؛ تُشكل الموضوعية العلمية.

إن السمات البنائية للمنهج التجريبية هي مما لا يُمكن غض الطرف عنه. يقوم المنهج التجريبي بجعل الظواهر ملائمة لتطبيق الرياضيات وليس العكس. ويؤدي هذا إلى التأسيس المفهومي والفعلي لعوامل عليّة منفصلة تختص بتوليد ظاهرة ما. ومتى تم اعتبار هذه العوامل العلية قوى عليّة منفصلة، يُمكن تصورها بالمصطلحات الميتافيزيقية للجوهر والعلية.

لقد رأينا بالفعل كيف يهدف تنويع الظروف التي يتم تحتها إجراء التجربة إلى التحليل العلي. تهدف بعض التجارب أيضاً إلى إعادة تجميع هذه المكونات. يمكن أن نجد في "بصريات" نيوتن قياساً كيفياً بسيطاً من هذا النوع. فيتم تحليل الضوء الأبيض عبر تمريره على منشور. ويتطابق الطيف

اللون الناتج مع الطيف الناتج عن مرور ضوء أبيض عبر منشور آخر مواز. وتكون النتيجة هي إعادة تجميع الضوء الأبيض من الطيفين^(١).



شكل (١-٢) التفكيك الطيفي وإعادة تجميع الضوء الأبيض

(نيوتن ١٧٣٠، ص ١٤٧)

من وجهة نظر نيوتن، فإن القوى العلية التي تم بحثها في هذه التجربة هي مكونات الضوء الأبيض. يقوم نيوتن في تحليله العلي للتجربة بتعريف هذه المكونات باعتبارها خيوطاً من الأشعة البيضاء لألوان مختلفة وليست جسيمات بيضاء. وهو يضع كل الأسئلة الميتافيزيقية بشأن طبيعة الضوء في الجزء الخاص بالتساؤلات في كتابه البصريات. ويغض الطرف في نظرياته الفيزيائية عن القوى العلية للطبيعة طالما أن كمياتها الفيزيائية لم تكن خاضعة

(1) Newton 1730.

لتحليل وقياس تجريبيين. وبهذا الشكل فإنه يقوم بعقد مصالحة بين عالم من الكميات الفيزيائية وقوله المأثور ذائع الصيت لا توجد فروض^(*) hypotheses non fingo⁽¹⁾.

في إطار الفلسفة الطبيعية في القرن السابع عشر، أُطلق على التفكير العلي والتجميع منهج التحليل والتركيب. كما أُطلق على منهج جاليليو التجريبي المنهج التجميعي-التفكيكي⁽²⁾. وفي واقع الأمر فإن التجميع والتفكيك ما هي إلا الكلمات اللاتينية للتعبيرات اليونانية "التحليل" و"التركيب".

(*) لم يقصد نيوتن بعبارته هذه رفض الفروض من أي نوع، وإنما إنكار الفروض التي هي من قبيل التخمينات والخيالات التي كانت سائدة في العصور الوسطى. يؤكد هذا الفهم وضع عبارة نيوتن في سياقها؛ حيث جاءت في سياق رده على الديكارتيين الذين أخذوا عليه أنه قد أتى في قوله بالجاذبية بفرض يكاد يشبه فروض رجال العصور الوسطى الزائفة، فقال: إنني هنا لم أت بفرض، وأنا هنا لا أفترض فروضاً؛ بل أسير وفقاً للقواعد.

ولقد ذهب مل Mill في كتابه "تسق المنطق" إلى أن نيوتن لم يرفض الفروض العقلية التي يمكن التحقق منها؛ بل رفض فحسب تلك الفروض غير القابلة للتحقق، مثل الفروض الميتافيزيقية، أما الفروض التي يمكن التحقق منها فهي خطوة ضرورية لا بد منها لكي يتقدم العلم، وتتضمن نظريات نيوتن كلها فروضاً من هذا القبيل؛ وهذا عين ما ذهب إليه فيلسوف العلم المبرز في الشطر الثاني من القرن العشرين كارل بوبر.

للمزيد من التحليل الدقيق والمفصل لمنهج نيوتن وما استند إليه من مفاهيم وفروض انظر الفصل الأول من: محمد عثمان الخشت، العقل وما بعد الطبيعة؛ تأويل جديد لفلسفتي هيوم وكانط، مكتبة ابن سينا، ١٩٩٥. (المترجمان)

(١) انظر: Falkenburg and Ihmig 2004.

(٢) انظر: Losee 1993, 57-62.

وبقيت المصطلحات الأخيرة حتى يومنا هذا بمعناها الحرفي في لغة الكيمياء. وفي القرن السابع عشر تعايشت العديد من تنويعات منهج التحليل والتركيب. أما تفسير نيوتن له فقد كان بالغ التعقيد. فقد كان إجراءً مُعقداً يتراوح جيئةً وذهاباً بين الظواهر التجريبية والنماذج الرياضية، عن طريق التنويع المُتكرر للظروف التجريبية وضبط المبادئ الرياضية⁽¹⁾. لقد كان قريباً مما لا يزال الفيزيائيون يفعلونه حتى اليوم حين يقومون بتصميم التجارب وتأسيس النماذج الرياضية من أجل بحث مجال فيزيائي جديد.

لذا فالقول: إن التجارب تهدف إلى التحليل العلي يُعادل القول: إن التجارب تهدف إلى عزل القوى العلية التي يُمكن فصلها عن بعضها البعض. وتعتبر الواقعية العلية أن هذه القوى العلية تعمل منفصلة، ككيانات لها استقلاليتها. وبمجرد أن يتم النظر إليها بوصفها حوامل مستقلة للخصائص الفيزيائية، فإنها تُؤول بوصفها جواهر بالمعنى التقليدي. ولا ينبغي هنا أن نخطو من العوامل العلية إلى القوى العلية، ومن واقعية نيوتن للكميات الفيزيائية للواقعية العلية الحديثة. ومع ذلك فإنها خطوة صغيرة تماماً. فالمناهج التجريبية لجاليليو ونيوتن ليست مُحايدة ميتافيزيقياً. إنها تهدف إلى توليد ظواهر قياسية وإلى عزل القوى العلية بالخصائص البنوية للجواهر الميتافيزيقية.

(1) تعود جذور منهج نيوتن للتحليل والتركيب إلى الهندسة القديمة؛ انظر: Ihmig 2004. وهو وثيق الصلة بتفسير فرانسيس بيكون للاستقراء الذي يتميز بالصعوبة نفسها؛ انظر: Falkenburg and Ihmig 2004.

٢-٣ الكشف أم التصنيع؟

إن القوى العلية النمطية في الفيزياء الحديثة هي القوى، والمجالات، والذرات، ومكونات المادة فيما دون الذرة. والتساؤل حول ما إذا كان المنهج التجريبي يكتشف مثل هذه الكيانات أم يُوجدها يضرب بجذوره في الماضي البعيد. يمتد صدى هذا التساؤل من التجريبية الإنجليزية إلى المثالية الألمانية إلى فلسفة العلم الحديثة. رفض هيغل وبيركلي، سيراً على درب الأرسطي، واقعية الذرات والقوى^(١). اقترح كوهين، في إطار الكانطية الجديدة، أن الواقعية الخفية للفيزيائي تُمثل بناءً نظرياً، ومن ثم عارض تجريبية ماخ لأسباب أخرى مخالفة تماماً لبلانك^(٢). يُعد الفيزيائي إدينجتون أبرز من أصروا على السمات البنائية للفيزياء الحديثة. فقد قارن بناء المعرفة الفيزيائية بشبكة لا تصطاد إلا سمكاً له حجم أدنى مُعين^(٣). وهذه نقطة بنائية تقترب من الأبستمولوجيا الكانطية من خلال الجوانب التالية: تعتمد معرفتنا الفيزيائية على شروط أبستمولوجية معينة؛ وتفرض النظرية الفيزيائية والمنهج التجريبي بنية قبلية على الظواهر. تركز الموضوعية العلمية، بحسب إدينجتون، على ذاتية انتقائية. وعلى المنوال نفسه يُثير الشكوك بشأن نتائج المنهج التجريبي:

(١) انظر:

Berkeley 1721 and Bredert 1969; Hegel 1830, § 266 and § 276; Falkenburg 1993c, 1998a.

(2) Cohen 1896 and Falkenburg 2000, 316-317.

(3) Eddington 1939, 16.

إنني بصدد طرح التساؤل التالي - ما مقدار ما نكتشفه وما مقدار ما نصنعه عن طريق تجاربنا؟ حين أظهرنا اللورد رذرفورد المتأخر على نواة الذرة، فهل كان يكشف عنها أن يصنعها؟ أيًا ما كان الأمر فلن يتأثر إعجابنا بإنجازها - كل ما في الأمر أننا نود معرفة ما فعله. هذا تساؤل نادرًا ما يحظى بإجابة مُحددة^(١).

في سبيله لمعارضة الواقعية الساذجة، يدافع إدينجتون عن ضد-الواقعية. يُقدم إدينجتون اعتراضات مُعددة وجوهرية ضد واقعية القوى، والمجالات، والمكونات دون الذرية للمادة، وترتكز هذه الاعتراضات على معرفة وثيقة بنظريات النسبية والكم. ومؤخرًا تم إثارة اعتراضات من هذا القبيل في فلسفة العلم وتاريخه، وإن افتقد الكثير منها لبراعة إدينجتون. تأثرت الفيزياء الحديثة بثلاثة أنواع من الطرق البنائية في الفهم - أو سوء الفهم - كما يلي^(٢):

١- البنائية الاجتماعية.

٢- العلية التداخلية.

٣- التجريبية البنائية.

(1) Eddington 1939, 109.

(٢) إنها تُولف مواقف فرعية من المواقف (٥)، و(٤) على التوالي، من القائمة الموجودة في الفقرة ١-٢. ثمة قائمة أكثر تفصيلاً للمواقف البنائية حديثًا في المرجع: Scheibe 1997, 9-29.

١- البنائية الاجتماعية

حفزت فرضية "توماس كون" عن أن ثمة لا مقياسة بين النظريات المتنافسة هذه النسخة من البنائية. تتبنى فرضية كون في اللا مقياسية الدعوى السيمانطيقية بأن مفردات اللغة للنظريات المتنافسة بالغة التميّز إلى درجة تجعل من الترجمة التي لا تخلو من الالتباس أمراً مستحيلاً، والزعم الأنطولوجي أن النظريات المتنافسة ترتبط بخلفيات نظرية غير متوافقة^(١). تقوم البنائية الاجتماعية على وجهة النظر بأن مثل هذه الأنطولوجيات أو المنظورات العلمية المختلفة تعتمد على الثقافات العلمية، بمعنى أنها تعتمد على التطور الخاص بمدارس المجتمع العلمي. واتفاقاً مع وجهة النظر هذه، يركز علماء الاجتماع فقط على العوامل الخارجية والثقافية الاجتماعية التي تطورت النظريات العلمية في ظلها. وحتى هذه النقطة تكون الأمور على خير ما يرام.

فلن ينكر أحد أن الفيزياء الحديثة قد تطورت في ظل ظروف اجتماعية محددة جداً كانت ضرورية لظهور الميكانيكا الكلاسيكية ونظرية المجال والديناميكا الحرارية والنسبية وميكانيكا الكم وهلمّ جراً. ومع ذلك تتعرض الفيزياء الحديثة لسوء فهم فح إذا ما تم خلط هذه العوامل الخارجية مع الشروط الكافية لنمو النظرية. ثمة نزعة قوية حالياً في علم الاجتماع وتاريخ العلم لإهمال العوامل الداخلية لنمو النظرية؛ أعني المنهجية العلمية والمعايير الداخلية لقبول النظريات العلمية^(٢).

(1) Kuhn 1970.

(٢) انظر: Knorr-Cetina 1981, 1999; Latour and Woolgar 1979. يؤكد داستون (Daston 2000, 2-3) أن الدراسات التاريخية لبزوغ الأشياء العلمية واختفائها تلتقي =

يُعد كتاب "بيكرينج" تشييد الكواركات" من نماذج وجهة النظر السوسولوجية المتطرفة لتطور النظرية في الفيزياء^(١). إنها تأتي مصاحبة لسلطة النظري في الفيزياء، وتدافع عن رؤية أن نموذج الكوارك في فيزياء الجسيمات الحالية هو بناء اجتماعي للمجتمع العلمي. لقد كان الكتاب مؤثرًا في سوسولوجيا العلم. إنه يجمع تاريخًا بالغ التشويق والسحر لمدارس فيزياء الجسيمات النظرية في الستينيات من القرن الماضي ونشوء النموذج القياسي الحالي وازدراءً كليًا للمحتويات العلمية لنموذج الكوارك تحديدًا. يقول "باكرينج":

إن صورة نظرية الكوارك- القياس للجسيمات الأولية يجب أن ينظر إليها كمنتج ثقافي خاص. لقد كانت الكيانات النظرية للفيزياء الحديثة، والظواهر الطبيعية التي أشارت إلى وجودها؛ بمثابة المنتجات المترامنة^(٢) joint product لعملية تاريخية. [...] ومن وجهة النظر التي يتبناها هذا الفصل، فما من إلزام على أي أحد يسعى لرسم إطار للعالم أن يأخذ في اعتباره ما يقرره العلم في القرن العشرين. [...] كما أنه ليس ثمة سبب بالنسبة إلى غير المتخصصين لإظهار المزيد من الاحترام لصورة العالم من منظور فيزياء الطاقة العالية الحالية^(٢).

=بالسجال حول الواقعية العلمية نظرًا إلى أن "الأشياء العلمية يُمكن أن تكون واقعية وتاريخية في الوقت نفسه" (المرجع السابق نفسه، ص ٣).

(1) Pickering 1984.

(*) الإنتاج المترامن Joint Production هو عملية إنتاجية واحدة ينتج عنها منتجات متعددة بشكل مترامن. (المترجمان)

(2) Pickering 1984, 413=

يُمثل التحليل التاريخي لتحليل المُعطيات وإعادة تحليلها التي تؤكد التيارات الضعيفة المتعادلة (التي كانت فاصلة في صلاحية النموذج المبكر للكوارك) خلفية هذه الرؤية. ففي النتائج المأخوذة من الغرفة الفقاعية لـ"جارجامل" عام ١٩٦٣، لم يتم العثور على تيارات متعادلة ضعيفة. وقد تم إعادة تحليلها بعد ذلك بعشر سنوات، بعد تأكيد نموذج الكوارك. والآن، كشفت المعطيات عن أدلة على وجود التيارات الضعيفة المتعادلة. يعزو "بيكرينج" سبب نجاح هذا الإنجاز التجريبي إلى أن ثمة علاقة تكافلية^(*) بين النظرية والتجربة:

لقد أعادت تجارب النيوترينو تقدير إجراءات تفسيرها في بداية سبعينيات القرن العشرين و [...] نجحت في إيجاد مجموعة جديدة من الممارسات جعلت من التيارات المتعادلة أمرًا جليًا^(١).

ومع ذلك، فسلطة العالم النظري ليست كسلطة العالم التجريبي. إن القياس وتحليل المُعطيات أمور محملة بالنظرية، إلا أن النظريات المشاركة

=يستطرد بيكرينج: "في سياقات مُعينة، مثل الدراسات التأسيسية في فلسفة العلم، ربما يكون من المثير أن نلقي نظرة عن كثب على الاعتقادات العلمية المُعاصرة. أما في بعض السياقات الأخرى، فببساطة قد يعوق الإنصات لما يقوله علماء الخيال". وفقاً لهذه الرؤية، فإن الأبحاث الفلسفية، من قبيل هذا الكتاب، التي تهدف إلى المزيد من فهم محتويات الفيزياء الحديثة، ما هي إلا ظواهر اجتماعية-ثقافية.

(* العلاقة التكافلية Symbiosis: علاقة وثيقة بين نوعين مختلفين من الكائنات الحية، وتشمل تبادل المنفعة، والمعايشة، والتطفل. (المترجمان)

(1) Pickering 1984, 194.

لا ينبغي أن تكون متطابقة مع النظريات موضع الاختبار. وتكون مهمة القائم على التجريب الفصل الحاسم بين النظريات موضع الاختبار ونظريات القياس أو تحليل المُعطيات. فإن لم يكن الفصل بينهم ممكناً، فإن القياس يضل الطريق وتصبح نتائج النتائج التجريبية غير معول عليها. يُعد التمييز بين الخلفية المعرفية الآمنة وعدم اليقين النظري أمراً حاسماً لفهم هذه النقطة^(١). وفي واقع الأمر، فقد اعتمدت إعادة تحليل المعطيات القديمة بشأن التيارات المتعادلة في بداية سبعينيات القرن العشرين على فهم أفضل للتصويبات المشعة للكهروديناميكا الكمية، وليس على نموذج الكوارك موضع القياس. وعلى نقض بيكرينج، يؤكد المؤرخ "جاليسون" على ذاتية الممارسة التجريبية في مقابل تشييد النظرية^(٢). يتبقى القول: إن التحميل النظري في حد ذاته لا يُبرهن على أن المُعطيات بناءات اجتماعية.

٢- العلية التدخلية

تتحو هذه النسخة من البنائية منحى برجماتياً. تركز البرجماتية على العلم باعتباره نشاطاً إنسانياً. من الجلي أن التجارب والقياس تمثل أنماطاً مُعينة من الأفعال الإنسانية. وفي إطار ظروف تحت التحكم، يتم التدخل في العمليات الطبيعية؛ بهدف توليد ظواهر قياسية وفرض بُنى رياضية عليها. سعت مدرسة "إرلانجن" البنائية إلى إعادة تأسيس البنية الرياضية للنظريات

والفقرة ٢-٥؛ 1982; Shapere (1)

(٢) انظر التحليل المُفصل لتحليل المُعطيات المُحايد الحالي وإعادة التحليل في المرجع:

.Galison 1987, 135-241

الفيزيائية من العمليات العينية التي تؤدي إلى موضوعات وعمليات مثالية بشكل تقريبي⁽¹⁾. في هذا الإطار يقترح تيتنس تأويل نتائج التجارب من خلال مفهوم فون رايت للعلية التجريبية أو التدخلية⁽²⁾. يقوم الفيزيائيون بإجراء التجارب من أجل إدراك الشروط المثالية التي لا توجد في الطبيعة. ويتم تحت هذه الظروف الاصطناعية تسيير عملية يبدو جلياً أنها لن تحدث بالكيفية نفسها في الطبيعة "البكر". تأسيساً على هذه الحقيقة الراسخة ينتهي تيتنس إلى نتائج ضد-واقعية، تكون في الواقع من بواقي التمييز القديم بين الفيزيائي "φυσικ" والفني "θεχνη": فالاضطراد المشاهد في تجربة ما هو هدف التجربة. إنها تنتمي إلى البنية القصدية النمطية بالنسبة إلى الأنشطة الإنسانية؛ ويتم التعبير عنها من خلال معادلات ذات قيمة تنبؤية. لا تتطابق هذه المعادلات مع القوانين الموضوعية للطبيعة لكن فقط مع توقعنا الذاتي لما سوف يحدث. المُحصلة هي ذرائعية أصولية: فالتجربة نشاط غائي، ويتمثل الهدف الأساسي للنظرية التجريبية في توفير أدوات التنبؤ التي تخدم أغراضنا التقنية. يؤكد تيتنس أن رؤيتنا للطبيعة لا يمكن أن تظل بمنأى عن المنهج التجريبي:

من هنا فالخبرة التجريبية ليست ملاحظة شيء موجود بالفعل في الطبيعة، إنها أن نخبر القدرة على التغير فيما هو طبيعي،

(1) انظر برنامج لورنزن وجانيس للفيزياء الأولية (Butts and Brown 1989). إن أكثر النظريات تقدماً التي يُمكن إعادة تأسيسها بهذه الطريقة كانت النسبية الخاصة. أما بالنسبة إلى نظرية الكم، فقد أخفق المشروع. فالأفعال البشرية العينية تعمل على موضوعات المستويات الكبرى وليس على النطاق دون الذري.

(2) Tetens 1987; von Wright 1971.

التي تتم بإيجابية؛ حيث تُصبح الطبيعة في الخبرة التجريبية مرئية، في المقام الأول، بوصفها حدودًا لا يُمكن تخطيها بالمعالجة التقنية^(١).

لا أعتقد أن هذا الزعم له ما يبرره. صحيح أن استخدام التقنية لم يترك مفهومنا للطبيعة على حاله. فنتيجة للتقنيات الحديثة، أصبح الخط الفاصل بين ما يتعدى القدرة البشرية وما هو نتاج للأنشطة الإنسانية غائمًا. ولكن هل تجعل هذه الملاحظة الصادمة من القوانين، التي تحدد من جانبها مدى صلاحية أو عدم صلاحية التجربة، نتيجة للفعل الإنساني؟ أكد فرانسيس بيكون، في عصر جاليليو، أنه حتى لو كان ثمة أغراض تقنية، فإن أي استخدام للتقنية يقتضي اتباع قوانين الطبيعة^(٢). وقد يكون مذهب التدخلية ضروريًا لفهم التجارب والقوانين الظاهرية التي تنتج عنها، ولكنه ليس كافيًا.

إن التحميل بالتقنية، مثله مثل التحميل بالنظرية ليس أمرًا قاتلاً بالنسبة إلى الموضوعية العلمية. يدفع المذهب التدخلية عند تيتنس للفيزياء التجريبية عدة اعتراضات:

(1) Tetens 1987, 12; من ترجمتي

يجب أن نُضيف أن تيتنس لم يعد يُدافع عن مثل هذه الأدوات الأصولية اليوم. انظر على سبيل المثال كتابه الرائع عن سجل العقل-الجسم (Tetens 1994)، الذي يُسلم بنتائج العلم الإدراكي الحديث بطريقة لا تتفق مع الأدوات.

(2) Bacon 1620, First Book, III:

"متى توصلنا إلى قوانين الطبيعة؛ فإن الظواهر تطيعها، والقوانين التي نتوصل إليها بالنأمل تُمثل قاعدة مثلها مثل العلة في حدوث الظاهرة".

١- النشاط التجريبي نفسه ليس متصلاً بفهم قوانين الفيزياء. تعتمد النتائج التجريبية على التفاعل بين المهارات التقنية ونظرية القياس بقدر أكبر مما تعتمد على أهداف البشر العملية وطموحاتهم. (على الرغم من الحالات المؤخرة للغش في البيولوجيا والفيزياء؛ وعلى وجه الخصوص فقد أظهر الكشف عن تلك الحالات أن العلم يهدف في المقام الأول إلى الصدق أكثر مما يهدف إلى تحقيق الغايات البشرية).

٢- الحد الفاصل بين الملاحظة والتجربة غائم أيضاً؛ حيث يتداخل مجال كلا النوعين من النشاط الأبيستمولوجي. مثال ذلك التداخل بين ظواهر النشاط الإشعاعي الطبيعية والاصطناعية. وفي فيزياء الجسيمات تتداخل مُعطيات الصور المأخوذة للأشعة الكونية والمُعطيات المأخوذة لوابل معجلات الجسيمات. ومعجل الجسيمات تتم تغذيته بمصدر مشع طبيعي. أما كشف الجسيمات في تجربة تشتت لفيزياء الطاقة العالية فيظل يُسجل مسارات أشعة كونية عندما يتم إطفاء الوابل.

٣- ثمة نتائج مقصودة وغير مقصودة للأفعال البشرية. فحين يتم إجراء تجربة، فإن قوانين الطبيعة المعروفة جيداً هي فقط ما يمكن أن ينتج عنه نتائج مقصودة لأنشطة القائم على التجريب. عادة ما يتم إجراء التجربة لأن بعضاً مُعيّناً من قوانين الطبيعة لم يصبح بعد جزءاً من معارفنا الموثوقة ولكنه لا يزال تحت التمحيص. فإذا ما اعتمدت النتائج على أنشطة القائم على التجريب بشكل حصري، فلماذا إذن يتعين بذل الجهد للقيام بالتجربة؟

لا يجب الخلط بين النشاط التجريبي والاستخدام التقني؛ إذ تهدف التقنية إلى إحداث نتائج مقصودة لأفعالنا. بينما تهدف التجارب أساساً إلى بحث النتائج غير المقصودة. فالنتائج غير المقصودة للتجربة أمور عارضة. فقد تكون كما هو متوقع أو على النقيض تماماً. إنها تتسجم تماماً مع معيارنا للواقعية المعروض في الفقرة ١-٣: إنها تنتمي إلى الفعلي. فإذا ما كانت التجربة تعمل كما هو متوقع، فحينها فقط يمكن تحويلها إلى تقنية وتصير أداة تقنية نافعة لأداء غيرها من التجارب. إن حُجج المذهب التدخلي، في واقع الأمر، يمكن أن تفيد أيضاً في تقديم الدعم للواقعية العلمية^(١).

٣- التجريبية البنائية

تتشارك البنائية الاجتماعية مع المذهب التدخلي في أنهما يقومان بالخلط بين الشروط الضرورية والكافية للمنهج التجريبي. وفي سبيلهما إلى ذلك، يصل كل من الموقنين إلى النتيجة نفسها: يُنتج المنهج التجريبي بناءات اجتماعية أو تقنية فحسب. ويفوتهم أن القائم على التجريب ليس بإمكانه أن يولد بشكل مُتعمد ظواهر عشوائية. إنهم لا يدركون عرضية النتائج التجريبية كدليل على واقع فيزيائي مستقل، ولقوانين الطبيعة التي ليست في متناولنا. وفي كلا الرؤيتين، تصير الفيزياء منتجاً ثقافياً ويُختزل العلم الطبيعي في التقنية. ومع ذلك تُظهر تجريبية فان فراسن البنائية أن الرؤية البنائية للمنهج التجريبي متوافقة مع تفسير تجريبي للفيزياء. يذهب فان فراسن إلى أن

(١) انظر: Hacking 1983، والفقرة ١-٤.

النظريات بناءات رياضية، وأن التجارب تؤدي إلى بناءات تجريبية. ويسير كلا النوعين من البناءات جنباً إلى جنب. إن بناءاتنا النظرية عن العالم غير كاملة وتُصمم التجارب من أجل ملء الفراغات في نظرياتنا. إنها تهدف إلى تحديد الظروف الفاصلة العرضية للمعادلات التفاضلية أو إلى قياس الثوابت الكونية للطبيعة من قبيل سرعة الضوء أو شحنة الإلكترون⁽¹⁾؛ لذا فثمة سمات بنائية لتفاعل النظرية والتجربة. يوضح فان فراسن هذه النقطة عن طريق عقيدة كلاوس فيتز في التجريب. ووفقاً لها، فإن أداء تجربة ما يعني أن يحل الصراع التقني مع الطبيعة محل سياسة بناء النظرية:

فالتجريب هو الاستمرار في تأسيس النظرية عن طريق سُبل أخرى [...] أود أن أستدعي هذه الرؤية "عقيدة كلاوس فيتز في التجريب". إنها تجعل اللغة لغة للتأسيس أكثر منها للاكتشاف، كما أنها أكثر ملائمة للتجريب كما هي للتظير⁽²⁾.

تُركي هذه الفقرة بوضوح وجهة نظر بنائية لصياغة النظرية في الفيزياء. ورغم ذلك، فإنها تقترح، علاوة على ذلك، أن أداء تجربة ما يعني التعامل مع حالة مستقلة تكون محك الكفاية التجريبية لبناءاتنا⁽³⁾.

(1) Van Fraassen 1987, 119-120.

(2) المرجع السابق ص ١٢٠. يؤكد فراسن في: van Fraassen 1980, 5، السمات البنوية للفيزياء بتسمية موقفه الأبستمولوجي التجريبية البنوية: "إنني أستخدم الصفة "بنوية" كي أشير إلى رؤيتي أن النشاط العلمي ذو طبيعة تأسيسية وليست كشفية: إنها تأسيس للنماذج التي يجب أن تكون ملائمة للظواهر، وليس الكشف عن الحقيقة بشأن ما لا يُمكن ملاحظته".

(3) انظر: Wind 1934، والتمييز الذي عرضت له في الفقرة (١-٣).

من بين المواقف البنائية الثلاثة المعروضة هنا، يقترب موقف فان فراسن من دقة إدينجتون^(١). وفي واقع الأمر، يتطلب سؤال إدينجتون حول الاكتشاف أم التصنيع إجابة مُعقدة؛ إذ ينبغي التخلي عن أحد الخيارين. يركز التفاعل بين النظرية والتجريب على تفاعل مُعقد بين الأنشطة البشرية وقوى الطبيعة العلية.

ينبغي هنا تبني نقطة كانطية أصيلة. فإذا ما تم إجراء تجربة ما بالشكل الصحيح، تستجيب الطبيعة كما لو كانت شاهداً مستقلاً وعدلاً. (يكون أداء التجربة صحيحاً إذا ما كانت الخلفية المعرفية النظرية للقياس منفصلة جيداً عن الموضوع قيد البحث، وإذا ما كانت الأدوات المستخدمة معروفة جيداً، وإذا ما توافرت الأمانة في القائم على التجريب). وإذا ما كان للتجربة نتائج واضحة، فإنها تقرر اختياراً ثنائياً. فإذا ما كانت النظرية الخاصة بالموضوع قيد البحث تُعطي تنبؤاً، فإن نتيجة التجريب إما أن تتفق مع التنبؤ أو لا تتفق. وإذا ما تم ملء فراغ في النظرية، فإن إحدى قيم الكمية الفيزيائية يكون قد تم قياسها في إطار هامش خطأ مُعين، مع استبعاد جميع القيم الأخرى. يصف كانط، في فقرة شهيرة، التفاعل بين الأنشطة الأبيستولوجية وشهادة الطبيعة على النحو التالي:

حين قام جاليليو بدرجة كرات لها أوزان من اختياره عبر سطح مائل، أو حين قام تورشيللي بتحميل الهواء وزن اعتقد مسبقاً أنه مساو لوزن عمود من الماء، أو حين قام شتال في

(١) إن السمات التجريبية لتجربتيه البنيوية أقل إقناعاً؛ انظر الفقرة (٢-٦).

وقت لاحق لهم بتحويل المعادن إلى كلسات ثم تحويل تلك الأخيرة مرة أخرى إلى معادن عن طريق نزع شيء أولاً ثم إعادته مرة أخرى، فإن ثمة ضوءاً قد سطع على كل أولئك الذين درسوا الطبيعة. لقد فهموا أن ثمة تبصراً للعقل لما ينتجه هو بنفسه وفقاً لتصميمه الخاص؛ أي أنه ينبغي أن يأخذ دور القيادة بالمبادئ لأحكامه وفقاً لقوانين ثابتة، وأن يُجبر الطبيعة على الإجابة عن تساؤلاته. [...] فالعقل ينبغي أن يتناول الطبيعة، من أجل أن يتعلم من خلالها، عبر مبادئها من جهة [...] وما يتم التفكير فيه من تجارب بالتوافق مع تلك المبادئ من جهة أخرى [...] (1).

إن السمات البنائية للمنهج التجريبي، سواء في زمن كانط أو إدينجتون، يتعين أن تتخطى التجريبية. واليوم يبدو أنها تمثل الطريق الآخر: فالسمات التجريبية للنتائج التجريبية ينبغي أن تتخطى العديد من تنويعات البنيوية. فالشهود العدول مستقلون. ولا تُجيب الطبيعة بطريقة مذبذبة أو اعتباطية عن الأسئلة التي توضع في التجارب الجيدة؛ إذ تعرض التجارب اضطرابات شبيهة بالقوانين ليست بالكامل تحت تصرف القائم على التجريب. مثلها مثل الشاهد العدل، قد تقوم التجارب بمقاومة تأملاتنا النظرية. وهذا ما يحدث بالفعل في فيزياء ما دون الذرة حين يخفق البناء الكلاسيكي للنتائج التجريبية.

(1) Kant 1787, B XIII.

يُعدّ التساؤل عن علل الظواهر أمراً حاسماً بالنسبة إلى العلم الجاليلي والنيوتوني. ومع ذلك لا يجوز رد الظواهر وأيضاً عللها القابلة للملاحظة إلى ما يُمكن ملاحظته بالمعنى التجريبي الضيق. فالمنهج التجريبي يقوم بما هو أكثر من مجرد ملء الفراغات في التوصيفات النظرية. إنه يهدف إلى التحليل العلي. وفقاً لفان فراسن لا تنتمي علل الظواهر إلى المجال التجريبي لنظرية فيزيائية ما، ولكنها تنتمي إلى عالم ما لا يمكن ملاحظته. من هنا فإن موقفه للتجريبية البنائية، في الجزء "التجريبي"، يخفق فيما يتعلق ببنية الفيزياء الحديثة ومناهجها. على حين نجد بعضاً من حججه ضد الواقعية العلية جوهرية. وسوف نتناولها فيما بعد^(١). ولكن أولاً، يتعين توضيح ماهية ظواهر الفيزياء الحديثة، وماهية عللها، وما يُمكن أن يُقال في صالح واقعية الأخيرة في مقابل التجريبية والبنائية.

يُعدّ التساؤل حول ماذا عساها بالضبط أن تكون ظواهر الفيزياء الحديثة أمراً مثيراً للجدل في الفيزياء المعاصرة. وفي واقع الأمر تعتمد وجهات النظر حول الظواهر على الموقف الخاص في السجال بشأن الواقعية العلمية. فالظواهر، بالنسبة إلى الواقعيين العلميين، هي حقائق في الطبيعة تُشرحها النظريات الفيزيائية. وفقاً لهذه الرؤية، التي دافع عنها بوجين وودوارد في بحث واسع التأثير^(٢)، تكون الظواهر هي ما يدعوه الفيزيائيون بالآثار: مثل قبيل أثر أينشتين-دي هاس، وأثر بوم-أهارانوف، وأثر هال

(1) Van Fraassen 1980, 17. (٦-٢) وانظر الفقرة

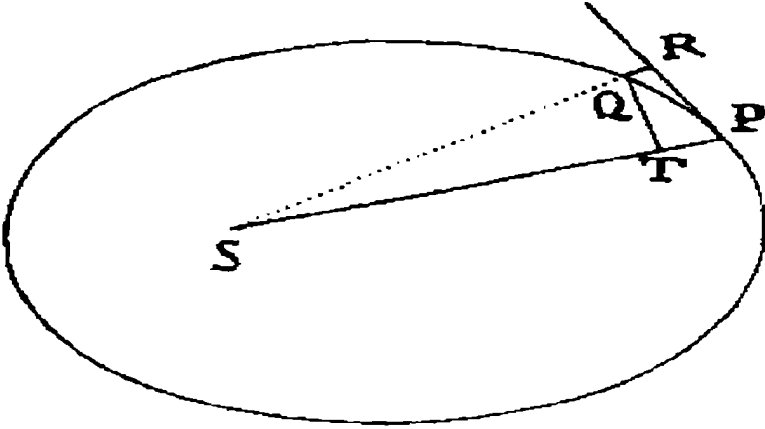
(2) Bogen and Woodward 1988.

الكمي، ... إلخ. بالنسبة إلى التجريبيين أمثال فان فراسن، فإن ظواهر الفيزياء هي حالات الظهور؛ أي ما يُمكن ملاحظته أو إدراكه عن طريق الخبرة الحسية. بالنسبة إلى البنيويين، فإن ظواهر الفيزياء سوف تكون البنى التي تولدها التجارب والمناهج الرياضية. وفي واقع الأمر فمن المستحيل الدفاع عن مفهوم غير متلبس لظواهر الفيزياء الحديثة وفقاً للجسيم الفيزيائي؛ إذ تعتمد ماهية الظواهر على السياق النظري والتجريبي. وحتى استخدام نيوتن للمفهوم لم يكن مُستقراً. فأحياناً ما كان يعتبر أن الظواهر هي ما يُمكن ملاحظته، على حين نجد أن الظواهر التي يتناولها في الكتاب الأول والثالث من البرنكيبييا هي حركات الكواكب الموصوفة في قوانين كبلر⁽¹⁾.

يؤكد هاكينج في كتابه "التوضيح والتدخل" أن الظواهر بمعناها في الفيزياء الحديثة لا تحدث إلا نادراً جداً في الطبيعة⁽²⁾. فالظواهر منتظمة. وتحدث وفقاً لقواعد شبيهة بالقوانين. كما أنها تأتي في مقابل الإعجازي. إنها تعرض قوانين للطبيعة يمكن الوثوق بها. إنها معيارية ويُمكن التعبير عنها من خلال الكميات الفيزيائية. ويتعين توليدها بالتجريب في كل الميادين باستثناء الفلك. وفي التجارب يمكن أن تكون نصف مكتشفة ونصف مُصنعة. إنها تحدث ببساطة في الفلك وفيزياء الفلك الحديثة فحسب. وفي كل الأحوال، تكون تأسيساً على الأمثلة الرياضية. ويتعين الانتهاء إلى أن معظم (إن لم يكن كل) ظواهر الفيزياء تنتج عن الأمثلة الرياضية والمنهج التجريبي.

(1) Newton 1689, 797-801. Matthews 2003

(2) Hacking 1983, 227-232.



شكل (٢-٢) ظاهرة حركة "كبلر"

(نيوتن ١٦٨٧، ص ٤٦٧)

اقتصرت ظواهر العلم الطبيعي، فيما قبل المنهج التجريبي لجاليليو، على المشاهدات الفلكية. وقد كانت خاضعة للأمتة الرياضية في قوانين بطليموس وكبلر. أما مع جاليليو ونيوتن، فقد بلغت عملية صياغة الظواهر في صيغة رياضية مستوى جديدًا. كانت الظواهر بالنسبة إلى جاليليو هي النتائج المعيارية لتجاربه. أما الظواهر الميكانيكية التي أراد نيوتن أن يشرحها فقد كانت في واقع الأمر بالنسبة إليه قوانين ظاهرانية؛ أعني قوانين كبلر وقوانين جاليليو للسقوط الحر. بالمثل فقد نتجت ظواهر تجاربه البصرية عن النماذج الهندسية لأشعة الضوء. من هنا فإن مصطلح "ظاهرة" قد تم استخدامه، منذ البواكير الأولى للعلم الحديث، ليعني توصيفاً رياضياً مُحملاً بالنظرية لما طالما سُمي من قبل بالظواهر. فظواهر العلم الحديث هي بُنى تجريبية مُحملة بالنظرية.

تتفق الواقعية العلمية مع أي موقف تجريبي مُعتدل على أن البنى التجريبية المُحملة بالنظرية تنتمي إلى الواقعية التجريبية. فيما تعتقد الأجزاء التي يُمكن الولوج إليها تجريبياً للواقعية الفيزيائية أكثر من مُجرد المُعطيات الحسية الخام التي تقرها التجريبية الصارمة. إذ لا يتمثل الأساس التجريبي للفيزياء الحديثة في الظواهر القابلة للملاحظة بالمعنى الضيق، ولا في المُعطيات التجريبية المُعطاة بدلالة قيم المؤشر لأجهزة القياس. وعلى حين تكون الظواهر بُنى تجريبية، تكون المُعطيات التجريبية أعدادًا. يُعطي القياس قيمًا عددية للكميات الفيزيائية. ويتم الحصول على المُعطيات العددية من قراءة أجهزة القياس. وينتج عنها نماذج مُعطيات رياضية، أي بنى رياضية صغرى تلائم المُعطيات. إن نماذج المُعطيات بُنى تجريبية أيضًا. إن التمييز بين الظواهر والمُعطيات في الفيزياء الحديثة أمر غائم إلى حد ما^(١).

إلا أن المنهج التجريبي يذهب إلى خطوة حاسمة أبعد. إنه يولد ظواهر معيارية من أجل بحث عللها. ويهدف تنويع ظروف تجربة ما إلى إعادة تجميع وإعادة تأسيس القوى العلية المستقلة. فقد استهدف تفكيك وتجميع نيوتن للضوء الأبيض عن طريق منشور زجاجي إلى التحليل العلي النوعي^(٢). كما يستهدف تنويع الكميات الفيزيائية وتحليل ارتباطاتها الدالية إلى التحليل العلي الكمي. درس جاليليو السقوط الحر تحت نوعين مختلفين من المُحددات، وهما السطح المائل والبندول، مع تنويع انحدار السطح وقياس

(١) انظر: Matthews 2003، وملاحظاتي عليه بشأن الطرق المختلفة لفهم ظواهر الفيزياء.

(٢) انظر نهاية الفقرة (٢-٢).

زمن تدحرج الكرة، أو سعة البندول. قام نيوتن بتتبع ترتيب أشعة ضوء الشمس والمنشورات الزجاجية من أجل دراسة السمات الثابتة في الأطياف الناتجة وقياس معامل انكسار أشعة الضوء للألوان المختلفة. يقوم فيزيائيو الطاقة العالية المحدثون بتتبع طاقة وابل الجسيمات الساقطة، مع قياس مقطع عابر لنوع معين من التشتت بواسطة أنواع عديدة من كشافات الجسيمات.

يعني قياس الكميات تسجيل قيمها العددية. ويُسمى التسجيل في التجارب الحديثة "أخذ المُعطيات". والمُعطيات هنا هي قيم الطول، والزمن، والكتلة، والشحنة، والتيار الكهربائي، والفولت، وقوة المجال الكهربائي أو المغناطيسي، ودرجة الحرارة، ... إلخ، في نسق مُعطى من الوحدات. كان يتم تدوين المُعطيات فيما مضى في سجلات. والآن أصبح التدوين يتم عن طريق أجهزة إلكترونية تتم قراءتها وتحليلها من خلال أجهزة الكمبيوتر. إن مُعطيات الفيزياء الحديثة هي أيضاً بُنى تجريبية محملة بالنظرية. ويتم تغذية نماذج المُعطيات⁽¹⁾ بها وتحليلها من أجل تحديد الارتباطات الدالية بين الكميات الفيزيائية. وعادة ما يتم التعبير عن هذه الارتباطات الدالية من خلال معادلات تفاضلية، كما في التلازم الرياضي للتفسيرات العلية.

ثمة افتراق بين تجريبية فان فراسن والعلم الجاليلي فيما يتعلق بنتائج التحليل العلي. يُفسر جاليليو أو نيوتن الظواهر من خلال العلل. فتتطلب القاعدة الأولى للتفكير عند نيوتن بحثاً عن "العلل الحقيقية" للظواهر. حتى إن كان يعرفها في المقام الأول بوصفها كميات فيزيائية وليست قوى عليية غير

(1) Suppes 1962.

قابلة للملاحظة⁽¹⁾، فمن المؤكد أن ثمة نزوعاً متّصلاً في الفيزياء الحديثة تجاه الواقعية العلية. قام نيوتن باستبعاد الذرات، والأثير، وجُسيمات أو موجات الضوء فقط؛ لأن خصائصها الفيزيائية بالنسبة إليه كانت فيما وراء التناول التجريبي. اليوم يتم قياس الكميات الفيزيائية لجُسيمات ما دون الذرة، والأمر نفسه بالنسبة إلى خصائص حالات الفراغ لمجال كمي (وهي حالياً المرشح الأفضل ليمثل نمطاً ما من الأثير الفيزيائي). سيدافع معظم فيزيائي الجُسيمات دون شك عن الواقعية العلية فيما يتعلق بجُسيمات ما دون الذرة. على النقيض تماماً، يفترض فان فراسن وجود هذه الأخيرة ليظل لا أدرياً بخصوص العلل غير القابلة للملاحظة للظواهر القابلة للملاحظة أو البنى التجريبية. فالقوى العلية في الفيزياء الحديثة، وفقاً له، تكون ميتافيزيقية. أما الكيانات غير القابلة للملاحظة من قبيل القوى، أو الذرات، أو جُسيمات ما دون الذرة فتكون افتراضية بمعنى يجعلها شبه خيالية. فوفقاً لفان فراسن، فإن استخلاص النتائج بشأن العلل غير القابلة للملاحظة يعني زيادة رقعة الواقعية التجريبية.

ثمة رؤية مخالفة للقوى العلية في الفيزياء الحديثة نجدها عند هاكينج. يتبنى هاكينج الآراء البنائية لفان فراسن أو تبتس للمنهج التجريبي، ولكنه يدافع عن الواقعية العلية. وفقاً لهاكينج فإن السمات البنائية للتجريب تدعم الواقعية العلية ولا تنبذها؛ كما ينشأ عن السمات القصدية أو الغائية للمنهج التجريبي المعيار التالي للواقعية: إذا ما كانت ثمة إمكانية لاستخدام القوى

(1) والفقرة (٢-٢) Newton 1729, 398; Falkenburg and Ihmig 2004

العلية غير القابلة للملاحظة بوصفها أداة اعتيادية في تجربة ناجحة، فلا بد من وجود هذه القوى:

إننا على قناعة كاملة بواقعية الإلكترونيات حين نأخذ في بناء - وكثيراً ما يكفي النجاح في البناء - أنواع جديدة من الأجهزة تستخدم العديد من الخصائص العلية المفهومة جيداً للإلكترونيات من أجل التدخل في مناطق أخرى من الطبيعة تتميز بصبغة أكثر فرضية⁽¹⁾.

يُدلل هاكينج على معياره للواقعية عبر مناقشة قياس لانتهاك التكافؤ قدم في عام ١٩٧٨. فنظراً إلى أن قاذف الإلكترون يُمثل جزءاً أساسياً من الجهاز التجريبي، فإن التصور، والأداء، وتحليل مُعطيات القياس تفترض مقدماً وجود الإلكترونيات⁽²⁾. يُدرك هاكينج ها هنا سمة أساسية للأسلوب الذي يتبعه الفيزيائيون لتوسيع نظرياتهم في القياس. فإذا ما حازت نظرية ما عن نوع معين من الكيانات أو القوى العلية على القبول والمصادقة، فإنها تصير جزءاً من الخلفية المعرفية الموثوقة، وتجتاز مرحلة الخضوع للاختبارات التجريبية. والآن قد ينشأ عنها نظريات قياس جديدة وتقنيات جديدة يتم استخدامها للاختبار التجريبي لغيرها من النظريات. وبهذه الطريقة دخلت الخلفية المعرفية عن الإلكترون في تأسيس قاذفات الإلكترونيات ومُعجلات الجسيمات. ومن وجهة نظرة أداتية، فإن الطريقة التي يعمل بها قاذف الإلكترونيات لا يُمكن شرحها. وتأثيرات وابل الإلكترونيات النابض في قياس

(1) Hacking 1983, 265.

(2) Loc. cit., 266-273.

انتهاك "التكافؤ" التي ناقشها "هاكينج" يمكن فهمها فقط إذا ما افترضنا أن نبضات الإلكترونات المستقطبة خطياً لها وجود وأنها تسبب عدم التماثل الأيسر - الأيمن في وقائع التشتت.

تدعم حجة هاكينج الحدس البراجماتي للفيزيائي الذي يرى أن الكائنات التي يُمكن التحكم بها من أجل إنتاج بعض الآثار المُعينة المرغوبة يجب أن تكون واقعية. وقد تكون خصائصها الفيزيائية وبنيتها ليست معروفة بشكل كامل، إلا أنها تخدم غرضاً مُعينا ويلزم عن ذلك القول: إنها موجودة. ويُعادل إنكار وجودها الزعم بأنك تستطيع أن تدق مسماراً في الحائط بمطرقة ليس لها وجود. هذه الحجة الفلسفية للمطرقة والمسار تقترب في واقع الأمر من معيار الواقعية المُستخدم في إطار المجتمع العلمي للفيزياء تحديداً. وفي عام ١٩٣٩ أثار إدينجتون النقطة عينها بشأن النيوتريـنو. فحين كتب إدينجتون كتابه "فلسفة علم الفيزياء"، كانت وظيفة فرض النيوتريـنو ضمان بقاء الطاقة عند انحلال جسيمات بيتا، ولكن لم يكن ثمة دليل على وجود النيوتريـنات. أكد إدينجتون أنه لن يأخذهم على محمل الجد قبل أن يكون بالإمكان توليدهم في تجربة واستخدامهم كأداة تقنية:

لا يتمكنني الإعجاب بنظرية النيوتريـنو. وبطريقة اعتيادية يُمكنني القول: إنني لا أومن بالنيوتريـنات. [...] بل هل تواتيني الجرأة للقول: إن الفيزيائيين التجريبيين لن يكون لديهم البراعة الكافية لصنع النيوتريـنات؟ [...] فإذا ما نجحوا في صنع النيوتريـنات، وربما حتى في تطوير تطبيقات صناعية لها، فإنني

أفترض أنه سيتعين علي الإيمان بها - حتى وإن شعرت بأنهم لم يكونوا ملتزمين بالقواعد كما يجب^(١).

تم الكشف عن النيوتريونات أول مرة بطريقة غير مباشرة في عام ١٩٥٦، في مقلوب انحلال جسيمات بيتا. وما إن تم الكشف عنها وتصنيعها حتى صارت النيوتريونات جزءاً من صندوق أدوات فيزياء الطاقة العالية. واليوم هي على قدم المساواة مع وابلات الإلكترونات. لقد بحثت العديد من تجارب التشتت للنيوتريينو بنية البروتون والنيوترون^(٢). ثمة ثلاثة مبادئ متلازمة في معيار إدينجتون ومعيار هاكينج للواقعية:

١- مبدأ العلية؛ ووفقاً له ينبغي أن تكون ثمة علة للأثر الذي يمكن ملاحظته.

٢- مبدأ الكفاية؛ ووفقاً له ينبغي أن يكون لدينا معرفة كافية بهذه العلة كي نستعملها كأداة.

٣- مبدأ القصدية؛ ووفقاً لهذا المبدأ تهدف المقاصد التقنية إلى إدراك الأغراض الإنسانية بواسطة أدوات معينة.

ولكي تصير أي تجربة ناجحة، فلا بد من عدم انتهاك أي من هذه المبادئ الثلاثة. فدون العلية لن تتولد أي ظاهرة على الإطلاق. ودون المعرفة الكافية للعلة، فلن تكون أي ظاهرة تحت السيطرة. ودون أن تكون

(1) Eddington 1939, 112.

(٢) انظر أي كتاب حديث عن فيزياء الطاقة العالية، على سبيل المثال: Perkins 2000، والفقرة (٤-٤). وانظر أيضاً: Franklin 2001.

ثمة أدوات في المتناول، فلن يُمكن إدراك أي هدف للقصدية التقنية. تُظهر المبادئ الثلاثة أن الخاصية الأداة للنظريات الفيزيائية يُساء فهمها بالاعتقاد في أن القيمة التنبؤية لنظرية ما لا تتضمن وجود قوى عليّة مناظرة. وبالنسبة إلى تطبيقات التقنية لنظرية ما، فالعكس تمامًا هو الصحيح^(١).

أكدت أيضًا نانسي كارترائت الجانب العلي للنظريات الفيزيائية. فعلى نهج المنطق الاستقرائي لمل، اقترحت كارترائت إضافة نمذجة عليّة للرؤية التجريبية للعلم^(٢). وبحسب كارترائت فإن القوى العلية للفيزياء هي ترتيبات واقعية. إنها قدرات الطبيعة لاستدعاء آثار معينة تحت ظروف معينة^(٣). يقترّب الموقف التجريبي عند كارترائت من الواقعية العلية. إنها تقترح شرح

(١) ومع ذلك يُظهر كارير (Carrier 1991, 1993) أن الإمكانية التنبؤية لنظرية ما لا تُقيد بشكل كافٍ ما تشتمل عليه من أنواع القوى العلية. فبإمكانك أن تُفسر ظواهر سريعة معينة بافتراض وجود الفلوجيستون محل الحركة الجزيئية. كما يُمكنك أن تُثبت مسامرًا في الحائط بحذاء بدلاً من المطرقة.

(٢) تسير كارترائت (Cartwright 1989, 163-182) على نهج مل (Mill 1872). كما نجد نهجًا متصلًا لدى ماكى (Mackie 1980). وهو يختلف عن آراء كارترائت في نقطة واحدة حاسمة. ولكي ندمج العلية في التجريبية، نكون بحاجة إلى تفسير عشوائي للعية، من قبيل رؤية هيوم للاعتياد أو تحليل ماكى Mackie الشرطي. تؤكد كارترائت (1989, 25) في غمار رؤية ضد-هيومية أن آراء مل (وآراء كارترائت نفسه) لا تُرد إلى مجرد نظرية للاعتياد لتفسير العلية. انظر أيضًا: Falkenburg and Schnepf 1998.

(٣) ثمة دفاع عن فرضية أن الفيزياء تهدف إلى وصف المواقف في: Cartwright 1989. Hüttemann 1997, 145-151.

الموضوعات الفيزيائية، والقوى، والمجالات، ... إلخ، من خلال قواها العلية. وينتج عن القوى العلية للطبيعة الظواهر القابلة للملاحظة والنتائج التجريبية في الفيزياء. من هنا، فإن الموجة الكهرومغناطيسية هي القدرة على بث إشارة بسرعة الضوء؛ والجسيمات دون الذرية تمثل قدرات على صنع نقاط سوداء على شريحة فوتوغرافية أو مسارات للجسيم في غرفة فقاعية، ... إلخ. أما التساؤلات عن أي نوع من الكيانات تمثله هذه القدرات، أو عن قوانين الفيزياء التي تنتظم وفقاً لها فتظل مطروحة على مائدة البحث.

تؤكد الواقعية العلية السمات الفعلية للواقع التجريبي الذي أكده كانط؛ إذ لا تنتمي العلة غير القابلة للملاحظة للأثار القابلة للملاحظة إلى الواقعية التجريبية بالمعنى التجريبي الضيق. ولكن إذا ما قامت رواية عليّة بربطها بالملاحظات التجريبية، فإنها تنتمي إلى الواقع التجريبي بالمعنى الواسع. ويذكرنا هذا المعيار بمسلمات كانط للتفكير التجريبي. فعلى الرغم من أنه أكثر عمومية، يتطلب كانط سلسلة من الإدراكات الحسية الممكنة⁽¹⁾، فإنه من الممكن ألا يكون لدينا إدراك حسي للعلة دون الذرية. على الرغم من ذلك، تنتمي العلة غير القابلة للملاحظة الخاصة بالظواهر إلى الفعلية، أو الواقعية العرضية بالمعنى الحرفي تماماً. إنها تعمل عملها مستقلة عن نوايانا

(1) انظر: Kant 1781/87, A 225-226/B 273 : [...] فبارشاد من التماثلات يُمكننا أن ننقل من الإدراكات الفعلية إلى الشيء في سلسلة من الإدراكات الممكنة. ومن ثم ندرك وجود مادة مغناطيسية تخترق كل الأجسام من إدراك أننا جذبنا قطع الحديد [...]".

ونظرياتنا. فمن يتبع بحذر الواقعية العلية الكانطية ينبغي أن يدركها من خلال كيانات لدينا عنها معرفة تجريبية محدودة. وهنا يتم الإفصاح عن هذه المعرفة التجريبية في إطار مُسلمات كانط للتفكير التجريبي. إنها تأتي في واقع الأمر، من خلال التفسير التعميمي للملاحظة الذي لم يكتمل على يد كانط.

٢-٥ تعميم الملاحظة

قام العلم الجاليلي منذ بواكيره الأولى على أجهزة الملاحظة مثل التليسكوب والميكروسكوب. ولا تزال السجلات الأخيرة حول الواقعية العلمية تنصب على ما إذا كانت هذه الأجهزة تُتيح لنا الواقعية التجريبية بمقياس جديد. ولقد نمت تفسيرات عمومية للملاحظة في مواجهة الآراء التجريبية أو البنائية الحديثة في التقليد الأرسطي. وعلى غرار حجة المطرقة والمسمار لهاكينج التي ناقشناها في القسم السابق، فإن هذه التفسيرات تأتي مصاحبة للواقعية العلية. فتقوم التجارب بأخذ المُعطيات، وتقوم أجهزة الملاحظة بأخذ الصور. ويُمثل أداء تجربة ما تدخلاً. أما أخذ صورة على مقياس جديد فهو عمل من المعالجة المثالية. يفيد التدخل من الموضوعات الواقعية التي تقوم بوظيفة أدوات أخذ المُعطيات. أما الأمثلة فتقوم باستخدام مُناظر للموضوعات الواقعية التي ينتج عنها الصور المأخوذة من قبل الميكروسكوب أو التليسكوب.

في عام ١٩٦٢ ذهب جروفر ماكسويل إلى أن أجهزة الملاحظة تجعل من الموضوعات القابلة للملاحظة، أو "الكيانات النظرية"؛ مرئية^(١). وفقاً لماكسويل فإن الأمر الحاسم هو أن أجهزة الملاحظة تفتح أمامنا تنوعاً من المجالات. فأجهزة الملاحظة المتاحة أظهرتنا على طيف من الموضوعات على كل المقاييس. فالميكروسكوب ثنائي العين والتلسكوبات والتلسكوبات الراديوية تجعل الموضوعات مرئية على مسافات شديدة البُعد. بالمثل تجعل النظارات والمناظير المكبرة والميكروسكوبات والميكروسكوبات الإلكترونية والغرفات السحابية ومعجلات الجسيمات متزايدة الطاقة من الجسيمات شديدة الصغر مرئية. وفقاً لهذا المتصل من أجهزة الملاحظة، فإن ثمة ضماناً لوجود الموضوعات الفيزيائية على كل المقاييس من المجرات البعيدة وحتى الجسيمات دون الذرية. على الطرف الآخر من هذه الوجهة من النظر، عارض فان فراسن أن ينبغي أي استدلال على وجود الموضوعات الملاحظة من وجود أجهزة الملاحظة، واعتبره استدلالاً غير لازم منطقياً^(٢) non sequitur. كما يكشف عن أوجه الاختلاف بين ذيل الدخان لطائرة في السماء ومسار الجسيم في غرفة فقاعية؛ إذ إننا قادرون على رؤية الطائرة التي تُسبب ذيل الدخان وهي في المطار، وبإمكاننا تعقب مسارها بالعين المجردة. على النقيض من الطائرة، فإننا غير قادرين من حيث المبدأ على رؤية الإلكترون بالعين المجردة. يؤكد فان فراسن على التمييز بين "الرصد" و"الملاحظة"^(٣):

(1) Maxwell 1962, 7.

(2) Yan Fraassen 1980, 14-18.

(3) Yan Fraassen 1980, 17.

من الجلي أنه حين يتم رصد جُسيم عن طريق الغرفة السحابية، ويكون الرصد مرتكزاً على الملاحظة، فإن هذا أمر مختلف عن ملاحظة الجُسيم.

يرتكز هذا النقد على تجريبية فان فراسن. إن ما لا يمكن إدراكه مباشرة بأي صورة ليس خاضعاً للملاحظة. قد يكون هذا مفهوماً ضيقاً جداً للملاحظة. ولكن في المثال المُعطى، تدعّم نظرية الكم نقد فان فراسن. فالإلكترون ليس موضوعاً بالمعنى المياكرسكوبي المُعتاد. كما أن أثره ليس مساراً كلاسيكياً. حقاً يُظهر التحليل الأدق أنه لا ينتج عنه مسار جُسيم بالمعنى المُعتاد يمكن وفقاً له فصل العلة عن المعلول^(١). من هنا ينتمي مفهوم ماكسويل التعميمي للموضوعات الملاحظة إلى واقعية ساذجة وكلاسيكية لا يُمكنها التعامل مع بنية المجال الكمي.

في عام ١٩٨٢ اقترح دادلي شابير تفسيراً أكثر تعقيداً للملاحظة التعميمية. لا ينصب تفسيره للملاحظة على أجهزة الملاحظة ولكن على النظريات التي يتضمّن استخدامها تلك الأجهزة. إن التركيز على قوانين الفيزياء التي تشتمل عليها ملاحظة ما، يسير على خطى العالمية الفيزيائية لماكس بلانك. ويهدف ذلك إلى تحرير فهمنا للملاحظة من التصورات المؤنسة. وهي ترتكز، من ثم، على أبستمولوجيا طبيعانية تعتبر العين أداة للملاحظة وتُفسر أي إدراك بشري كنتيجة لعمليات فيزيائية وفسولوجية عصبية.

(١) انظر الفقرة (٦-٦).

يقترح شابير فض الاشتباك بين استخدام مصطلح "ملاحظة" في العلم التجريبي عن المفهوم الأبستمولوجي التقليدي للملاحظة، المرتبط بالإدراك. لا شك أن مفهومًا للملاحظة يرتكز على الممارسة العلمية ومنفصل عن الإدراك سيُصيب الفلاسفة بالإحباط في مناح مهمة. إلا أن مثل هذا المفهوم مناسب بامتياز ليأخذ في اعتباره اعتماد النظرية في الخبرة العلمية. إنه يُساعد على تحديد في أي الحالات يكون مثل هذا التحميل النظري للخبرة العلمية مُميّناً. إن هذا تحديداً هو هدف شابير الأساسي حين قدم المعيار التالي للملاحظة المباشرة (إمكانية الخضوع للملاحظة) لكيان مجهول (س)⁽¹⁾:

معيار شابير: يتم ملاحظة (س) بشكل مباشر (أو هو خاضع للملاحظة) إذا:

- يتم تلقي المعلومات (أو يُمكن تلقيها) عن طريق مُستقبل ملائم،
- ويتم نقل هذه المعلومات (أو يُمكن نقلها) بشكل مباشر؛ أعني دون تدخل، للمستقبل من الكيان (س) (الذي هو مصدر المعلومات).

يوضح هذا المعيار مثلاً من الفيزياء الحديثة لجسيمات الفضاء. يُحلل شابير التجارب الأولى التي قامت بقياس فيض النيوترونات الآتية من الشمس⁽²⁾. وفقاً للنظرية الحالية للفيزياء الشمسية، تقوم النيوترونات، في إطار احتمالي مُعين، بمغادرة الشمس والانتشار في الأرض؛ حيث يُمكنها أن تُحدث مقلوب عمليات انحلال لجسيمات "بيتا"، في إطار احتمالي مُعين، في سائل مُلائم مثل "الديبركلوريتيلين". وسائر هذه الاحتمالات قابل للحساب بدقة عن النظريات الحالية للشمس والتفاعل الضعيف. من هنا فإن رصد

(1) Shapere 1982, 492.

(2) كان ذلك حين كانت إمكانية تذبذبات النيوتريينو لا تزال تخميناً نظرياً غامضاً.

النيوتريونات الشمسية وقياس تردداتها النسبية، وفيض النيوتريونات الشمسية يجب أن يُتيح إمكانية دراسة العمليات التي تحدث داخل الشمس. إن قياس فيض النيوترونات يُستخدم هنا كأدوات لاختبار عملي للنظرية الفيزيائية عن الشمس. (وبالمناسبة، فالنيوترونات تُستخدم هنا كأدوات بحث تجريبي دون أن يتم تصنيعها بمغزى "إدينجتون").

وفقاً لمعيار شابير، تفيد النيوترونات الشمسية في الملاحظة المباشرة لداخل الشمس. وطالما أنه من الناحية العملية ليس ثمة تفاعل للنيوترونات بين الشمس وكشّاف النيوترونات تحت سطح الأرض، فهي تستوفى الشرط (٢). إن النيوترونات على النقيض من الضوء (الفوتونات) أو الجسيمات الثقيلة، تفاعلاتها قليلة للغاية. وبناء على ذلك، فهي تأتي من مصدر المعلومات، من داخل الشمس، إلى المُستقبل (كشّاف النيوتريون)، وهو خزان "البيركلوريتلين" تحت الأرض، دون تشويش^(١).

ينتج عن ذلك مفهوم للملاحظة يقوم بتعميم المفهوم التجريبي المُناظر لدى فان فراسن على سبيل المثال. ويأتي التعميم على خطوتين: الأولى بغض الطرف عن السمات المُحددة المعتمدة على العقل في الإدراك الحسي (أعني التمييز بين الكيفيات الأولية والثانوية، وطبيعة الأفكار والوعي، ...إلخ)؛ والثانية بإقامة مماثلة بين العملية الفسيولوجية التي تقف من وراء فعل الإدراك، ونقل المعلومات. وفقاً لهذه المماثلة، فإن العين ما هي إلا نوع

(١) ومع ذلك، أظهرت تجربة كاميوكاند في عام ١٩٩٩ أن نسبة مُعينة من الفقد المؤكد في النيوترونات الشمسية بين الشمس والأرض، نتيجة لتذبذبات النيوتريون. أنظر ما يلي، وأيضاً: Perkins 2000, 294.

واحد من أنواع كثيرة من مُستقبلات المعلومات، والضوء ما هو إلا وسط واحد للانتقال من بين كثرة. فبإمكاننا أن نأخذ صورة موثوقاً بها لما يُحيط بنا عن طريق الكاميرا (ونحن نعلم أن العين تقوم بوظيفتها مثل الكاميرا). بالتماثل، يمكن لتدفق النيوتريونات الشمسية أن يُعطينا صورة موثوقاً بها لداخل الشمس. بالمثل يقوم الميكروسكوب الإلكتروني بأخذ صورة موثوق بها لبنية ميكروسكوبية. كما يأخذ وابل الجسيمات صورة موثوقاً بها للبنى دون الذرية⁽¹⁾. وفي تلك الحالات كلها، لا يكفي أن نعرف كيف يعمل المُستقبل. حين زعم ماكسويل أن ثمة متصلاً للملاحظة، فقد غض الطرف عن واقعة أن ثمة شرطاً إضافياً: إن نقل المعلومات يجب أن يكون موثوقاً به. الشرط الثاني لشابير أن يكون نقل المعلومات مباشراً يستهدف ضمان هذا المطلب. دعوني أسمى هذا المطلب معيار المصادقية ولنلقي نظرة عن قُرب.

يستهدف معيار شابير إعطاء شرط كافٍ للملاحظة المباشرة، أو القابلية للملاحظة، للكيان "س". وفقاً لهذا المعيار، ثمة نظريات ثلاثة يُمكن أن تكون مُتضمنة في تحليل كيف يُمكن أن نلاحظ الكيان "س" مباشرة: "نظرية المصدر، ونظرية النقل، ونظرية المُستقبل"⁽²⁾. إلا أنها تتطوي على شرط ضروري لما يجعل من الملاحظة مباشرة: إن فعل النقل يجب أن يكون مباشراً؛ أي دون فقد في المعلومات. [يقول شابير في الاقتباس السابق: "دون تدخل"، في واقع الأمر فالأخذ في الحُسبان أن تذبذبات النيوتريينو أو غيرها من الحالات التي تتدخل فيها حالات الكم قد ينتهك شرطه الثاني. وطالما أننا

(1) انظر الفصل الخامس.

(2) Shapere 1982, 492.

بحاجة إلى تعريف عام لـ "النقل المباشر"، فإنني أفضل "دون فقد في المعلومات". يعتمد هذا الشرط الضروري على نظرية نقل المعلومات. من هنا فإن شرط المصادقية للملاحظة المباشرة بمغزاه لدى شابير يكون:

شرط الجدارة بالثقة: إن ملاحظة الكيان "س" تكون مباشرة فقط إذا ما كان النقل من "س" إلى مستقبل للمعلومات يحتفظ بالمعلومات الأصلية.

إن مصادقية نوع ما من نقل المعلومات تعتمد بجلاء على معرفتنا بالقوانين الفيزيائية التي تصف فعلاً عينياً من النقل. ولا تصير افتراضاتنا حول هذه القوانين موثوقاً بها إلا حين تنتمي إلى هيكل الخلفية المعرفية الفيزيائية الموثوق بها. وعلى درب نزع الصبغة الإنسانية عن معارفنا، فإن ملاحظة كيان ما قد يُمكن تعميمها بطريقة تكون منفصلة عن الإدراك الحسي. والمكسب هنا هو الموضوعية العلمية. والثمن هو التحميل النظري لما يُعد ملاحظة مباشرة. إن تمييز شابير هنا بين "الخلفية المعلوماتية" و"ما هو غير مؤكد" تُصبح حاسمة. فنُعد الملاحظة التعميمية بمغزاهها لدى شابير مباشرة فقط إذا ما كانت الخلفية المعرفية الآمنة تخبرنا أن نقل المعلومات موثوق به. وفي واقع الأمر، عادة ما يركز تحليل المُعطيات في الفيزياء التجريبية على التمييز بين الخلفية المعرفية الآمنة والنظريات المشكوك فيها، ويتم إنفاق الكثير من الجهد في عمل التمييز نفسه بشكل آمن قدر الإمكان. ومع ذلك، فإذا ما صارت عملية النقل مشكوكاً فيها، فإن معلوماتنا حول مصدر المعلومات يتأثر بشكل حاسم. وحينئذٍ لا يُستوفى معيار شابر لإمكانية الملاحظة المباشرة.

ولنأخذ المثال الذي يُقدمه شابير: إن انتشار النيوترونات التي تصدر عن مركز الشمس هو عملية تتذبذب فيها النيوتريونات أو لا تتذبذب. فإذا ما تذبذبت النيوتريونات بقدر ذى بال، تعرض شرط الجدارة بالنقطة للانتهاك. وإذا شككنا فى أنها تفعل ذلك (ونحن لا نعلم ما إذا كانت تفعل أو لا تفعل) فإن نظريتنا للنقل تصير مشكوكاً فيها. وفى هذه الحالة يتعرض شرط "شابير" للجدارة بالنقطة للانتهاك.

وفى واقع الأمر، فقد كشفت تسعينيات القرن العشرين عن أن فيض النيوترونات الشمسية المقاس كان أقل كثيراً من المتوقع. ولم يكن واضحاً ما إذا كانت نظرية الشمس هي الخطأ أو نظرية النيوتريون. وفى عام ١٩٩٩، تأكد وجود تذبذب النيوتريون^(١). والآن أصبح من الواضح أن المعلومات لم تنتقل مباشرة، تبعاً لتداخلات الكم لنوعي النيوتريونات. والمغزى هو أن نظرية النقل التى اشتمل عليها تحليل "شابير" لم تكن قائمة على خلفية معرفية آمنة.

من هنا نرى أن معيار شابير للملاحظة المباشرة يعتمد على خلفيات أبستمولوجية. إنه يعتمد على ما تتمتع به معرفتنا بنقل المعلومات من جدارة بالنقطة. ولا ينتج عنه تمييز واضح للملاحظة المباشرة وعكسها، أي استدلالاً مؤسساً على الملاحظة - وهو التعبير الذي يستخدمه شابير لما يُسمىه القائم على التجربة "بالدليل غير المباشر". يعتمد التمييز على خلفيتنا المعرفية. أما الخط الفاصل بين ما يُعد ملاحظة أو استدلالاً فهو يتزحزح مع تقدم الفيزياء. يؤكد شابير أن:

(١) انظر: Perkins 2000, 294.

إن توصيف ما يُعد ملاحظًا بشكل مباشر (مُمكن ملاحظته)، ومن ثم ما يُعد ملاحظة، هو دالة للوضع الراهن في المعرفة الفيزيائية^(١).

ومع ذلك، فإن الخط الفاصل بين الملاحظة المباشرة والاستدلال النظري لا يُمكن زحزحته بشكل اعتباطي بطريقة تجعل، في النهاية، من أي نتيجة تجريبية يُمكن اعتبارها ملاحظة مباشرة للكيان "س". ومن ثم فإن معاملة التمييز بين الملاحظة واللاملاحظة كأمر اعتباطي وغامض تمامًا (كما فعل فان فراسن على سبيل المثال لأسباب أبستمولوجية خالصة، حين انتقد دفاع ماكسويل الشهير عن الكيانات النظرية^(٢)) ليس مُقنعًا.

وتقترح الاعتبارات السابقة السؤال التالي: هل من ثمة شروط ضرورية أبعد للملاحظة المباشرة للكيان "س"، على أساس تحليل شايبير؟ وهل تساعدنا هذه الشروط على تحديد ما تمت ملاحظته بمعنى تعميمي تأسيسًا على خلفية معرفية مُثبتة جيدًا، وفقًا لشروط الجدارة بالثقة المعروض عاليه؟ في الواقع، هذا يصير ممكنًا إذا ما ركزنا على القياس وترجمنا معيار شايبير للملاحظة إلى لغة الكميات الفيزيائية كما يلي:

١- المصدر (س) نظام فيزيائي يتميز بخصائص أو كميات فيزيائية معينة.

٢- المُستقبل هو جهاز القياس.

(١) انظر: Shapere 1982, 492. وأيضًا ٥١٧: "إن الخط الأبستمولوجي المهم بين غير الاستدلالي والاستدلالي يتم رسمه في حدود التمييز بين ما يكون لدينا أسباب مُحددة للشك فيه [...] وما يُمكننا أن نبني عليه بثقة".

(٢) انظر: van Fraassen 1980, 14-19, and Maxwell 1962.

٣- النقل هو تسلسل لتفاعلات تؤدي إلى القياس.

٤- تتكون المعلومات من قيم مقيسة للكميات الفيزيائية.

٥- القيم المقاسة للكميات الفيزيائية يمكن أن تُسند بثقة إلى النظام الفيزيائي محل البحث.

وبدلالة الكميات الفيزيائية، فالملاحظة المباشرة في نظر "شابن" هي قياس قيم الكميات الفيزيائية التي يمكن بشكل لا لبس فيه أن تسند إلى نظام فيزيائي. ونقل المعلومات هو تسلسل لتفاعلات تؤدي إلى قياس الخواص الفيزيائية للنظام محل البحث. بهذه الطريقة تعمم الملاحظة لتصبح نوعاً من القياس.

وبلغة الكميات الفيزيائية، يجب أن يتم التعبير عن شرط الجدارة بالثقة للملاحظة في جزأين: (أ) الوصف العام لنظام فيزيائي ولتفاعله مع جهاز قياس يجب أن يُعطى بدلالة الكميات الفيزيائية. (ب) ينبغي التسليم بأن هذه الكميات، كما تم قياسها في تجربة فعلية بنتيجة عددية مُحددة، يُمكن نسبتها دون التباس إلى نظام فردي فعلي. وهذان الشرطان معاً ينبغي أن يضمننا أن القيم المقاسة للكميات الفيزيائية تتناظر الخصائص الفيزيائية لنظام فردي. من الجلي أن هذين الشرطين وثيقا الصلة بإمكانية تأليف موضوعات فيزيائية بالمعنى الكانطي وبمشكلات تأليف الموضوعات في مجال الكم والتي سوف يتم تناولها في الفصول اللاحقة^(١). هنا ثمة جانب واحد فقط من هذه المشكلات يجب التأكيد عليه. يرتبط الشرط (ب) ارتباطاً وثيقاً بالواقعية

(١) انظر الفصول من الخامس حتى الثامن، وأيضاً: Mittelstaedt 1998b.

العالية. إنه يتطلب أن يكون نتاج القياس يُمكن أن يُرد إلى نظام فردي يُسبب تأثيراً مُعيناً في جهاز القياس؛ لذا، فإنني ختاماً أقترح المعيار العام التالي (الضروري والكافي) لملاحظة نظام فيزيائي:

المعيار العام للملاحظة: يتم ملاحظة نظام فيزيائي "س" إذا، فقط إذا:

- ما كانت نتائج القياس تتأخر قيماً لكميات فيزيائية ذات خصائص مُعينة للنظام "س"، و
- ما كانت ثمة إمكانية لتقديم رواية عالية فردية تُظهر أن الكميات المُقاسة يُمكن في واقع الأمر نسبتها إلى نظام فردي يتموضع في منطقة زمكانية مُعينة، مُتاحة لأجهزة القياس الفعلية.

هذا المعيار العام لم يعد يُميز بين "الملاحظة" و"الملاحظة المباشرة".

وعند تعميم الملاحظة على القياس، تكون القضية الحاسمة هي السؤال عما إذا كان من الممكن اقتفاء أثر نتائج القياس وصولاً إلى نظام فردي يعد هو سببها. قد تكون هذه الرواية العالية غير مُباشرة كما تُسلم أكثر نظريات القياس تعقيداً، طالما أن نظريات القياس هذه تستند إلى خلفية معرفية آمنة ومُثبتة جيداً، وطالما أنها تُسلم بإفراد نظاماً فردياً يُمكن دون التباس نسبة قيم مُقاسة مُعينة خاصة بكميات فيزيائية إليه.

في الفصول القادمة سيتم العرض بشكل تفصيلي لأي مدى تكون هذه هي الحالة بالنسبة إلى جسيمات فيزياء الجسيمات الحالية. وكما سوف نرى، يُمكن حقاً في هذا المشهد ملاحظة مكونات المادة دون الذرية التي يتم بحثها في تجارب التشتت لفيزياء الطاقة العالية - على حين نجد أن الإلكترون الذي يصنع مسار الجسيم لا يُمكن ملاحظته كعلة فردية للمسار. من هنا، فإن

الزعم التجريبي لفان فراسن أن مسار الجسيم لا ينتج عنه ملاحظة إلكترون
ما صحيح. وسوف نرى أن المعيار العام المذكور عاليه لا يدعم الزعم
التجريبي المناظر بشأن ملاحظة نظام كوارك فردي في واقعة نفّائة!^(١).

٢-٦ الواقعية التجريبية للفيزياء

بعد ذلك كله، ما الواقعية التجريبية للفيزياء، وما الواقعية التجريبية في
نطاق ما دون الذرة؟ عرضت في هذا الفصل كيف يؤلف العلم الجاليلي
الموضوعية العلمية. إنه يفعل ذلك بتجاوز الخبرة بالمعنى التجريبي؛ أعني
الإدراك الحسي، بطرق عديدة. أكد ماكس بلانك تحقيق هذا التحرر من ربة
العناصر المؤسنة في رؤيتنا للواقعية^(٢). وتتعارض المناهج العلمية للفيزياء
الحديثة تحديداً مع الرؤية الأرسطية للواقعية التجريبية؛ لذا فإنها في الحد
الأدنى تمتلك معرفة عن التفاعل بين الخلفية المعرفية النظرية والأجهزة
التقنية، كما أنها في الحد الأقصى تميل إلى الدفاع عن رؤية مُبسطة لما قد
يُعد تجريبياً من وجهة نظر العلم الحديث. ونظراً إلى أن موضوع البحث
فائق التعقيد، فإن مثل هذه الرؤية المُبسطة تنتمي إلى ما يدعوه هيجل
بـ"العقل الكسول". فالفيزياء الراهنة في حالة خلاف مع أي تفسير للواقعية
التجريبية ليست مؤسسة على معرفة فيزيائية مُفصلة. وما يُعد دليلاً
تجريبياً في الفيزياء الحديثة يتغير مع الوقت. إنه يعتمد على خلفية معرفية
مُثبتة جيداً وعلى تقنيات عالية التطور. ونتيجة للتقدم النظري والتجريبي،

(١) انظر الفقرة ٦-٥-٢ وأيضاً: Falkenburg 2000a.

(٢) انظر: Planck 1965, 31، والفقرة ٢-١.

يصير الأساس التجريبي للنظريات الفيزيائية مُحملاً بالنظرية ومُحملاً بالتقنية أكثر فأكثر.

اقترحت في الفقرة (١-٣) التمييز بين الواقعي والفعلي، واتخاذ فعلية الأحداث العارضة كمعيار أستمولوجي مُستقل للواقعية التجريبية:

إن فكرة "الحدث" event تقترب بشدة من معيار الحدوث العرضي وعدم الخضوع لتصرفنا. فالحدث هو شيء ما يحدث موضعياً بطريقة تسمى اختلافاً يُمكن ملاحظته عن بيئته: كومضة ضوء، أو "طققة" في كشاف "جيجر"، أو بقعة في لوح فوتوجرافي^(١).

إن مثل هذه الأحداث هي في واقع الأمر الأساس التجريبي لفيزياء الجسيمات الحديثة. فالحدث هو الأساس التجريبي لقياس الموضوع؛ فتسلسل الأحداث المتجاورة هو مسار الجسيم؛ وتزامن مسارين أو أكثر للجسيمات هو حادثة تشتت؛ وتراكم عديد من حوادث التشتت يؤدي إلى قياس المقطع، تلك الكمية التي تقابل فيها تجارب التشتت في فيزياء الطاقة العالية نظرية المجال الكمي. وسيتم في الفصل التالي بحث التحويل النظري المتزايد لهذه القياسات تفصيلاً.

يتعين على المرء أن يُضيف إلى الأحداث العارضة نتائج قياس، ومُعطيات، وظواهر عارضة. وأياً ما كان ليس في متناول القائمين على التنظير والتجريب، فإنه ينتمي فعلياً إلى الواقع التجريبي. وعلى وجه التحديد

(١) انظر الفقرات ١-٣ و ٣-٣.

فإن الانتقال من الميكانيكا والديناميكا الكهربية الكلاسيكية إلى سلسلة من نظريات الكم لم يكن في مُتناول الفيزيائي. ومن منظور قانون بلانك لإشعاع الجسم الأسود، فإن تجربة تشتت رذرفورد، وبنية الأطياف الذرية، فإنه لم يعد ممكناً الاحتفاظ بالبناء الكلاسيكي للواقعية التجريبية. إن البنى التجريبية لفيزياء ما دون الذرة هي بُنى كمية. وفعلياً لا تنتج مسارات الجسيمات عن الجسيمات الكلاسيكية. مثال ذلك إخفاق النموذج الكلاسيكي لفقد الطاقة للجسيمات المشحونة في المادة^(١). إن توليد مسارات الجسيمات لا يُمكن أن يُفسر إلا من خلال العمليات الكمية.

إن تعريف الواقعية التجريبية بالفعلي واتخاذ الأحداث والظواهر والمُعطيات العارضة أدلة تجريبية عليها، قد يخول لنا الخروج ببعض النتائج الختامية العامة المبدئية بشأن السجال حول الواقعية العلمية. (ولن يُمكن الإيغال في نتائج ختامية أكثر تفصيلاً إلا في نهاية الكتاب). إن نظرية الكم تجعل من الأشياء أكثر سهولة إلى حد ما. فيستبعد التفسير الاحتمالي الاعتيادي لنظرية الكم المواقف المتطرفة من الطيف المعروض عاليه في الفقرة (١-٢)، أعني الواقعية الشاملة والبنائية. يكافح كلا الموقفين لمعالجة الانتقال من الفيزياء الكلاسيكية لفيزياء الكم. فالواقعية الشاملة قوية للغاية. إنها مدينة للواقعية الكلاسيكية. إنها تُخبرنا أن الإلكترونات موجودة بشكل موضوعي مثلها مثل الصخور والأشجار. على حين تُخبرنا علاقات عدم التحديد لدى هايزنبرج بالعكس. فالإلكترونات ليست موضوعات بالمعنى

(١) انظر الفقرة (٥-٣).

الكلاسيكي^(١). وتأتي البنائية على طرف النقيض. إنها ضعيفة للغاية. وتخبرنا أن الإلكترونات لا تنتمي إلى الطبيعة مثل الأحجار أو الأشجار ولكن إلى المنتجات الصناعية في معمل الفيزياء. ومع ذلك؛ تُثبت الصور المأخوذة للأشعة الكونية أو من كشاف الجسيمات عن توقف الوايل أن الإلكترونات تصنع أيضاً مسارات للجسيم دون التدخل البشري. وتكون المسارات واقعية وموضوعية مثل شيء أو شخص يظهر في صورة. (فهل نقوم بتصنيع الشيء أو الشخص الذي نصوره بالكاميرا؟) كما أن خصائصها الكمية الغربية ليست مُصنعة. إنها ليست في مُتناول القائم الأمين على التجربة، إنها وقائع عارضة.

ماذا عن المواقف الأخرى؟ فالخيارات أمام الواقعية النقدية، والتجريبية المعتدلة، والتجريبية الصارمة متروكة مفتوحة. فتأتي الواقعية النقدية في حدود قوانين الطبيعة (الواقعية البنيوية) و/أو القوى العلية (الواقعية العلية). ومن منظور البنى الكمية، يبدو أنه من الممكن الدفاع عن الواقعية البنيوية على حين تصير الواقعية العلية مثيرة للجدل إلى حد بعيد. فإذا ما اعتقنا مفهوماً تعميمياً للملاحظة على النحو المعروض في الفقرة (٢-٥)، فإننا لا

(١) بالنسبة إلى الإلكترونات والجسيمات دون الذرية، تُلزِمنا الواقعية الكلاسيكية بتخمينات أنطولوجية غير قابلة للاختبار من قبيل المُحددات الخفية أو العوالم المُتعددة. تتعارض المُحددات الخفية لدى بوميان Bohmian مع نظرية مجال الكم النسبوي، على حين يُسلم تفسير العوالم المُتعددة لإيفيرت Everett بكل نتائج القياس الممكنة بوصفها فعلية، حتى إن كان واحداً منها فقط هو الفعلي بالنسبة إلينا. يسعى كل من تفسيري نظرية الكم إلى إعادة تأسيس ما يدعوه بتنام "رؤية عين الله" للواقعية التجريبية؛ انظر:

يُمكن أن نستغني عن الواقعية العلية بحثاً عن واقعية ما دون الذرة؛ لذا يتعين علينا أن نبحث بحذر احتمالات إفراد العلل دون الذرية وتأليف الموضوعات دون الذرية. تأتي الواقعية البنيوية في حدود بُنى رياضية مُجردة. إنها بحاجة إلى تفسير فيزيائي يأتي في حدود الكميات الفيزيائية. ومن ثم لا يُمكن إقامة تمييز حاسم بين الواقعية البنائية والتجريبية المُعتدلة. إذ تقوم الأخيرة بقصر معرفتنا التجريبية بالواقعية الفيزيائية على النتائج التجريبية، أي على قيم الكميات الفيزيائية. وحيث إنها بدورها تقوم بخلق بعض البنى الجبرية (مثل الشبكة البولية Boolean أو الشبكة اللابولية)، تردّد التجريبية المُعتدلة إلى الواقعية البنيوية بُمجرد أن يتمّ التسليم بجبر الكميات الفيزيائية. علاوة على ذلك، فإنّ نتائج القياس قد تكون محملة نظرياً ومحملة تقنياً إلى حد بعيد، ما دامت أنها مؤسسة على خلفية معرفية آمنة.

تُفسر التجريبية الصارمة الواقعية التجريبية (خصوصاً معرفتنا بها) حصرياً في حدود ما يُمكن ملاحظته بالمعنى الحرفي، أي في حدود ما نلاحظه. إننا نلاحظ الآتي في فيزياء الكم: في الشاشة الوامضة، تحدث الومضات عند زوايا ذات تردد نسبي يُناظر مقطع تشتت "رنر فورد"، وتظهر مسارات الجسيم على الألواح الفوتوغرافية للغرفة الفقاعية، فيما يتم تصوير أهداف التداخل خلف البللورة، والنموذج الشهير للحيود لتجربة الشق المزدوج يتم الكشف عنه بواسطة كشاف جسيمات يعمل على زمن طويل ويحصي الكثير من الكشوفات على مدى اتساع مساحة الشاشة، وما إلى ذلك.

للوهلة الأولى، تبدو البنى الكمية كما لو كانت الحنطة لطاحونة التجريبية الصارمة. ومع ذلك لم تُعدّ الفيزياء الكمية متوافقة مع التجريبية

الصارمة بأكثر مما تتوافق تلك الأخيرة مع أي من فروع الفيزياء الحديثة. إنها تتطلب في الحد الأدنى نسخة من التجريبية المعتدلة تُسلم بالنتائج الكمية للقياس، ونماذج المُعطيات الرياضية الملائمة للمُعطيات، واستخدام الإحصاء الرياضي^(١). فلن يُمكن الدفاع عن أي نسخة تقليدية (أرسطية) أو حديثة من التجريبية في ضوء العلم الجاليلي.

ويصير هذا جلياً في التجريبية البنائية لفان فراسن؛ حيث يتم التسليم باستخدام المنهج التجريبي ولكن مع قصر الواقعية التجريبية على الظواهر القابلة للملاحظة والتجارب. من وجهة نظر فان فراسن فإن التفسيرات العلية والملاحظات المرتكزة على الخلفية المعرفية النظرية لا تُسهم بشيء في معارفنا التجريبية. إن لها منزلة الفروض الميتافيزيقية. وهو يزعم أن "ما يُمكن ملاحظته هو أمر مُستقل عن النظرية"^(٢). إلى أي مدى تُسلم هذه التجريبية بالأمثلة الرياضية؟ إنها تتضمن قيماً لكميات فيزيائية^(٣). ومع ذلك فمتى تم تضمين نتائج القياس، فإن نظريات القياس تكون موظفة، ويتم أخذ الخطوة الحاسمة من مجرد الملاحظات وصولاً إلى الخلفية المعرفية النظرية. تبدو هذه الخطوة ساذجة في فيزياء الكم؛ إذ يكمن المحتوى التجريبي لنظرية الكم في التنبؤ بنتائج القياس التي ينتج عنها بُنى جبرية لما يُمكن ملاحظته كمياً. بالنسبة إلى فان فراسن فإن هذه البنية الجبرية تجريبية^(٤). إلا أن التعبير "يُمكن ملاحظته" مُضلل؛ إذ يتم تعريف ما يُمكن ملاحظته كمياً في

(١) انظر: Suppes 1962.

(2) Van Fraassen 1980, 57.

(٣) انظر: van Fraassen 1991, 42.

(٤) انظر: van Fraassen 1980, 64-68.

حدود قيم التوقع للكميات الفيزيائية. (صوريًا، فإن ما يُمكن ملاحظته يُناظر المُشغلات في فراغ هيلبرت. تجريبيًا، فإنها تُناظر الترددات النسبية لنواتج القياس).

تبعًا لهذه الرؤية التي لا خلاف عليها للمحتوى التجريبي لنظرية كمية، لا يُميز فان فراسن بين الظواهر الكمية القابلة للمُلاحظة والبنية الجبرية لما هو قابل للمُلاحظة كميًا. وعند هذه النقطة تلتحم تجريبيته البنائية بالواقعية البنوية. فهو يذهب إلى أن البنية التحتية التجريبية للنظرية تكون حاسمة. إنها تكمن في "قابلية البنى للتعريف من مُعطيات القياس"، وهي ترتكز على الكميات الزمكانية⁽¹⁾. ومع ذلك، فإن خطوة إدماج المُعطيات التجريبية المنعزلة في البنية التجريبية لا تكون ساذجة في فيزياء الكم. فكر في مسار جسيم في غرفة سحابية. حيث تكون الظاهرة الكمية تتابعًا من القطرات المُلاحظة. وهذا التتابع لا يكون مُتصلاً. إنه يتشكل من قياسات موضع فردية متتالية. ويكون المسار هو الخط المتصل الذي يربط بين نتائج القياس. وتكون البنية التجريبية للمسار هي مسار الحركة trajectory الزمكاني. إلا أن ميكانيكا الكم للمسار تتعارض مع وجود مسار الحركة بالمعنى الكلاسيكي⁽²⁾. فمسار الحركة هو بناء كلاسيكي. لا يقبل فان فراسن أن يكون بوسع المرء أن يتحدث حديثًا له معنى عن ملاحظة جسيم من منظور المسار، على حين يقبل أن يتحدث المرء عن المسار من منظور قياسات الموضوع المتمايزة. إنه ليس واعيًا بأن هذا، وفقًا لمبادئه التجريبية، يكون أيضًا ميتافيزيقا.

(1) Van Fraassen 1980, 59-60.

(2) انظر: Falkenburg 1996، والفقرة (3-5).

تُعد التجريبية الصارمة ملحمة؛ إذ يتعين عليها أن تستغني عن إنشاء مسارات الجسيمات من القطرات المُلاحظة في الغرفة السحابية أو من البقع على الصور الفوتوغرافية في الغرفة الفقاعية. بعبارة أخرى، ينبغي أن تكون صارمة إلى درجة تجنب عمل نماذج للمعطيات من المُعطيات ونتائج القياس للظواهر. إلا أن هذا يعني فقد أي بنية تحتية لنظرية الكم. وفي معرض التركيز على البنى الكمية الجبرية، يتحول تفسير فان فراسن للبنية التحتية التجريبية للنظرية ليكون أقل ملحمة. وفي واقع الأمر، فإن النظرة التجريبية للعالم على خطى ماخ أو أرسطو، في عصر الحاسوب (الكمبيوتر) الكمي^(*) Quantum Computer والنانوتكنولوجي، لا بد أن تكون مهجورة.

ثمة نتيجة حتمية: إن كل المواقف الفلسفية في السجال الحالي بشأن الواقعية العلمية تُخفق فيما يتعلق بالبنية الكمية لفيزياء ما دون الذرة؛ إذ تستبعد نظرية الكم الواقعية الشاملة والبنائية. فيما تتعارض التجريبية الصارمة مع مناهج العلم الجاليلي. وتدين المواقف الباقية في وجودها للواقعية الكلاسيكية بشكل أو بآخر. تركز الواقعية العلية على تفسير كلاسيكي للعلل، وتفترض الواقعية البنوية والتجريبية المُعتدلة مقدماً المقاييس الكلاسيكية للكميات الفيزيائية. ومع ذلك، فإن الواقعية دون الذرية ليست

(*) أجهزة كمبيوتر غير تقليدية تعتمد على العمل بأسلوب ميكانيكا الكم، يأمل العلماء في أن تستغل هذه الأجهزة تأثيرات ميكانيكا الكم لتسريع إجراء الحسابات، بل إجراء الحسابات بطرق مستحدثة، وإتمام العمليات خارج نطاق المنطق التقليدي.
(الترجمان)

كلاسيكية، إنها تعرض ظواهر كمية نمطية من قبيل تجربة الشق المزدوج الشهيرة بشعاع ليزر أو وابل إلكترونات قليل الشدة.

من هنا فإن السؤال الحاسم هو: في حدود أي مفاهيم يُمكننا إدراك الواقعية التجريبية دون الذرية؟ هذا سؤال كانطي، حتى إن أجبرتنا البنى الكمية على التخفيف من غلواء القبلي في صورته الكانطية. دائماً ما أصر نيلز بور على أن المفاهيم الكلاسيكية تظل لا غنى عنها لتفسير ظواهر الكم الملاحظة. وهو ما أثبتته منذ ذلك الحين وحتى الآن فيما يتعلق بالمفاهيم الفيزيائية التي يشملها القياس. ومن أجل جعل مجال ما دون الذرة مُتاحاً تجريبياً، فإننا بحاجة إلى المقاييس الكلاسيكية للطول، والزمن، والكتلة، والطاقة. فأني تجربة في مجال الكم تقوم باستخدام أجهزة القياس الماكروسكوبية ونظريات القياس شبه الكلاسيكية. فيما لا يتسنى وصف واقعية مجال ما دون الذرة سوى في حدود الكميات الفيزيائية الكلاسيكية المألوفة، وفي حدود البنى الرياضية من قبيل فراغات "هيلبرت" أو مجموعات "لاي" (*) Lie Groups. وبقدر ما لا تتناظر هذه البنى الرياضية نماذج كلاسيكية مألوفة⁽¹⁾، تُخبرنا البنى الكمية التجريبية كيف ينهار البناء

(*) تُنسب إلى عالم الرياضيات سوفس لاي Sophus Lie (١٨٤٢-١٨٩٩) الذي وضع أسس نظرية مجموعات التحول المتصل. تُمثل مجموعات لاي أكثر النظريات اكتمالاً للتساوق المتصل لموضوعات وبنى الرياضيات، وهو ما يجعلها أداة لا غنى عنها للرياضيات المعاصرة، وأيضاً الفيزياء النظرية؛ إذ توفر إطاراً طبيعياً لتحليل التساوقات المتصلة للمعادلات التفاضلية. (المرجعان)

(١) بمغزى النسخة التعميمية لمبدأ بور للتناظر؛ انظر: Heisenberg 1930a,b، والفقرة (٥-٤-٢).

الكلاسيكي للواقعية في مجال ما دون الذرة. وسوف يتضح في الفصول التالية من الكتاب أنه يُمكن فقط إعادة تأسيس الطريقة التي تُشير بها البنى الكمية إلى الموضوعات الفيزيائية بقدر ما تُناظر "بعضًا" من النموذج الكلاسيكي.

إلى أي مدى يُمكن تبرير الحديث عن واقعية دون ذرية من الأساس؟ فلا يتم ذلك إلا عبر افتراضات واقعية عليّة مُعينة. إن واقعية ما دون الذرة هي نمط من الواقعية يوجد على مقياس صغير، على مقياس طول بنحو 10^{-13} سم وأقل؛ وينتج عنها ظواهر كمية وبُنى كمية. إن نظرية الكم بناء نظري متسق من هذه الظواهر والبُنى. إنها تُظهر أن واقعية ما دون الذرة لا تتوافق مع الافتراضات القوية للواقعية الكلاسيكية. وسوف أشرح هذه الواقعية دون الذرية من موقف "وسطي" يُمثل الحد الأدنى من وجهة نظر مناهج العلم الجاليلي. إنها تتأسس على تجريبية مُعتدلة، وبُصاحبها نسخة مُخففة من الواقعية الكلاسيكية. ويمكن صياغتها في حدود الخصائص الفيزيائية؛ كما هو موضح في الفقرة (١-٦). إن نقطة البداية هذه تتفادى الافتراضات الميتافيزيقية القبلية بشأن الحوامل دون الذرية للخصائص الفيزيائية؛ أعني الجسيمات دون الذرية. والعناصر الكلاسيكية الوحيدة التي تشتمل عليها الأبحاث اللاحقة هي نظريات القياس الكلاسيكية وشبه الكلاسيكية. تركز نظريات القياس هذه على تأسيس مقاييس الكميات الفيزيائية بشكل شبه كلاسيكي؛ أي كما لو كانت ثمة موضوعات فيزيائية ذات حجم، وكتلة، وشحنة، وكمية حركة، وطاقة مُعينة. (وفي واقع الأمر، فإن المقاييس تؤسس اليوم. بشكل يتجاوز كثيرًا الإتاحة التجريبية؛ أعني نزولاً حتى مقياس بلانك).

ومع ذلك، يتعين على المرء أن يتساءل إلى أي مدى يُمكننا أن نعزو هذه الكميات المُقاسة إلى جُسيمات ما دون الذرة إذا ما كُنّا ندرك الجُسيمات دون الذرية في حدود القوى العلية التي تدعم الظواهر الكمية.

إن الإجابة عن هذا السؤال الحاسم يجب أن تُخبرنا ما الذي يُسبب مسار الجُسيم وماذا عساها أن تكون المُكونات دون الذرية للمادة والضوء. ولسوف نرى أن تفاصيل الإجابة مُعقدة وتتويرية، مُقارنة بانتظام الرؤية الكُبرى للعالم في الواقعية الكلاسيكية. وحتى يتسنى فهم العلاقة بين واقعية ما دون الذرة وظواهر فيزياء الجُسيمات، فإن الأبحاث المُفصلة في الفصول من الرابع إلى السادس أمر لا غنى عنه. وما يتبقى بشأن جُسيمات ما دون الذرة سيتم إيجازه بشكل تمهيدي في نهاية الفصل السادس. أما البحث الإضافي لازدواجية الموجة-الجُسيم في الفصل السابع فهو ضروري من أجل فهم ما يتبقى في النهاية من واقعية ما دون الذرة.

الفصل الثالث

ملاحظة الجسيم وقياسه

لكي نفهم الأساس التجريبي لفيزياء الجسيمات المعاصرة فإن البنية الفعلية لمجال ما دون الذرة يجب أن يتم إعادة تأسيسها خطوة بخطوة. إنها مهمة تبعث على الضجر. لقد تم اكتشاف وبحث العديد من الطبقات البنائية للظواهر الفيزيائية عبر قرن من فيزياء الجسيمات التجريبية. بعض هذه الطبقات كلاسيكية، وبعضها ليس كذلك، والبعض الثالث يقوم بدوره كحلقة وصل. يجب تحليل هذه الطبقات بعناية. كما يجب خطوة بخطوة؛ إيضاح ما يعتبره الفيزيائيون أنفسهم أساساً تجريبياً للمعرفة الحالية بفيزياء الجسيمات. كما ينبغي إيضاح ما يقصدونه حين يتحدثون عن جسيمات ومجالات ما دون الذرة؛ إذ ينشأ عن الاستخدام المستمر لهذه المصطلحات في فيزياء الكم مشاكل سيمانطيقية خطيرة. وفي الواقع فإن فيزياء الجسيمات الحديثة هي الحالة القصوى للامقياسية بمعناها لدى كون⁽¹⁾. دعونا ندرس الآن الطرق البارعة التي تغلب بها الفيزيائيون على هذه المشكلات، بما نتج عن ذلك من خلق سيمانطيقاً فيزياء الكم.

سنتناول بالتفصيل في هذا الفصل أساس ملاحظة جسيمات الفيزياء. إن لها بنية ذات طبقات؛ إذ تتكون من ملاحظات تجريبية، ومعطيات تجريبية،

(1) Kuhn 1962,1970.

وقيم مُقاسة للكميات الفيزيائية، وقوانين ظاهراتية. وعلى كل المستويات نجد أن تفسير هذه المكونات بعيد عن الوضوح. وحتى في حالة القائمين على التجريب فإن محاولة وصف ما ينتمي إلى البنى العارضة لفيزياء ما دون الذرة أمر مُعقد. أما من وجهة النظر الفلسفية فالأمور أكثر تعقيداً. فالخط الفاصل بين نتائج القياس الفعلي، والظواهر التجريبية، والقوانين الظاهراتية، والملاحظات من ناحية؛ وبناء النظرية من ناحية أخرى يتزحزح مع مرور الوقت.

في الواقع تكون هذه الزحزحة في اتجاهين متضادين. وما كان مجرد تخمين نظري أصبح اليوم معرفة تجريبية موثوقة، مثل وجود الذرات والإلكترونات وما يخصها من الديناميكا الكمية. وعلى العكس فما كان يُعد يوماً ما تجريبياً بالمعنى الضيق صار اليوم متعاضداً مع النظريات. مثال ذلك أوزان الأجسام التي طالما قيست منذ آلاف السنين بالموازين. لقد كانت تجريبية قبل مبادئ نيوتن (البرينكيبيا). أما اليوم فقد صارت مفهوماً نظرياً للميكانيكا الكلاسيكية. أو مثل مسار الجسيم الذي ناقشناه في الفقرة (٢-٦). إن التحميل النظري في نهاية المطاف معيار سيئ للتمييز بين الخلفية المعرفية الآمنة والافتراضات أو الفرضيات غير المؤكدة^(١).

(١) في هذه الناحية، يكون التكوين الفلسفي للعلم في خطر من فقد النقطة أو المقصود، وفي سياق مناظرة المذهب الواقعي العلمي أصبح حساب "سنيد" لمفاهيم T النظرية (Sneed 1971) مُضلاً، فطبقاً لطريقة فهم سنيد لتكوين النظريات التجريبية خلال 2000 سنة يكون الوزن مفهوم T- النظري للميكانيكا الكلاسيكية، ولكنها تصبح بالتالي خلال ظهور الميكانيكا الكلاسيكية، ويسبق هذا أنها كانت تجريبية خلال ألفي سنة-

كيف تتشابه الملاحظة والقياس والنظرية في فيزياء الجسيمات

التجريبية؟

أي الظواهر التجريبية والافتراضات النظرية يُعد حاسماً في الزعم بوجود جسيمات ما دون الذرة؟ إن مفهوم الجسيم حالياً - مثله مثل أي نظرية فيزيائية - يتمتع بأساس نظري مزدوج. فهناك أولاً: الأساس المعتمد على الملاحظة بالمعنى التجريبي الضيق الذي يتكون من ظواهر ملاحظة ومقارنتها. وهذا الأساس المعتمد على الملاحظة في فيزياء الجسيمات يتمثل في طقطقات عداد جيجر، وصور مسارات الجسيم في الغرفة السحابية (أو الغرفة الفقاعية) وهكذا، أي في الأحداث الموضوعية التي ترصدها مجسات الجسيم وفي الهيئة الزمكانية لتتابعات الحدث. ثانياً: يتم التوسع في هذا الأساس المعتمد على الملاحظة عن طريق نتائج القياس المحمل بالنظرية للقيم العددية المقاسة للكليات الفيزيائية ولنماذج معطياتها. وفي فيزياء الجسيمات فإن هذا التوسع للأساس التجريبي مُضاعف ثلاثياً:

(أ) الكميات الدينامية، مثل الكتلة والشحنة بدلالة أي الأنواع المحددة لجسيمات ما دون الذرة متميزة.

(ب) الكميات الكينماتية (مسببات الحركة) مثل كمية الحركة أو الطاقة المنسوبة إلي مسارات الجسيم المُلاحظ (تسمى "كينماتك" لأنها تختص

= حيث كان قياسها بالطريقة نفسها باستخدام الميزان، والمغزى هو أن اختلاف "سنيد" بين المفاهيم القبل - نظرية T- والنظرية نفسها تعتمد على النظرية.

بمسيبات الحركة النسبوية والتي تصف انتشار الجسيمات وتصادماتها أو موجات الطاقة العالية كما في ظاهرة كومبتون).

(ج) كميات أخرى، والتي يتم الحصول عليها عن طريق تحليل المسارات الجسيمية بدلالة الكميات الكينمائية والدينامية والتي تتناظر ما يقابلها في نظرية مجال الكم.

يسمى تعيين هذه الكميات الخاصة بمسارات الجسيمات بتحليل المعطيات. ويشتمل هذا التحليل للمعطيات على نظريات القياس، وترتكز هذه بدورها على خلفية معرفية نظرية معقدة؛ حيث تزايدت الخلفية المعرفية جوهرياً على مدار قرن من فيزياء الجسيمات. وفي العقود الأخيرة الماضية، لم تعد مسارات الجسيم خاضعة للملاحظة بالمعنى التجريبي الضيق. فيتم تسجيلها إلكترونياً، وإعادة تأسيسها عبر برامج الكمبيوتر، وينشأ عن ذلك التوسع بشكل أبعد في التعميل النظري للأساس الملاحظاتي:

(د) قد تم الحصول على مسارات جسيمية أعيد بناؤها بالكمبيوتر عن طريق النتائج المرصودة إلكترونياً بواسطة الغرف الشرارية والغرف التدفقية والعدادات الوميضية أو أنواع مختلفة من العدادات الجسيمية الإلكترونية.

بأي معنى تتعامل الفيزياء الجسيمية مع الجسيمات؟ عندما فحصت النظريات المكتشفة المفاهيم الجسيمية الشائعة، أصبح من الواضح أن المفهوم

الجسمي حاسم^(١)، وتقوم العادات الجسيمية برصد الأحداث الموضعية ذات الموضوع ومسارات الجسيمات ذات الموضوع.

عندما بدأ ملاحظة الأحداث الموضعية وتتابعاتها في أجهزة معملية للفيزياء دون الذرية، فصوحت بجسيمات ذات مكونات جزئية للمادة، وطوقت الظواهر الملاحظة بإحكام في البناء الرياضي للميكانيكا الكلاسيكية طبقاً للكميات الدينامية والكينماتية (أ)، (ب) يأتي أي دليل تجريبي للجسيم دون الذري بجزئي الأساس التجريبي للمفهوم الجسيمي وهما الأساس المشاهد ونظريتها المحملة الممتدة (أ) - (د) لقد زادت الخلفية المعرفية النظرية للجسيمات دون الذرية بضخامة خلال قرن فيزياء الجسيمات. لقد أصبح أساس الملاحظة ونظريات القياس لفيزياء الجسيمات إحداثاً أكثر وأكثر لنظرية محملة؛ أي أن أساس الملاحظة كان نظرياً، وبالامتدادات (ج) و(د)، عادت ظواهر فيزياء الجسيمات إلى النتائج النظرية والبناء الحسي، وفيما يلي سوف أقوم بتحليل بعض المراحل الحاسمة لهذه العملية عن طريق توضيح مفاتيح المفاهيم النظرية والظواهر الملاحظة والنظريات المقاسة الموجودة في التحديدات الجسيمية، إن البناء السلس للعلاقة بين المشاهدات التجريبية والبناء النظري تم توضيحه عن طريق الوسائل التاريخية للحالة المدروسة.

تقع نقطة البدء المفهومي في اثنين من المفاهيم الجسيمية العامة، يعرف أولها بدلالة جزئية وكلية، ويعرف ثانيها بدلالة العلة والتأثير، وقد سارا يداً بيد منذ بدايات فيزياء الجسيمات الحديثة، وارتكزا على مبادئ الطرق

(١) انظر: الفصل السادس، في الفقرة (٦-٣).

المنطقية الأساسية للفيزياء الحديثة فقرة (٣-١)، والطريقة التي اتحدا بها في قانون الميكانيكا الكلاسيكية باتت حاسمة فيما ترصد كدليل تجريبي للجسيم، فكانت قوة لورنر حاسمة في اكتشاف الإلكترون عام ١٨٩٧، وبالطريقة نفسها كان المبدأ النسبوي لحفظ كمية الحركة والطاقة قاطعاً في قبول المجتمع العلمي للفروض الكمية الضوئية لأينشتين فقرة (٣-٢)، على قاعدة هذه الحالة المدروسة فإن أنواع الافتراضات النظرية الموجودة في التعريفات الجسيمية تم تحليلها، وإنها ترتبط بإمكانية مواضع الجسيم وبمدى تطبيق الديناميكا الكلاسيكية للكتلة النقطية عليها، وقد أوجدوا عدة أنواع من الدلائل التجريبية للجسيمات التي أصبحت نظريات محملة في ازدياد مضطرد ومعقد خلال تطور فيزياء الجسيمات: القياسات الموضعية والمسارات الجسيمية وأحداث التشتت أو الاستطارة ورنينيات الجسيمات غير المستقرة. في ظل الخلفية المعرفية لهذه الدلائل المتنوعة والتي تم التأكد منها جيداً تواجدت النظرية الكمية وذهب، في ازدياد مضطرد فقرة (٣-٣)، وبعد هذا الحصر السلس للتعريف الجسيمي بأساسياته التجريبية والنظرية تم توضيح تحليل نتائج المسارات الجسيمية عن طريق المزيد من الدراسة للحالتين، لقد عرفت الخطوة التاريخية القاطعة التالية نوعاً جديداً من الجسيمات من طبيعة مسارها؛ حيث اكتشف البوزيترون بواسطة أندرسون في عام ١٩٢٢، وقد نتج من تجربة دقيقة، ومع هذا فقد اعتمد على الملاحظة اللحظية وعلى نظرية قياسية بسيطة ولا تعتمد مطلقاً على معادلة ديراك فقرة (٣-٤)، وكان المزيد من الخطوات السلسة الحاسمة المرتبطة بالتعريف الجسيمي مسبباً لارتباك أحداث الكوارك المفردة الناتجة من الأحداث الاستطارية المسماة

بأحداث نفاثة (فقرة ٣-٥)، وفي النهاية فإن السؤال الفلسفي قاوم وجود الجسيمات دون الذرية المدروسة بدلالة مناقشة الواقعية العلمية، وفي ظل التجريبيين والبنائيين (المكونين) المناوئين للواقعية العلمية المعتدلة.

٣-١ ثنائية المفهوم الجسيمي

المفهوم الجسيمي الشائع فيما قبل النظرية يحمل اثنين من المعاني، والمعنيان في فهم التجريبيين للفلسفة العلمية لم يسبقا النظري وكلاهما فلسفي وقد استنتجا من افتراضات وضعية مسبقة -ميتافيزيقا الفيزياء الحديثة والعلم الجاليلي على التوالي، وقد فعلوا ذلك حقاً بارتكازهم على مبادئ الميرولوجيا والتحليل العلي للظواهر التي تخص مبادئ الميرولوجيا الذي لا غنى عنه للفيزياء ودرست في فقرة (١-٥) وهي لا تعتمد على المشاهدات التجريبية ولكن جعلوها ممكنة، بهذا الحس كانوا قبلين بالمعنى الكانطي، كان المفهوم الميرولوجي للجسيم تقليدي، ونبع من فلسفة الطبيعة القديمة، وقدمها نيوتن في إدراكه لقاعدته الثالثة في الفلسفة والتي سمحت بتصميم الكميات الشاملة لجميع الأجسام الماكروسكوبية (الكبيرة) وحتى الذرات^(١). منذ بدايات الفيزياء الحديثة وهي تسير بدأ بيد مع المفهوم العلي للجسيم، توقع نيوتن أن ذرات المادة والضوء هي علة تفاعل المادة والضوء^(٢) ومنذ قرن مضى أصبح المفهوم الجسيمي حاسماً، إن الأحداث الموضوعية الملاحظة في الظواهر التجريبية للفيزياء دون الذرية يعود مسارها للجسيمات التي سببتها.

(1) Newton 1687,795-796.

(2) Newton 1730,370-374.

المفهوم الميربيولوجي للجسيم^(١): الجسيمات هي الأجزاء المكونة للمادة أو الضوء. يبنى هذا المفهوم الميربيولوجي للجسيم على العلاقة الجزئية - الكلية، فالجسيمات عبارة عن أجزاء ميكروسكوبية من أشياء ماكروسكوبية شاملة، ويعود تاريخ هذا المفهوم إلى عصر الذرة القديم وقد أخذ به في نظريات المادة للقرن السابع عشر (جاليليو وديكارت) وفي الضوء (نيوتن). ما قبل الاكتشاف التجريبي للإلكترون ولجسيمات ألفا (α) وللنواة الذرية فإن هذا المفهوم التقليدي لم يكن له مكون تجريبي.

المفهوم العلي للجسيم: الجسيمات مسببات الأحداث الموضوعية في الكاشفات. يبنى هذا المفهوم العلي على علاقة السبب والتأثير المصاحب بعملية ديناميكية، ويطبق على الأحداث الموضوعية للفيزياء دون الذرية التي يتم شرحها في دلالة عليّة، وعن طريق هذا المفهوم العلي يأخذ المفهوم الميربيولوجي للجسيم معني تجريبياً، ويشرح المفهوم العلي للجسيم الأحداث الموضوعية المتتابعة في كشافات الجسيمات، فالجسيمات الناتجة من النشاط الإشعاعي الطبيعي أو الأشعة الكونية أو مفاعل نووي أو معجل الجسيمات تجعل عداد جيجر يقطع، فإنهم ينتجون مسارات جسيمية في الغرفة السحابية وفي المستحلب النووي أو في الغرفة الفقاعية فيحدثون تيارات مقاسة ووميضاً ضوئياً في الغرف المقنوفة والعدادات الوميضية وعدادات شيرينكوف وعدادات أخرى لجسيمات الفيزياء السارية.

(١) الميربيولوجيا، في المنطق الحديث: هي المنطق الصوري لعلاقة الجزء بالكل. انظر Simons 1987، وأيضاً الملحق (هـ).

ترجع أصول كلا المفهومين للجسيم إلى الميتافيزيقا التقليدية، فمن وجهة النظر الكانطية كانا مشروطين بإمكانية الخبرة الجسيمية، فانبنى المفهوم الأول على مفهوم المادة وطبقاً لهذا فإن الجسيمات هي أجزاء "المادة" أو مكونات جوهر المادة في مدى صغير"، (فإذا تم تصور الضوء أنه يتكون من جسيمات فإنه يتم تصور تكوينه من مكونات جوهر المادة أيضاً)، ويبنى المفهوم الثاني على مبدأ العلية والذي كان في الفلسفة التقليدية مصحوباً بمذهب التحديد، وقد اعتبر الفيزيائيون قياس الأحداث الموضوعية وتتابعات الحدث (المسارات) عن طريق العدادات الجسيمية وما هي إلا بصمات الجسيمات دون الذرية، وهي تشير إلى شيء مجرد حدوثه أو تكرار إعادته هو تفاعل موضعي مع مادة العداد الجسيمي، وهذا الشيء يسمى جسيماً، وبهذا الرد فإن المعنيين يتلاقيان أو يتصلان.

إن نظرية الجسيمات تجعل هذا الاتصال واضحاً ويهدف إلى مرجعيتها للموجودات غير الملاحظة وهي عبارة عن أجزاء ميكروسكوبية من المادة المسببة للظواهر الماكروسكوبية في العدادات الجسيمية. النظرية الجسيمية للمفاهيم الميتافيزيقية للمادة ومسبباتها هي نقطة ميكانيكية كلاسيكية، ومع هذا فإنها تعود بهذه النظرية وافتراضاتها الميتافيزيقية المهمة التي وصفت مسبقاً بأنها أيضاً قوية^(١)، وإنه لتجاهل لتاريخ الفيزياء بأن المفهوم الجسيمي المسبب تماماً والذي رسخ الفيزياء الجسيمية التجريبية ومن ثم جعل الميتافيزيقا تعود بالفيزياء في النهاية لوضع لا سند له^(٢).

(١) انظر: Mittelstaedt 2006:

(٢) تبين نظرية الكم أن مفردات السبب لمسار الجسيم يصعب حله بطريقة كبيرة، انظر

الفصلين الخامس والسابع (الفقرة ٥-٣)، و(الفقرة ٧-٦).

افتراض أن الجسيم موجود له تأكيدات مشاهداتية في أحداث موضعية ملاحظة في العدادات الجسيمية، الدليل العملي أو بصمة الجسيم تكون مربوطة بالمفهوم العلي الجسيمي والنتيجة تكون ملاحظة بينما يستتبط السبب طبقاً لمبدأ العلية.

لقد أيد المفهوم العلي الجسيمي الظواهر الموضعية الملاحظة في العداد الجسيمي برواية عليية، وبهذه الطريقة أحدثت الملاحظة للجسيمات في الإحساس العام للمشاهدات التي تم شرحها في الفقرة (٢-٥). إن الأشياء التي تعزى للمفهوم الجسيمي العلي في النظرية الفيزيائية وصفت بدلالة الكميات الفيزيائية مثل الكتلة والشحنة أو الطاقة، وقد حدد بطريقة قاطعة نوع الجسيم بخصائصه بواسطة قيم الكميات الديناميكية. في الوقت الحاضر يتم التمييز بين الجسيمات المتنوعة بدلالة الكتلة أو الطاقة المغزلية والنديية وعدة أنواع للشحنات (شحنة كهربية ونكهة ولون)، هذه الشحنات تحدد ثوابت الربط لتفاعلات الجسيمات دون الذرية (الكهرومغناطيسية والتفاعلات الضعيفة والتفاعلات القوية)، سبق افتراض تحديد الجسيمات في نظرية القياسات لهذه الكميات، وترجع قيمها إلى نوع الجسيم دون الذري الذي يعتمد على قوانين حفظ الديناميكا الفيزيائية المصاحبة وتعتمد على المفهوم الميربيولوجي وترجع الكتلة أو الشحنة إلى الأجزاء المكونة للمادة (أو الضوء) كما لو كانت كتلة أو شحنة للأجسام الماكروسكوبية المجمع من كتلة وشحنة الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات.

وحتى نكون أكثر دقة فإن الأجزاء المكونة للمادة تعني تحقق مجموعة قواعد محددة لكميات النظام المكون للجسيمات دون الذرية، ومثل هذه

المجموعة من القواعد تكون أكثر تعقيدًا بصفة عامة عن تلك المجموعة البسيطة التي تنطبق على الكميات المقابلة للأجزاء المكونة للذرات الكيميائية، وكلها قد تكون أكبر أو أقل من مجموع أجزائها، على سبيل المثال، فإن كتلة نواة الذرة أقل من مجموع كتل عدد بروتوناتها ونيوتروناتها، تخلص القاعدة إلى أن كتلتها تعتمد على مبدأ حفظ الطاقة، فهي تأخذ في الحسبان الطاقة الرابطة والطاقة النسبوية المكافئة للكتلة، وبسبب طاقة الربط فالنواة تعمل كنظام مربوط بأكثر ثباتًا عن التجميعة المجردة لأجزائها المكونة؛ حيث تحمل طاقة أقل نتيجة الكتلة المكافئة وطاقتها وبالتالي تكون كتلتها أقل أيضًا. الفرق الكتلي بين النظام المربوط ككل ومجموع أجزائها يسمى النقص الكتلي، وخالصة قواعد النموذج الكواركي لجسيمات الفيزياء الشائعة أنها أكثر تعقيدًا.

المفهوم الجسيمي الميرولوجي وخالصة القواعد تزود النماذج دون الذرية للمادة بدراسة المعاني الفيزيائية، المعاني المألوفة للكميات المثيلة للكتلة والطاقة والشحنة والمعروفة جيدًا للأشياء الفيزيائية الماكروسكوبية تتحقق بالنسبة إلى الأجزاء الميكروسكوبية المكونة للمادة، يفترض أن الكميات الفيزيائية للأشياء الماكروسكوبية تجمع من تلك الجسيمات دون الذرية طبقًا لخالصة القواعد المعطاة بواسطة الديناميات الفيزيائية المقابلة لها.

عندما تم في النهاية التسليم بقبول النتائج التجريبية لمكونات المادة من الأجزاء دون الذرية في الفترة التي تدور حول عام ١٩٠٠ وبدا من الدقة الاعتقاد أنها تتبع أو تخضع للقوانين الكلاسيكية المعروفة جدًا للطبيعة، وعلى وجه الخصوص بالنسبة إلى الجسيمات الكتلية المشحونة والتي اكتشفت في

أشعة الكاثود وفي النشاط الإشعاعي وكما في النموذج الذري لذرฟอร์ด أو بور فإنهم وصفوا بدلالة رؤية الميكانيكا الكلاسيكية، ما قبل النموذج الذري لبوهر تم تصور ديناميتها بدلالة الديناميكا الكهربائية الكلاسيكية، مع بزوغ النظرية الكمية ثم هجر الديناميكا الكلاسيكية في البداية وبعدها الميكانيكا الكلاسيكية، ومع هذا فقد بقي الوصف التقريبي لمسارات الجسيم ولعمليات مسببات الحركة للثبتت دون الذري وللميكانيكا الكلاسيكية ملائماً حتي اليوم الحاضر، وما زالت نظريات القياس قائمة على قوانين الفيزياء الكلاسيكية، حتى برؤية النظرية الكمية فإن التجريبيين يعملون في مجال فيزياء الجسيمات وأصبحوا يميلون في التفكير بأن المسار الجسيمي يتسبب عن طريق شيء فيزيائي موضعي، ومع هذا فطبقاً للنظرية الكمية فإن المسار هو فقط سلسلة من القياسات الموضعية المتتابعة وأن الجسيم المسبب للمسار الخاص به لم يبق في حالة كمية موضعية بعد قياس موضعه، وتعاد القياسات الموضعية محددة قيمة معينة للكتلة أو الشحنة أو الطاقة في كشاف جسيمي، ولكن القياسات الموضعية المتتابعة والتي تصنع المسار لا تتصل بواسطة المسار الكلاسيكي^(١).

طبقاً لقيم الكتلة والمغزلية والندية والشحنة (الشحنات) والتي قيست فعلياً من البيانات الخاصة بالمسارات وأنواع الجسيمات دون الذرية وتم تمييزها وفي أغلب العموم كانت الشحنة الكتلية للإلكترون والنيوكليونات الأكثر ثقلاً والبروتون والنيوترون المكونين للنواة الذرية والفوتون كجسيم عديم الكتلة أو المجال الكمي للضوء (والإشعاع الكهرومغناطيسي بصفة

(١) انظر الفصلين الثالث والخامس، الفقرتين (٣-٣-٢، و٣-٥).

عامة) والنيوترينو المتولد من عمليات اضمحلال بيتا (β) لنواة الذرة، وطبقاً لمعلومات التجارب الحديثة فإنها ليست لاشيء بل لها كتلة صغيرة جداً^(١).

إضافة إلى وجود حالات جسيمية واضحة والتي تصاحب أيضاً بكتلة أو طاقة أو مغزلية أو ندية وشحنة (شحنات)، وقد افترض في تجارب التشتت (الاستطارة) عند زيادة طاقات المستويات الكمية غير المستقرة أنها تحدث حالات رنينية والتي تظهر عند طاقة التشتت المعطاة، وتوجد الكواركات التي تتشكل كمراكز تشتت شبه نقطية لتشتت الليبتون - نيوكليون وتشتت النيوترينو كذلك في مثل مسببات الأحداث النفاثة، لقد أصبح القياس للرنينيات والكواركات في حالة عالية من الإدراك والدراسة، وسوف تشرح مبادئها في الفقرتين (٣-٣، و ٥-٦).

٣-٢ الدليل على وجود جسيم: مثالان تطبيقيان

يملك الدليل التجريبي دائماً جزأين تقوييين ضروريين، حتى بعد نظرية الكم التي جعلت المفهوم الكلاسيكي الجسيمي يشك في إبقاء هذين الجزأين المقومين مرتبطين عن قرب إلى مفاهيم الميافيزيقا الجسيمية التي نوقشت من قبل بالفقرة السابقة:

(١) تربط الملاحظة التجريبية للظاهرة المحصورة بالمفهوم العلي الجسيمي.

(٢) التطبيق الناجح لقانون القياس المماثل للجسيم والمبني على الميكانيكا الكلاسيكية لنقطة كتلية يكون مربوطاً بمريولوجيا المفهوم الجسيمي بدلالة خلاصة قواعد الكميات الدينامية المحافظة.

(١) انظر : Peskins 2003,3 and 170-179.

وكيف تأتي هذه الشروط معًا الآن لتوضح في دراسات ثنائية الحالة، بدأت فيزياء الجسيمات التجريبية باكتشاف الإلكترون ككتلة شحنية، وحيث امتدت فروض أينشتين للكلم الضوئي إلى كمات إشعاع كهرومغناطيسي بصفة عامة فكانت مدعاة لقبول الطبيعة الجسيمية للضوء وللأشعة السينية (X-rays) وتم تسمية الجسيم الجديد بالفوتون، وفي كلتا الحالتين لم يقنع الفيزيائيون التجريبيون أنفسهم حتى أثبت أن الجسيم موضع التساؤل يكون كمًّا متمركزًا للكميات المنسوبة إليه.

٣-٢-١ الإلكترون

ينبني ما سمي باكتشاف الإلكترون على قياس شحنته وكتلته، وعادة ما يرجع إلى طومسون في عام ١٨٩٧ عندما كانت المناقشات ما زالت تجرى حول الطبيعة الموجية والجسيمية لأشعة الكاثود التي تولد عند تطبيق جهد عال على قطبي إلكتروني أنبوبة مفرغة. والأشعة السينية لا ترى فيها أشعة الكاثود ولكن تأثيراتها فقط هي التي يمكن مشاهدتها (على سبيل المثال على شاشة التليفزيون وعلى شاشة الكمبيوتر) وقد وصفوا في أمهات كتب الفيزياء التجريبية بطريقة ظاهرانية على النحو التالي:

التأثيرات الغريبة التي تتقدم في خطوط مستقيمة خارجة تاركة الكاثود B ومن ثم تسمى أشعة الكاثود وهذه الحزم الشعاعية غير مرئية، ومع هذا عندما تتواجه مع الزجاج والعقيق والفلوريت والمرجان والعديد من المواد الأخرى تجعلهم يلمعون ببريق له شدة، وهذا السطوع الساقط يظهر بجانب

معادن أو لوح ميكا أو هكذا، حتى يكون الحائل صورة كظل، وهكذا توضع عجلات مروحية صغيرة في مسار أشعة الكاثود الذي يحركها⁽¹⁾.

توصف أشعة الكاثود هنا كخطوط مستقيمة متقدمة لظاهرة تكون موضعية أو غير موضعية غير واضحة من المشاهدات، ففي عام ١٨٩٧ عين طومسون النسبة (e/m) بين الشحنة والكتلة لأشعة الكاثود بقياس مقدار انحراف أشعة الكاثود في المجال المغناطيسي ثم تعويض هذا الانحراف عن طريق المجال الكهربائي، وقد عين مقدار (e/m) عن طريق حساب قيمة الانحرافين من المعادلة الكلاسيكية لقوة لورنز والتي تفعل أو تؤثر على جسيم مشحون بشحنة e وسرعة v في مجال كهربائي E ومجال مغناطيسي B ، وكان لورنز مثل طومسون في الدفاع عن النموذج الذري فقدم مصطلحاً لهذه القوة للفيزياء النظرية قبل عامين فقط من ذلك⁽²⁾، وحل طومسون نتيجة قياسه للمقدار (e/m) والتي تفرق عن الصفر بوضوح تجريبي للطبيعة الجسيمية لأشعة الكاثود وذلك بسبب عدم المقارنة للشحنة المقاسة مع فروض التردد الموجي، وطبقاً للديناميكا الكهربائية لماكسويل والكهرومغناطيسية فإن الموجات لا تحمل شحنة.

تحتوي نظرية القياس فقط على مصطلح القوة الخاص بلورنز، وأوصل استعماله لهذا القانون بالمفهوم الجسيمي في الفيزياء الكلاسيكية مع النظرية الذرية الكهربائية، وبالنسبة إلى طومسون فإن الإلكترونات عبارة عن

(1) Jochmann et al. 1900,417 - (ترجمة المؤلفة)

(٢) انظر: Thomson 1897; Pais 1986,85

وانظر أيضاً : Lorentz/1895 ; Pais 1986,76

أشياء ميكانيكية عند مدى صغير والذي من جهة له كتلة قصور ذاتي مميزة m ، ومن جهة أخرى يحمل وحدة شحنة أولية e ، ويخضع للمعادلة الخاصة بقوة لورنر $F = (q/c)(E + v \times B)$ ومن ثم فقد ركز ميليكان لاحقاً في حسابات عرض استعادي لاكتشاف الإلكترون ووجد أن مفهوم وحدة الشحنة الأولية الكهربائية لا تعتمد تماماً في أصلها على المفهوم الكلاسيكي للجسيم، ففي عام ١٨٩١ قدم ستوني المصطلح "إلكترون" كسمى للوحدة الأساسية للشحنة المربوطة بالعمليات الإلكترونية، فقط كان مفهوم طومسون للإلكترون هو في جعل الشحنة الكهربائية e لتكون مصحوبة بكتلة القصور الذاتي $m^{(1)}$ وأرجع طومسون أربع خصائص للإلكترون والذي يميزها كجسيم مشحون:

كتلة قصور ذاتي m ،

شحنة كهربية e ،

تأثير القوة الخارجية لاعتبارات موضعية أو (الشبه نقطية) و

مسار الزمان مكان التي هي موضوع قانون القوة الكلاسيكية.

طبقاً لـ (١) و (٣) و (٤) فإن الإلكترون نقطة كتلية بحس من وجهة النظر الكلاسيكية الميكانيكية؛ أي أن كتلة القصور الذاتي التي تتمركز في نقطة مكانية وتتحرك على طول مسار كلاسيكي، وطبقاً إلى (٢) فإن لهذه النقطة الكتلية شحنة كهربية والتي تكون متماثلة تماماً مع وحدة الشحنة الأولية e "لإلكترون" الأصلي وذلك ناتج من العمليات الإلكترونية، وهذه

(١) انظر أيضاً : Millikan 1917,25-26. Pais 1986,73-74.

الشحنة تؤهل قانون القوة الذي يحدد المسار الزمني المكاني (٤) إلى المصطلح الخاص بقوة لورنر الكلاسيكي بالنسبة إلى (١)، (٢) معتبراً خصائص ديناميكية ، بينما (٣)، (٤) تعتبر مميزات زمنية - مكانية للإلكترون ويكون ارتباطهم ببعض بواسطة الديناميكا الكلاسيكية، ولا يوجد شيء يمكن قياسه بمفرده منهم، وما تم قياسه هو النسبة (e/m) وذلك عن طريق الانحرافات الموضعية لأشعة الكاثود طبقاً لقانون لورنر. وعلى وجه الخصوص لم تقاس موضع الكتلة ولا الشحنة المصحوبة بالنقطة الكتلية، ولم يتم لهم ذلك حتى تم الاعتقاد في ١٨٩٧ بوجود وحدة الشحنة الكتلية الأساسية ولم تكن تفهم بواسطة نتيجة القياس لطومسون، ولم تختبر القياسات بأي سبيل فرض أن أشعة الكاثود تتكون من جسيمات ذات شحنة كتلية مفردة وذلك يؤكد فقط نتيجة هذا الفرض المعتبر أن أشعة الكاثود وهو موضوع مؤدً إلى قوة لورنر مع أن نجاح تطبيق هذا القانون يعتبر مؤشراً قوياً لوجود الإلكترون ولا يعتبر ذلك كافياً بالنسبة إلى جميع الفيزيائيين.

قياسات طومسون هي مثال جيد للسبيل الذي تفرض فيه نظرية القياس البناء الديناميكي للظاهرة الملاحظة عملياً، وهذا البناء الديناميكي يجعلها ممكنة لتخطو من الشرح الكيفي إلى الوصف الكمي للظاهرة أو سببها.

يعتبر الفرض الجسيمي المعطى أن طبيعة أشعة الكاثود لم يكن في الاستطاعة تفسيرها في مقاطع أخرى، فقد تحققت قياس النسبة (e/m) تحت الافتراضات المسبقة بأن أشعة الكاثود تتكون من الجسيمات الكتلية المشحونة للشحنة e والكتلة m لقد أعطت القياسات ثابتاً لطبيعة النسبة (e/m) تفسيراً نظرياً والتي تعمل على استخدام الفرض الجسيمي، وطبقت قوة لورنر على

حامل الشحنة والكتلة وبالتالي دفع تطبيقها لافتراض أنه توجد شحنات كتلية في أشعة الكاثود، ومع هذا فإن الافتراض نفسه يظل غير مختبر في قياسات طومسون، ولاختبار معنى عدم اعتماد قيمة (e/m) المقاسة عليها فإن القياسات المطلوبة والتي تحدد الحامل الفردي للشحنة وللكتلة ناهيك عن الأشعة المقاسة فقط الحاملة للشحنة والكتلة.

لقد وضع توينسند أول خطوة في هذا الاتجاه بمعمل طومسون في العام نفسه. فقد نجح في استعمال أساسيات الغرفة السحابية (المطورة بواسطة ويلسون في عام ١٨٩٥) في تمركز غير كامل لحاملات الشحنة المفردة وعين شحناتهم بغير اعتمادها على الكتلة^(١)، إذا كان البخار المشبع الناتج في الغاز المشحون عن طريق التحليل الكهربائي أصبح فوق مشبع بواسطة التمدد فإنه يشاهد تكون قطرات مكثفة فيها، هذه الملاحظة استبقت بافتراض نظرية معقدة للطريقة التي تجعل الجسيمات المشحونة تحمل في الغرفة السحابية، وطبقاً لهذا فإن الإلكترونات تكون جسيمات مشحونة تتطلق عن طريق العمليات الإلكترونية للمكونات الجزيئية أو الذرية للمادة المؤدية وتعطى شحنة موجبة، وقد أضيفت المعرفة التجريبية التالية لهذه النظرية، ويمكن للشخص أن يعرف أنه في إمكان البخار المشبع أن يصل إلى حالة فوق التشبع عن طريق التمدد ومن المعروف أنه بالشروط الكمية لتكوين البخار المشبع لبضع قطرات من الماء عند القلب المكثف المتعادل وبالمثل لغير الأيونات المشحونة موجباً أو سالباً، وبات قاطعاً أن الغرفة السحابية

(١) بالنسبة إلى اختراع الغرفة السحابية بواسطة C.T.R. Wilson ، انظر : Millikan 1917,46 and Pais 1986,86.

تستخدم فقط في بناء قياس الجهاز الذي يمكن به ملاحظة حدوث الظاهرة، ومع هذا فإن حدوث الظاهرة لا تعتمد عليه ولا على تحليلها كميًا، وإنجاز وتحليل القياسات الموضوعية للغرفة السحابية هذا يتطلب إقامة دليل معرفي نظري على الأقل حتى يتم تصميم تجهيزات تجريبية التي تمكن هذه القياسات من التحقيق.

لقد عين توينسند شحنة القطرات المكثفة المفردة بالغرفة السحابية من الشحنة الكلية للدفع البخاري وعدد القطرات لوحدة الحجم، وقد قيست الشحنة الكلية لهذا البخار كهروستاتيكيًا وتم حساب عدد القطرات من وزن السحابة ومتوسط وزن القطرة المفردة^(١)، وعلى الجانب المقابل لقياس طومسون للمقدار، وهو قانون القوة في الميكانيكا الكلاسيكية وتوصيفاتها غير المرتبطة بالجسيمات غير المرئية ولكن بارتباطها بالخصائص الماكروسكوبية للقطرة السحابية، وحقق طومسون عام ١٨٩٨ أيضًا القياسات المعتمدة على هذا المبدأ^(٢).

(١) لقد ناقش بالتفصيل كل من Townsend 1897, Millikan 1917,43-47 لعمل توينسند التجريبي، ومع هذا فلم يتم ذكرها في Pais 1986

(٢) لقد ركز كل من Thomson 1899 – Millikan 1917,47-52 في أن القياس كان بطريقة أقل في مباشرتها عن تلك الخاصة بتوينسند: "بدلاً من قياس وزن هذه السحابة مباشرة مثلما فعل توينسند، فقد حسبها طومسون عن طريق الاعتبارات النظرية (...). لقد أوضح الفحص بعناية لتجربة طومسون أنها تحتوي جميع عدم التحديدات النظرية الموجودة في عمل توينسند، بينما تضيف اعتبارات لعدم التحديدات التجريبية". ومع هذا، انظر، Pais 1986,86 الذي نسب أول قياس مباشر للإلكترون (e) إلى طومسون (ولم يذكر تجارب قطرة الزيت الأخيرة على الإطلاق بواسطة Millikan فإن قياس طومسون للإلكترون واحدة من التطبيقات المبكرة لتقنية غرفة السحابة، فقد حدد-

إنه لا يتعين المقدار (e/m) من أشعة الكاثود ولكن تقاس مثل هذه الشحنة فقط من القطرات المكثفة التي ترجع القيمة المميزة للشحنة إلى الموجودات التي تعرف واحدة تلو الواحدة في العداد المخصص لذلك، في الحالة الأخيرة فقط يفترض أن تكون القياسات جيدة للملاحظات بالحس العام الذي نوقش في الفقرة (٢-٥)، ومع هذا فإن المقدمة المنطقية لأن تكون محل أجزاء الشحنة في الشحنة الحاملة المنفردة هي نفس الباقية غير المختبرة، وجميع القياسات لا يزال الشك باق بها كما تحمل كل قطرة مكثفة منفردة وحدة شحنة أولية (أو على الأقل مضاعفاتها العددية) وتشتتت هذه الشوكوك فقط بعد عام ١٩٠٩ عن طريق تجارب ميليكان لقطرة الزيت، أدت القياسات الصعبة والمطولة لأن يستطيع ميليكان تعيين القوة الناتجة من تأثير المجال الكهربائي على الشحنة المنفردة لقطرة الزيت^(١)، وعندما نشر ما عينه من قيمة e أكد طريقة قياسه التي تعتبر أول طريقة لقياس الشحنة لحاملات الشحنة المنفردة^(٢).

= عددًا من الجسيمات المشحونة عن طريق العد للقطرات وشحناتها الكلية بواسطة طرق القياس الكهربائية ووصلت إلى $e=6.8 \times 10^{-19}$ esu وهي نتيجة معتبرة جدًا في رؤية شيء جديد للطريقة، وأنها دلت على أن طومسون هو المكتشف للإلكترون". ويبدو ترسيخ الحقيقة هذه أنها عمل صعب في كتابة الفيزيائيين لهذا التوضيح التاريخي.

(١) انظر: Millikan 1911 ; Shamos 1959,238-249

(٢) انظر Millikan 1911,249 ، عن طريق الرجوع إلى المطبوعات المتقدم نشرها: "في ورقة البحث السابقة تم عرض طريقة قياس الشحنة الكهربائية الأولية والتي تختلف أساسًا عن الطرق التي استخدمت عن طريق المشاهدين الأولين فقط في جميع القياسات من تلك الشحنة المستخرجة وكانت أحد حاملات الشحنة المنفردة، وقد =

لم يستمر ميليكان بنفسه طويلاً في رؤية فائدة لمبدأ طريقة قياسه في تحقيق تجارب الشحنات الأولية المعزولة ولكن بالأحرى في القياسات الدقيقة لقيمة e التي تجعل هذه الطريقة ممكنة، وفي هذا الوقت فإن وجود الإلكترون والمكونات الذرية للمادة محققة جداً بالنسبة إليه نتيجة كثرة النتائج العملية من عدة مجالات أخرى عديدة للفيزياء.

٣-٢-٢ الفوتون

لقد ظل مجتمع الفيزياء لعدة سنوات غير متقبل فروض أينشتين لكمات الضوء في ١٩٠٥، ومع هذا وبعد ملاحظات عام ١٩١٩ لانعطاف الضوء بواسطة الجاذبية كما تنبأت النسبية العامة وقد زاد صيت أينشتين بطريقة هائلة حتى منح في عام ١٩٢١ جائزة نوبل، وتم اختيار فروضه للكم الضوئي؛ لأنها صنعت جسراً لنموذج بور الذري^(١)، وقد أعطى جائزة نوبل في عامي ١٩٢١، ١٩٢٢ لكل من أينشتين وبور في الاحتفالية نفسها لعام ١٩٢٢، وبعد ذلك تم تأكيد فرض الفوتون بالتحديد عن طريق إثبات التجربة

=حذف هذا التعديل المصادر الرئيسية لعدم التحديد والذي سمع عنها في التحديدات السابقة عن طريق الطرق المشابهة مثل تلك الخاصة بما صنعه كل من (Sir Joseph Thomson , H.A.Wilson, Ehrenheft and Broglie) والذين استدلوا على الشحنة الأولية من متوسط السلوك في المجالات الكهربائية والجاذبية لأسراب الجسيمات المشحونة".

(١) انظر: Wheaton 1983, 279-281.

لتأثير كومبتون^(١)، وقد حسمت التأكيدات التجريبية لقانون حفظ كمية الحركة والطاقة للحركة النسبوية، وحققت المعنى نفسه مثل قوة لورنر في تحقيق قياس طومسون للمقدار (e/m) ، فقد شرحت نقص تردد أشعة X بدلالة قانون القياس للجسيمات.

لقد مر ما يقرب من عقدين منذ ظهور فرض أينشتين^(٢) للكلم الضوئي وحتى تحقق تجريبياً الفوتون عن طريق بوث وجيجر^(٣)، وأطلق العنان في عام ١٩٠٥ لأفكار الفروض الكمية للضوء، وقد استعيدت الفروض النظرية لنظرية انبعاث الضوء لنيوتن المثبتة من فترة بواسطة تجارب التداخل ليوينج ونظرية فريزل الموجية للضوء^(٤)، وفي عام ١٩٠٥ لم يتم اختبارها لأنها لم تتصل بقانون القياس للمسار الزماني المكاني للجسيم، وحتى عام ١٩٢٠ لم

(1) Wheaton 1983, 282 – 286.

(2) Einstein 1905

(3) Bothe and Geiger 1925

(٤) انظر: Einstein 1905,133 : "طبقاً للافتراض المقصود هنا في استرسال تقدم الشعاع الضوئي من نقطة أن الطاقة لم يتوزع انتشارها باتصال على فراغات أكبر وأكبر ولكنها تتكون من عدد محدد من الفوتونات المتمركزة في نقاط فراغية والتي تتحرك دون انقسام وتستطيع أن تمتص وتنتج فقط ككل". قارن ذلك بالكلمات في التساؤلات التي جاءت في نهاية كتاب III في ضوء نيوتن "هل تكون الأشعة الضوئية عبارة عن أجسام صغيرة جداً منبعثة من مواد مضيئة؟". (Query 29) 370 , Newton 1730
والَمْ تكن أجساماً نامية وضوءاً متحولاً إلى شكل آخر وقد لا تكون أجساماً تستقبل كثيراً من أنشطة جسيمات الضوء التي تدخل مكوناتها؟" (Query30) Ibid,374.

بؤمن بهذا إلا قليل^(١)، وفي ورقة بحث أينشتين المنشورة لعام ١٩٠٥ ظهرت قيمة ساعدت على الكشف المبدئي للفرض الكمي للضوء تسمى بقدرتها التوحيدية، وتشرح بطريقة منتظمة الظاهرة الكهروضوئية وعدة ظواهر تجريبية أخرى والتي تظهر عند تفاعلات الضوء والمادة.

يستطيع الضوء أن يتسبب في إيجاد تيار فوتوني وقد عرف ذلك منذ نهاية القرن التاسع عشر، ومع هذا فلم يكن في استطاعة الفيزياء الكلاسيكية تفسير الطريقة التي يعتمد فيها التيار الفوتوني على تردد الضوء الساقط وشدته، أما طبقاً للفرض الكمي الضوئي لأينشتين فقد نشأ التيار الفوتوني كالتالي: يمتص الضوء في أقسام من الطاقة (كمات) $h\nu$ وتتساب الإلكترونات بطاقة حركة مقدارها $(h\nu - k)$ حيث إن k هي الطاقة المناسبة للإلكترون، وقد اختبر ميليكان في عام ١٩١٤ هذا الشرح النظري للظاهرة الكهروضوئية تجريبياً وأكد ذلك كميًا بدقة عالية^(٢)، وحيث إن فرض الضوء الكمي غير متصل بقوانين قياس أخرى وأكثر من ذلك أنه تصادم مع النظرية الموجية للضوء، فلم تؤخذ نتائج ميليكان كتجارب تأكيدية لذلك، وينقص الفرض الكمي الضوئي أي تكوين مادي يشير للجسيم، فإنها لم تقاس بقانون طبيعة مماثل للجسيمات ولا بقاعدة ملاحظة متصلة بمثل قانون القياس هذا وبالتالي فقد وصف أينشتين الظاهرة الكهروضوئية عن طريق المعادلة $E = h\nu - k$ التي انبثقت من النموذج الجسيمي للضوء والذي كون خلفيتها المساعدة على

(١) تأتي الفروض النهائية لتفريق الفوتونات من خلال تأثير كومبتون؛ أي أنه بعد عام من حصول أينشتين على جائزة نوبل نتيجة تفسير التأثير الكهروضوئي (حتى ذلك الوقت ظل النظر إلى هذا على أنه قانون ظاهراتي - منطوق فينومونولوجي)، انظر

. Wheaton 1983,279-286

(٢) انظر: . Trigg 1971, chap.7; Wheaton 1983,238-241

لثاني كومبتون⁽¹⁾، وقد حسمت التأكيدات التجريبية لقانون حفظ كمية الحركة و الطاقة للحركة التذبذبية، وحققت المعنى نفسه مثل قوة لورنتز في تحويل قياس طومسون للمقدار (e/m) ، فقد شرحت نقص تردد أشعة X بدلالة قانون القياس للجسيمات.

لقد مر ما يقرب من عقدين منذ ظهور فرض أينشتاين⁽²⁾ لكم الضوئي وحتى تحقق تجريبياً الفوتون عن طريق بوث وجيجر⁽³⁾، وأطلق العنان في عام 1905 لأفكار الفروض الكمية للضوء، وقد استمدت الفروض النظرية لنظرية انبعاث الضوء لنيتون المثبتة من فترة بواسطة تجارب التداخل ليوينج ونظرية آرينيل الموجية للضوء⁽⁴⁾، وفي عام 1905 لم يتم اعتبارها لأنها لم تتصل بقانون القياس للعمار الزمني المكاني للجسيم، وحتى عام 1920 لم

(1) Wheaton 1983, 282 - 286.

(2) Einstein 1905

(3) Bothe and Geiger 1925

(4) انظر: Einstein 1905, 139 : تطبيقاً للافتراض المقصود هنا في استرسال تقدم الشئاع

الضوئي من نقطة أو الطاقة لم يتوزع انتشارها بتصل على فواعل أكبر وأكبر ولكنها تتكون من عدد محدود من الفوتونات المتمركزة في نقاط فواعلة والتي تتحرك دون تضام ومنتظبع أن تتحص وتنتج فقط ككل. لأن ذلك بالكلمات في التناول التي جاءت في نهاية كتاب III في ضوء نيوتن هل تكون الأشعة الضوئية عبارة عن أجسام صغيرة جداً منبهة من مواد مضبنة؟. (Query 29) 370 , Newton 1730 وكم تكن أصلنا لامية وضوياً متحولاً إلى شكل آخر وقد لا تكون لجسماً تستقبل كثيراً من أنشطة حسابات الضوء التي تدخل مكوناتها (Query 30) 374-375.

لا من بهذا إلا قليل^(١)، وهي ورقة بحث أينشتاين المنشورة لعام ١٩٠٥ ظهرت لهمة ساعدت على فكشفاً لمبني الفرض الكمي للضوء تسمى بقدرتها الموحدية، وتشرح بطريقة منتظمة الظاهرة الكهروضوئية وعدة ظواهر جريبية أخرى والتي تظهر عند تفاعلات الضوء والمادة.

يستطيع الضوء أن يتسبب في إيجاد تيار فوتوني وقد عرف ذلك منذ اية القرن التاسع عشر، ومع هذا فلم يكن في استطاعة الفيزياء الكلاسيكية تصوير الطريقة التي يعتمد عليها التيار الفوتوني على تردد الضوء الماقط وشدة، أما طبقاً للفرض الكمي للضوءي لأينشتاين فقد نشأ التيار الفوتوني الختالي: يمتص الضوء في أقسام من الطاقة (كمات) $h\nu$ وتساب الإلكترونات بطاقة حركة مقدارها $(h\nu - k)$ حيث إن k هي طاقة العنماية للإلكترون، وقد اهنير ميليكان في عام ١٩١٤ هذا التشرح النظري للظاهرة الكهروضوئية جريبياً وأكد ذلك كمياً بدقة عالية^(٢)، وحيث إن فرض الضوء الكمي غير متصل بقوانين قياس أخرى وأكثر من ذلك أنه تصادم مع النظرية الموجية للضوء، فلم تؤخذ نتائج ميليكان كتجارب تأكيدية لذلك، وينقص لفرض الكمي للضوءي أي تكوين مادي يشير للجسيم، فإنها لم تقاس بفوتون طبيعة سائل للجسيمات ولا بقاعدة ملاحظة متصلة بعنل قانون ققياس هذا ويلتالي قد وصف أينشتاين الظاهرة الكهروضوئية عن طريق المعادلة $E = h\nu - k$ التي تبنقت من النموذج الجسيمي للضوء والذي كون خلفتها المساعدة على

(١) تكفى افروض النهائية لتفريق فوتونات من خلال تأثير كومبتون، أي أنه بعد عام من حصول أينشتاين على حقزة نوبل نتيجة تصور التغير الكهروضوئي (حتى ذلك الوقت ظل النظر في هذا على أنه قانون ظاهري - منطبق فينومولوجي)، انظر

. Whentea 1983,279-286

(٢) انظر: . Whentea 1983,248-241; Trigg 1971, ebep.7

لناتير كومبتون⁽¹⁾، وقد حسمت التأكيدات التجريبية لقانون حفظ كمية الحركة و الطاقة للحركة انمسيوية، وحققت المعنى نفسه مثل قوة لورنر في تحصيل قياس طومسون للمقدار (e/m) ، فقد شرحت نقص تردد أشعة X بدلالة قانون القياس للجسيمات.

لقد مر ما يقرب من عقدين منذ ظهور فرض أينشتاين⁽²⁾ لكم الضوئي وحتى تحقق تجريبياً الفوتون عن طريق بوث وجيجر⁽³⁾، وأطلق العنان في عام 1905 لأفكار الفروض الكمية للضوء، وقد استمدت الفروض النظرية لنظرية انبعاث الضوء لنيتون المثبتة من فترة بواسطة تجارب التداخل ليوينج ونظرية اربنل الموجية للضوء⁽⁴⁾، وفي عام 1905 لم يتم اعتبارها لأنها لم تتصل بقانون القياس للعمار الزماني المكاني للجسيم، وحتى عام 1920 لم

(1) Wheaton 1983, 282 - 286.

(2) Einstein 1905

(3) Bothe and Geiger 1925

(4) انظر: Einstein 1905, 139 : تطبيقاً للافتراض المقصود هنا في استرسال تقدم الشاع

الصوتي من نقطة أو الطاقة لم يتوزع انتشارها بتصل على فواعل أكبر وأكبر ولكنها تتكون من عدد محدود من الفوتونات المتمركزة في نقط فواعلة والتي تتحرك دون تضام ومنتطبع أن تتحص وتنتج فقط ككل. لأن ذلك بالكلمات في التسلالات التي جاءت في نهاية كتاب III في ضوء نيون هل تكون الأشعة الضوئية عبارة عن أجسام صغيرة جداً منبهة من مواد مضبنة؟. (Query 29) 370 , Newton 1730 وكم تكن أصلنا نامية وضوياً متحولاً إلى شكل آخر وقد لا تكون لجسماً تستقبل كثيراً من أنشطة حسابات الضوء التي تدخل مكوناتها (Query 30) 374-375.

لا من بهذا إلا قليل^(١)، وهي ورقة بحث أينشتاين المنشورة لعام ١٩٠٥ ظهرت
 لهمة ساعدت على فكشف المبدئي للفرض الكمي للضوء تسمى بقدرتها
 الموحدية، وتشرح بطريقة منتظمة الظاهرة الكهروضوئية وعدة ظواهر
 جريبية أخرى والتي تظهر عند تفاعلات الضوء والمادة.

يستطيع الضوء أن يتسبب في إيجاد تيار فوتوني وقد عرف ذلك منذ
 اهاية القرن التاسع عشر، ومع هذا فلم يكن في استطاعة الفيزياء الكلاسيكية
 تصوير الطريقة التي يعتمد عليها التيار الفوتوني على تردد الضوء الماقط
 وشده، أما طبقاً للفرض الكمي للضوءي لأينشتاين فقد نشأ التيار الفوتوني
 الختالي: يمتص الضوء في أقسام من الطلقة (كمات) $h\nu$ وتساب الإلكترونات
 بطاللة حركة مقدارها $(h\nu - k)$ حيث إن k هي لطلقة المنساب للإلكترون، وقد
 اهنير ميليكان في عام ١٩١٤ هذا التشرح النظري للظاهرة الكهروضوئية
 جريبياً وأكد ذلك كمياً بدقة عالية^(٢)، وحيث إن فرض الضوء الكمي غير
 متصل بقوانين قياس أخرى وأكثر من ذلك أنه تصادم مع النظرية الموجية
 للضوء، فلم تؤخذ نتائج ميليكان كتجارب تأكيدية لذلك، وينقص للفرض
 الكمي للضوءي أي تكوين مادي يشير للجسيم، فإنها لم تقاس بفوتون طبيعة
 سائل للجسيمات ولا بقاعدة ملاحظة متصلة بعنل قنون تقليس هذا ويلتالي
 قد وصف أينشتاين الظاهرة الكهروضوئية عن طريق المعادلة $E = h\nu - k$
 التي تبنقت من النموذج الجسيمي للضوء والذي كون خلفتها المساعدة على

(١) تكفى افروض النهائية لتفريق فوتونات من خلال تأثير كومبتون، أي أنه بعد عام
 من حصول أينشتاين على حقزة نوبل نتيجة تصور التغير الكهروضوئي (حتى ذلك
 الوقت ظل النظر في هذا على أنه فلهون ظاهرتي - منطلق فينومورولوجي)، انظر

. Whentea 1983,279-286

(٢) انظر: . Whentea 1983,248-241; Trigg 1971, ebep.7

الكشف وقد تأكدت فقط جيداً في السنوات التالية بقانون ظاهراتي والذي تأخر على الفهم نظرياً.

في عام ١٩١٦ ونتيجة امتداد أينشتين في تفسير فرضه الكمي الضوئي لعام ١٩٠٥ فقد أوجد أول نظرية إحصائية لامتناهات الضوء^(١) وانبعائه، وقد مهدت هذه النظرية الأرضية لقبول الفرض الفوتوني لتتبع مكوناتها التجريبية لجزئيتين خاصيتين حاسمتين: فمن وجهة تصل الفرض الكمي الضوئي بالشروط الكمية للنموذج الذري لبور وهي تجعلها تتمكن من استنتاج تردد الإشعاعات الانتقالية في ذرة الهيدروجين^(٢) وفجأة تمتد القدرة التوحيدية للفرض الكمي الضوئي إلى نطاق الظواهر التجريبية والتي بها أصبح فشل الفيزياء الكلاسيكية واضحاً، ومن جهة أخرى عزا أينشتين للفوتون في ارتباطه بالطاقة $E = hv$ وكمية الحركة $p = \hbar k$ ، حيث k هي المتجه الموجي للموجة الكهرومغناطيسية ذات العدد الموجي $k = 2\pi x v / c$ وبهذه الطريقة تصبح العلاقة بين الطاقة وكمية الحركة $E^2 = p^2 c^2$ للحركة النسبوية قابلة للتطبيق^(٣) ومن ثم اتصل الفرض الفوتوني بنظرية القياس للجسيم النسبوي ذي كتلة السكوني صفر.

ويتقدم هذا الجسيم ليسير بسرعة الضوء، وطبقاً للمبدأ النسبوي لتساوي الكتلة والطاقة وتكون كتلته النسبوية $m = hv/c^2$ ، ويكون تفاعلها مع الجسيمات الأخرى يخضع لقانون الحفظ النسبوي للطاقة وكمية الحركة،

(1) Einstein 1917.

(2) Ibid., 124, equ.(9).

(3) طبقاً لمفاهيم علم فيزياء الطاقة العالية الحالية، تحتوى الحركة النسبوية للقوانين التي تصف تقدم مسار الجسيمات (الحررة، أى غير المربوطة) بالسرعات النسبوية كما تطبق قوانين حفظ الطاقة - وكمية الحركة في تفاعلاتها.

وطبقاً لحفظ الطاقة - كمية الحركة فيسبب الجسم ارتداداً للجسيم الآخر ويقابل هذا الارتداد كمية حركة منتقلة في التفاعل، ونتيجة كمية الحركة المنتقلة هذه فإن الجسيم يفقد طاقة وطبقاً للفرض الفوتوني فإن هذه الطاقة المفقودة ليس لها أي تأثير على الشدة ولكنها تقلل تردد الإشعاع الكهرومغناطيسي. لتكامل الفرض الفوتوني في الحركة النسبوية أخذت خطوة مشابهة كالتي اتخذت في عام ١٨٩٥ عندما طبق طومسون قانون قوة لورنز على الإلكترونات الذي توقعها كمكونات أشعة كاثود، وأصبح الفوتون الآن موضوع نظرية قياس مطابقاً للجسيمات النسبوية الكلاسيكية لكي تصل انتشار الضوء الزماني- المكاني بقانون الحفظ الذي تحقق في تبادل الطاقة بين كمية حركة الجسيم الكتلي وتردد الفوتون، وارتبط الآن الفرض الكمي الضوئي بالتنبؤ المختبر لكمية الحركة المصاحبة بالطول الموجي وبالترددات الضوئية بالتنبؤ المختبر لكمية الحركة المصاحبة بالطول الموجي وبالترددات الضوئية قبل التفاعل وبعده بين الضوء والمادة، بخلاف الفرض الفوتوني المجرد لعام ١٩٠٥ والذي لم يتح له أن يتأكد بالتجريب المباشر إلا أن الكفاية التجريبية لقانون القياس هذا أمكن اختباره.

لقد جاء التقدم المفاجئ للفرض الفوتوني، في عام ١٩٢٢ عندما طبق كومبتون قوانين الحركة النسبوية لتشتت أشعة جاما والإلكترونات، وقد توافقت تنبؤاته الكمية الظاهرة بشكل يثير الدهشة مع النتائج التجريبية المتوفرة فعلاً^(١) كما في حالة اكتشاف الإلكترون فقد حسمت مدى تطبيق نظرية القياس في تماثلها للجسيم وقبولها الفرض الفوتوني في المجتمع

(1) Compton 1923 and Debye 1923; Weheaton 1983,283-286 ; Mehra and Rechenberg 1982, 512-514.

العلمي، ومع هذا فلم ينظر لهذا بشكل كاف وكانت الكهربية الديناميكية الكلاسيكية في حالة رهان واخترع كل من بور وكرامر وسلاتر نظرية مطابقة لكي يخزنوها⁽¹⁾، وقد تنبأت بانتهاك حفظ الطاقة - كمية الحركة للعمليات دون الذرية كل على حدة وخزنت الصورة الكلاسيكية في المستوى الاحتمالي فقط (هكذا مهدوا الطريق للتفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم)، ولكي يتحقق الفرض الفوتوني مقابل نظرية الـ BKS لزم الاجتياح التمرکز الفوتونات المفردة ذات الطاقة $h\nu$ ، وبخلاف قياس وحدات الشحنة الكهربية الأولية الفردية بواسطة ميليكان فإنها لم تطول بعد مجيئها، لقد أثبتت تجربة بوث وجيغر عام ١٩٢٥ أن حفظ الطاقة - كمية الحركة النسبوية لم تتحقق فقط في المتوسط الزمني لتشتت الضوء عند الإلكترونات ولكن أيضاً تحققت لعملية التشتت المفرد، وتأكد كل من بوث وجيغر من حفظ الطاقة - وكمية الحركة في الحالة المستقلة والموضحة عن طريق وسائل العداد التاطبيقي بأنه في تأثير كومبتون يرتبط الفوتون المفرد فعلياً بالإلكترون المرتد⁽²⁾ وقبلت التطابقات الدليل التجريبي لظواهر الفوتونات المستقلة.

ولكن هذه ليست القصة في مجملها، فيوجد ما توازي معها بقياسات ميليكان للمقدار (e/m) لمدة تتراوح بخمسة عشر عاماً بعد قبول فرض الإلكترون وبتواز آخر مع تأكيد افتراض النيوتريينو بواسطة اضمحلال β غير المباشر وذلك في غضون عقدين ونصف بعد تحقيق فرض النيوتريينو، ومنذ الأيام القديمة للنظرية الكمية تم تطوير العديد من نظريات شبه الكلاسيكية لتفاعلات الضوء والمادة، فقد عالجا الذرة كميًا ولكن مع

(1) Bohr et al. 1924

(2) Bothe and Geiger 1925

الاحتفاظ بالوصف الكلاسيكي للإشعاع الكهرومغناطيسي، فشرحوا بحق الظواهر التجريبية والتي أخذت كدليل للفوتون متضمنة التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتون^(١).

لقد منح أينشتين في عام ١٩٢٢ جائزة نوبل - ليس بسبب نظريته النسبية ولكن لتفسيره للظاهرة الكهروضوئية باعتبار أن الفوتونات شبيهة بالجسيمات حيث تصطدم بسطوح المعادن مبعثة إلكترونات، وبانتظام فإن أمهات الكتب تعيد مناقشات أينشتين كإثبات أن الضوء يحمل طبيعة جسيمية، وحتى الآن وبشيء من التهكم فإن استنتاجات أينشتين لم تصل بقوة إلى حد الإقناع أو أن تكون مثبتة الأهلية^(٢)، وبذل ألبرت أينشتين جهداً حتى يقنع عظماء الفيزيائيين منذ نيوتن وقد استقبل جائزة نوبل لعمل كان من حسن الحظ خارقاً، وأن ذلك الجهد المضاعف لهذا العمل الذي استخدم فيه من قبل أدوات تجهيزية وضحت المفهوم المزدوج الموجي - الجسيمي ولحسن الحظ يكون صحيحاً على الرغم من الخروق^(٣).

(١) انظر : Greenstein and Zajonc 1997,23 بما غطتها من المادة العلمية المنشورة، وقد ناقشوا بعض تفصيلات (ibid., 23 - 26)، والنظرية شبه الكلاسيكية للظاهرة الكهروضوئية المطورة بواسطة Lamb و James وسكلى (1969) وكان أهم مدافع بارز للشرح شبه - الكلاسيكي للظاهرة الكهروضوئية هو Planck، وقد أتى شرودنجر (Schrödinger) 1927 بالشرح شبه الكلاسيكي لظاهرة كومبتون.

(2) Greenstein and Zajonc 1997 , 23

(3) Greenstein and Zajonc 1997 , 34

لقد جاء الإثبات الحاسم للفوتونات المفردة عن طريق التجارب التطابقية للضوء الكمي الحديث في غضون العقود الستة بعد حصول أينشتين على جائزة نوبل^(١)، إن المغزى التاريخي لهذا الفوتون هو أنه لم يكن سهلاً تحقيق الدليل التجريبي للجسيمات المفردة، وقد كان ضرورياً مناقشة هذه المعايير للحالتين المدروستين سابقاً ناهيك عن الشروط الكافية للكشف عن الجسيم، وكان الإثبات الحاسم فقط للجسيمات ظاهراً مليئاً في إيجادهم واستخدامهم كأدوات في تجارب أخرى^(٢).

٣-٣ تنظير الملاحظات

لقد اكتمل بكل تحديد اكتشاف الإلكترون فقط بعد تجارب قطرة الزيت لميليكان، وعلى وجه الشبه اكتمل فقط تحقيق الفوتون بواسطة إثبات حدوث تأثير كومبتون عند مستوى عمليات التشتت المستقل فقد أوضحت دراسات كلا الحالتين تاريخياً أن الدليل التجريبي يعتمد على نوعين من الافتراضات النظرية حول الجسيمات ترجع إلى التوضع وإلى الوجهة الديناميكية للكتلة الكلاسيكية:

-
- (١) تم تحليل ازدواجية الموجة-الجسيم في الفصل السابع، وقد تولدت أول الفوتونات المفردة تجريبياً عندما أمكن تحضيرها كجسيمات (انظر الفقرة ٧-٣) عن طريق الفوتون الآخر لزوج الفوتون المتشابك (انظر Greenstein and Zajonc 1997 - 33 (35) الذى يرجع إلى (Clauser/and Grangier et al 1986).
- (٢) انظر: ملاحظات تحفظ (Eddington) المتعلقة بافتراضات النيوتريينو والمعيار الواقعي لـ Hacking التى تمت مناقشته في الفقرتين (٢-٣، ٢-٤).

١- نظرية القياس الموضوعي: تحتوي هذه النظرية على افتراضات حول احتماليات تمركز الجسيم بواسطة جهاز قياس مناسب، وأنها نظرية حول كيفية عمل تأثيرات موضعية للجسيم المشاهد أو المرئي.

٢- نظرية القياس الديناميكي: وهذا يكون جزء الديناميكا الفيزيائية التي تجعلها قادرة على قياس الكميات الديناميكية للجسيم مثل الكتلة والشحنة.

كما نعلم اليوم أنه لا يمكن فصل النظريتين، وطبقاً لنظرية الكم فلا شيء آخر يكون فيه تمركز الجسيم، ولكن كشف بواسطة وسائل العداد الجسيمي كم معين للكتلة والطاقة أو الشحنة، ويكون هناك فاصل افتراضي حاد بين قاعدة الملاحظة والنظريات القياسية عند غالب الإمكان لبدايات الفيزياء الجسيمية، ومع هذا تؤخذ النظريتين معاً لتخدم تحقيق الشروط الخاصة بالمفهوم العمومي للملاحظة كما هو موضح في الفقرة (٢-٥)، حيث تجعلها نظرية القياس الموضوعي ممكنة لملاحظة التأثير الموضوعي في العداد الجسيمي والذي يستطيع أن يرجع المسار إلى تمركز سببي مستقل في منطقة معينة للزمان - المكاني، وتجعلها نظرية القياس الديناميكية ممكنة لتعزو لهذا السبب المستقل خصائص الكميات الفيزيائية للجسيمات دون الذرية؛ أي تكون الكتلة والشحنة إلى الإلكترون وكمية الحركة والطاقة للفوتون، وقد عبر عن تحفظين أولهما الشروط السابقة الضرورية فضلاً عن الكافية والثانية طبقاً للنظرية الكمية فلم يستطع السبب نفسه أن يكون مستقلاً مثل الجسيم الكلاسيكي^(١).

(١) انظر : الفقرة (٦-٦) بالفصل السادس.

بعد التأكد من الإلكترون والفوتون في العقود التالية تم تنظير قواعد الملاحظة للفيزياء الجسيمية على نطاق واسع، وقد افترض أن القياسات الموضوعية وتخليق المسارات الجسيمية ترجع إلى تفاعل الجسيمات دون الذرية مع ذرات العداد الجسيمي وأن هذه التفاعلات تخضع لقوانين النظرية الكمية، كما تتبنى الخلفية المعرفية لتوليد المسارات الجسيمية وتسير التفاعلات الجسيمة في اتجاه أكثر تطوراً وتعقيداً، وقد دخلت هذه الخلفية المعرفية المعقدة في نظريات القياس للفيزياء الجسيمية.

وقد كان هذا واضحاً في تحليل المسارات الجسيمية، بكمياتها الدينامية التي تميز مسار أو كتلة وشحنة الجسيم المعني، وهذا واقع حقيقي للتوصيف الكلاسيكي والنظري الكمي للجسيم أو المسار، وكانت بالأصل نظرية القياس للكتلة والشحنة كلاسيكية صرفة، وقد نقحت جزئياً في الثلاثينيات والأربعينيات بالقرن العشرين (١٩٤٠ - ١٩٣٠) على أساس المعرفة التجريبية وجزئياً على أساس نظرية الكم، وقد ازداد الاحتياج للتقدم في طرق التحليل الكمي لكي يتم فهم المادة الملاحظة من الأشعة الكونية؛ حيث تحوى على أنواع جديدة من المسارات الجسيمية والتي لا تتفق مع نظريات القياس السابقة ولا مع الافتراضات المرتبطة بوجود هذه الأنواع من الجسيمات، ومن ثم فإن نظرية القياس المطورة في ثلاثينيات وأربعينيات القرن الماضي لتحليل المسارات الجسيمية ما زالت صالحة وتستخدم حتى يومنا هذا، وتطورها هذا أوجد الديناميكا الكهربائية الكمية وأصبحت مثالاً أولياً للعلاقة بين نظريات القياس المستخدمة في الفيزياء التجريبية وتكوين النظرية الأساسية للظواهر اتية الرئيسة والتي تحققت تجريبياً، وكان ذلك في بادئ الأمر

في حالة انفصال تام، وقد اكتشف البوزيترون أثناء هذه المرحلة لنظرية قياس المسارات الجسيمية (فقرة ٣-٤) باعتبار الحقيقة التي تقول إن كلا النظريتين اللتين لهما التطبيقات المطلوبة نفسها تخلفان صعوبات خطيرة فيما بعد، ومن ثم فقد بذلت جهود ضخمة في إعادة حلهم بواسطة طرق قياس مترابطة ومستقلة مع بعض التطبيقات العملية الجاهزة والمتوافق عليها للنظرية الجديدة (فقرة ٣-٥)، وفي النهاية وبعد أن عززت النظرية الجديدة فقد أصبحت متجانسة مع نظرية قياسها وخدمت كنظرية قياس مستقلة لهذا الميدان الجديد.

يرتبط أيضًا تزايد التنظير لنظريات القياس بظواهر فيزياء الجسيمات وباستدعاء الشرح الموضح في الفقرة ٢-٤ والمرتبطة بظواهر العلم الجاليلي. لقد أتاحت الدلائل التجريبية لإدخال المزيد وأكثر من نظرية، إضافة إلى أن الجديد في التقنية وفر أنواعًا جديدة من أجهزة القياس التي تجعل المشاهدات أكثر تحملاً على النظرية، يتضمن الجسيم في الفيزياء الجسيمية علمياً تكنولوجيا معقدة جداً ونظريات قياسية، حقيقة أن المعلومات المتوفرة في يومنا هذا إلكترونية ويمكن مشاهدتها بوسائل أجهزة الحاسب (الكمبيوتر)، فقد سجلت النتائج الخاصة بتجارب تشتت الطاقات العالية إلكترونياً وتم تحليلها بواسطة أجهزة الكمبيوتر، وقد حولت نظريات القياس إلى رموز تلغرافية (كودية) في برامج الحاسب.

وفي مجال الفيزياء الجسيمية تم حصر القياسات الموضوعية والمسارات الجسيمية والأحداث التشتتية والرنينيات كدليل تجريبي للجسيمات الأولية، ويتم الأساس التنظيري للملاحظات بالخطوات النظامية التالية: القياسات

الموضعية هي الأساس، وفي بعض الحالات الحاسمة تكون الملاحظة المباشرة بالحس التجريبي الدقيق، كما أن المسارات يمكن مشاهدتها عن طريق وصلها بالقياسات الموضعية المجاورة ويمكن الحصول على الأحداث عن طريق وصلها بمسارات الجسيمات المجاورة أو المرتبطة بها، كما يمكن الحصول على الحالات الرنينية (الرنينيات) من إحصائيات المجموعات الموحدة لأحداث التشتت.

وستشرح لنا المناقشة التالية الجوانب النظرية لهذا التزايد التطويري وسنوضح بأي حس ما زالت منضبطة في الأخذ بقاعدة الملاحظة للمفاهيم الجسيمية الموجودة.

٣-٣-١ القياس الموضعي

كما في المجالات المختلفة في الفيزياء فإن قياس الكميات الزمانية المكانية تعتبر أساسية في فيزياء الجسيمات، فتظهر لنا أولاً القياسات الموضعية، ففي العقود الأولى لظهور الفيزياء الجسيمية والتي تعتمد مباشرة على ملاحظة الظواهر التجريبية مثل سماع "الطقطقة" في عداد جيجر أو ملاحظة الوميضيات المتسببة من أشعة ألفا الساقطة عليه والتي تستكمل عن طريق ملاحظة الملامح الظاهرية للقياسات الموضعية المتتابعة مثل شكل ومسافة المواضع المفردة في هذا التتابع والترتبة الزمانية للقياسات الموضعية المتحققة عن طريق القياسات الزمنية، تكون هذه الخصائص قواعد الملاحظة لخصيصة الكتلة والشحنة للجسيمات دون الذرية، (ومع هذا ففي أواخر العشرينيات من القرن العشرين أُلحقت هذه الملامح الكلاسيكية للكتلة الشحنة

للجسيم عن طريق أهداب التداخل المرئية الناتجة من مرور الإلكترونات في البلورة؛ حيث تؤكد هذه الظاهرة الخاصية الموجية - الجسيمية المزدوجة في ميكانيكا الكم) يعتمد قياس طومسون للمقدار (e/m) بطريقة عادية على القياسات الموضعية ويقال: تعتمد على قياس الانحراف الموضعي لإشعاع الكاثود الموجود في المجالين المغناطيسي والكهربائي، وقد أكد ميليكان في العقد التالي القياس الموضعي بأن قيمة (e/m) قد تنسب فعلياً لحاملات الشحنة المفردة.

ومع هذا فإن تمرکز الجسيمات عن طريق العداد كان ممكناً أيضاً دون أي نظرية معقدة للجسيمات وتفاعلاتها مع العداد.

ولبضع سنين قليلة بعد قياس طومسون لـ (e/m) جاءت بإثبات أول تجربة للطبيعة الجسيمية لأشعة ألفا للفرض الجسيمي السابق في الملاحظات النظرية المعتمدة على حس التجريبيين الدقيق، وامتد هذا الأساس الحاسم وتم معايرته بواسطة قياس بيرين للحركة البراونية لعدة سنوات قليلة لاحقة⁽¹⁾.

لقد حقق رذرفورد ومعاونوه منذ عام ١٩٠٦ أشهر تجاربهم التشتتية لأشعة ألفا ومكوناتها التي كانت أول جسيمات استطاعت أن تتمركز وتشاهد مستقلة عن أي نظرية قياسية لديناميكيته وتفاعلاتها مع أجهزة القياس وكما اكتشف كروكس وآخرون في عام ١٩٠٣ الشاشة ذات رقائق كبريتات الزنك والتي بدأت بإظهار الضوء الفوسفوري في الإظلام التام عندما تعرض إلى

(١) نتيجة تجارب Perrin التي وصفت بدقة في (Trigg 1973) بالفصل الرابع، تمت الموافقة على الفروض الذرية بواسطة المدافعين عن مذهب الطاقة مثل: Ostwald

انظر: Macknnon 1982 , 126,27 .

أشعة ألفا، وشوهد عن طريق زجاج مضخم ويمكن تحويل هذا الوميض إلى وميض ضوئي مفرد متنوع. وقد علق كل من رذرفورد وشادويك وإيليس على هذه الظاهرة في كتابهم المرجعي عن النشاط الإشعاعي عام ١٩٣٠ كما يلي:

بالنظر إلى سطح الشاشة ذات الزجاج المضخم فيرى الضوء من الشاشة بتوزيع غير منتظم ولكن متكون من عدد من النقاط الوميضية للضوء المنتشتت على السطح ولفترة زمنية قصيرة، وقد اخترع كروكس جهازاً بسيطاً يوضح الوميضيات يسمى جهاز الرؤية الوميضية المغزلي وقد غطيت نقطة صغيرة بخيط رفيع من الراديوم ووصفت على بعد عدة ملليمترات من شاشة كبريتات الزنك والمثبتة عن نهاية أحد الطرفين لأنبوبة قصيرة وتكون الرؤية خلال عدسة عند الطرف الآخر وفي غرفة إظلام يرى سطح الشاشة كخلفية نقطية مظلمة مع نقط لامعة من الضوء والتي تأتي وتروح بسرعة كبيرة جداً، وقد جاءت هذه التجربة الجميلة بشكل قوى قبل ملاحظة تصميم قذف الراديوم بسيل من القذائف والتي يسبب كل منها وميضاً من الضوء المصطدم بالشاشة^(١).

إن وصف المشاهدات لا يماثل العرض المعتاد للكتب المرجعية الخاصة بالفيزياء التجريبية، وقد زاد الوصف الشبيه المعطى بواسطة دوهم

(1) Ruther Ford etal. 1930,54 – 55.

لما أدركه ليमान حين انتهى من النظر على كاهل الفيزيائيين التجريبيين^(١)، إن الخطوة من بداية الملاحظة التجريبية وحتى القياس وما يسميه دوهميم "رمزية" التفسير للظواهر بدلالة الكميات الفيزيائية^(٢) لم يؤد هنا على الإطلاق، فلم تكن نظرية انبعاث أشعة ألفا عن طريق الراديوم ولا نظرية تفاعلها مع كبريتات الزنك تدخل في وصف الملاحظة وحدثها، ما يوصف هو الأمثلة الكيفية للظاهرة التجريبية ناهيك عن معاييرها المعقدة على شرح الأساس النظري وطرق القياس، ويعتمد فقط إثبات الطبيعة الجسيمة لأشعة ألفا على السبب الاستدلالي من ملاحظة الوميض على الشاشة الوميضية.

عينت الكميات الدينامية لجسيمات ألفا في التجارب السابقة، وقد اعتمدت على مبادئ قياس طومسون لـ e/m ، واستخدم رذرفورد النسبة E/M للشحنة والكتلة لأشعة ألفا α فيها في أول وقت^(٣)، وقد استعمل رذرفورد ومساعدوه بعد عام ١٩٠٦ الوسيلة الوميضية لقياس زاوية التشتت لجسيمات ألفا المفردة، إن الاختبار التجريبي لصيغة التشتت الشهيرة لرذرفورد اعتمدت أيضاً على هذه الوسيلة^(٤).

(١) انظر : تغطية oft لوصف الملاحظات التي لاحظها Lyman لفعاليات الفيزيائيين في قياس المقاومة الكهربائية للملف الخيطي، (الفصل الثامن و 1906 Duhem).

(2) Ibid. and (2.1).

(٣) التي لفتت النظر إلى أن الجسيمات هي أنوية هيليوم
Rutherford et al. 1930 , 41-46.

(٤) انظر أيضاً الفصل الخامس

Geiger and Marsden 1913; (Trigg 1971,chap.5)

كانت معظم وسائل القياس الموضوعي أكثر تحميلاً - نظرياً من مركز الجسيمات على الشاشة الوميضية، وبعضها يعتمد على عمل التأثيرات الماكروسكوبية لتفاعل الجسيم مع المادة ويتم رؤيته مباشرة طبقاً للخلفية المعرفية ذات العلاقة الرياضية، وقاسها آخرون عن طريق تكبير النبضات الكهربائية التي أنتجت، وبسبب النقص في الخلفية المعرفية للعمليات دون النظرية فيما حول عام ١٩٠٠ استعملت نظرية القياسات الموضوعية لعمل تأكيدات تجريبية للجسيمات التي كانت في ذلك التوقيت أولية، وأنها أيضاً غير معتمدة على قوانين القياس المنبني على الديناميكا الكلاسيكية، يتشابك اليوم القياس الموضوعي مع العديد من قوانين الديناميكا التي تكون مجموعة معقدة تدريجياً من الافتراضات النظرية الكلاسيكية والكمية، وبالمقارنة مع الطريقة الوميضية فإن مركز الجسيمات المشحونة بوسيلة الغرفة السحابية كانت فعلياً محملة نظرياً، وتبني على نظرية التآين المتصورة في سياق الفيزياء الكلاسيكية، ومع هذا فإنها بالأحرى كيفية وليست كمية، تعتمد العديد من العدادات الجسيمية السابقة بدءاً من عداد جيجر إلى الغرفة الفقاعية وغرفة التدفق على مزيد من التفاصيل النظرية لعمليات التآين التي تتسبب عن طريق مرور الجسيمات المشحونة خلال المادة.

ومع هذا، بقيت نظرية تفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة تحت التطوير لعمود كمقارنة القياس الموضوعي عن طريق العدادات الجسيمية المبنية على مبدأ التآين وقد مر زمن طويل قبل أن يصبح وصف الكم النظري مفيداً في إتاحة عمليات التآين^(١)، وهذا يوضح كيف أن احتياج قليل من الافتراضات

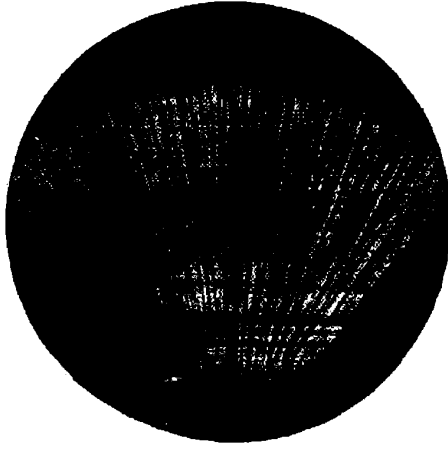
(١) انظر: الفصل الثالث (الفقرة ٣-٤).

النظرية لبناء أجهزة قياس سوف يعتمد على إرساء النظرية أثناء ظهور طور النظرية، وفي الرسم البياني التاريخي يسمى المظهر النظامي للتجريبية التقليدية⁽¹⁾ في منهج استقلال الحقيقة، وأنها أحد الأسباب التي تحمل نظرية للقياس الموضوعي وقد تعد كجزء لقواعد الملاحظة لفيزياء الجسيمات، ويقع السبب الثالث في أن هذه النقاط المقاسة تشاهد بحس التجريبيين الدقيق، وعلى الرغم من كل هذا التحميل النظري للقياسات الموضوعية فإنهم يستطيعون أن يجعلوها مرئية سواء باللوح الفوتوغرافي أو بجهاز الحاسب.

٣-٣-٢ المسارات الجسيمية

كما نقحت نظرية القياسات الموضوعية للجسيمات فقد استمر العمل بقواعد المشاهدات لفيزياء الجسيمات، وتم التمكن من ملاحظة مسارات الجسيمات في عام ١٩١٢ وتم تصوير إشعاع α, β لأول مرة في غرفة ويلسون السحابية فشوهدت المسارات الجسيمية على هذه الألواح الفوتوغرافية وتم تمييزها بالمسافة الصغيرة جداً بين قطراتها المكثفة؛ حيث كانت قادرة على التحول عند جميع النقط المقاسة، ففي حالة إشعاع ألفا (α) فقط ترى المسارات ولا يوجد قطرات مكثفة على غرف السحابة الفوتوغرافية بينما أمكن تمييز نقط القياس المنفردة لمسارات إشعاع بيتا (β) بوضوح، وتم وصف مسارات جسيمات β و α ظاهرياً في الكتاب المرجعي لرنر فوررد وشادويك وإليس في مجال النشاط الإشعاعي والذي ظهر في عام ١٩٣٠.

(1) Galison 1987, 6 - 13 and 244 - 255.



شكل (٣-١) مسارات جسيمية لأشعة ألفا الملاحظة في غرفة ويلسون

(Meitner, after Grimsehl 1938, 16)

بسبب كثافة التآين، فقد وضح مسار جسيم ألفا (α) كخط متصل من قطرات مائية، ومن وجهة نظر أخرى فإن جسيمات بيتا β السريعة تعطي تآيناً صغيراً جداً لدرجة أن الأيونات المفردة التي تتكون خلال مسارها يمكن عدها^(١).

تنشأ أول المسارات الجسيمية من أشعة المصادر ذات النشاط الإشعاعي الموجودة بالمعمل، وأنها تلتقي مع مسارات الجسيمات الآتية من الأشعة الكونية؛ حيث تمتد صورها الفوتوغرافية الفيزياء الجسيمية بالمشاهدات المادية الهائلة خلال ثلاثينيات القرن العشرين وخلال الأربعينيات أصبحت المستحلبات النووية متاحة؛ حيث جعلوها قادرة على رصد مسارات الجسيمات المشحونة وطورت صورها فوتوغرافياً بدقة قياس إزاحية عالية

(1) Rutherford et al. 1930, 57.

جداً (في حدود $1\mu\text{m}$)⁽¹⁾، وقد طورت الغرفة الفقاعية في الخمسينيات (١٩٥٠) بواسطة جلاسر^(٢) لتجارب التشتت في بداية عهد معجلات الجسيمات وقد صنعت الطريق الآخر إلى الغرفة السحابية: فقاعات غازية في الهيدروجين السائل بدلاً من القطرات المكثفة في البخار وهذه تجعلها قادرة على رصد المسارات الجسيمية المتنوعة وتصويرها في الوقت نفسه، وأن المسارات الجسيمية لا تشاهد طويلاً في صورة العدادات الجسيمية في فيزياء الطاقة العالية السارية وأنها تسجل إلكترونياً ويعاد بناؤها عن طريق برامج الحاسب.

وقد حلت الآن المعلومات الإلكترونية محل الظواهر الملاحظة أثناء العقود الأولى للفيزياء الجسيمية كذلك في إعادة بنائها، وبعد العمليات المطولة لتحليل النتائج عن طريق وسائل برامج إعادة البناء أصبحت مرئية وتعرض على جهاز الحاسب وقد بنيت قواعد الملاحظة عند هذه المرحلة السارية في التنظير واعتمدت على الخلفية المعرفية النظرية الكاملة والتي أتاحت حتى يومنا هذا بالنظر إلى تفاعلات الجسيمات المشحونة مع المادة.

كمقارنة للقطرات المكثفة الملاحظة في الغرفة السحابية أو لوميض الضوء المفرد على الشاشة الوميضية والأساس التجريبي للفيزياء التجريبية والممتد فعلياً مع المسارات الجسيمية الملاحظة في المستحلبات النووية وكذلك في الغرفة الفقاعية والمعروضة على جهاز الكمبيوتر، وبالحس الذي نعاير به الواقع التجريبي المعطى في الفقرة (١-٣) للمسارات الواقعية

(1) Rassi 1952, 127 – 142; Powell et al. 1959, 26 – 32; Perkins 1989.

(٢) انظر : Pais 1986,491

تجريبيًا، فإن جميع هذه المسارات تدل فعليًا على البناء الديناميكي لواقع الجسيمات دون الذرية، حتى إن غير الفيزيائيين تعرفوا على المسارات في صور الغرفة الفقاعية أو المعروض على شاشة الكمبيوتر كتأثير سلسلة من الأحداث المتصلة ببعضها والتي هي في الواقع تختلف عن الاتصال غير المنتظم للنقاط المنفردة المقاسة، إن المسارات الجسيمية هي الدليل التجريبي القوي لحقيقة وجود الأشياء الدقيقة المنفردة والتي يكون تصرفها مثل الجسيمات الكلاسيكية الموجودة في الظروف التجريبية المناسبة، وأنها تشير إلى تأثيرات أو لظواهر زمانية - مكانية متفردة في حدود التحقق عن طريق وسائل القياس والتي يمكن فهمها في أول تقريب بدقة كافية عن طريق وسائل نظرية القياس الكلاسيكية، وطبقًا للخلفية المعرفية المعرفة جيدًا للفيزياء دون الذرية فترجع النقاط المقاسة للمسار إلى عمليات التأين، ويمكن بوضوح للقياسات الموضوعية المماسية أن يكون اتصالها عن طريق المسار الزماني المكاني، ومع القياسات الماكروسكوبية التي ينقصها الدقة فإنها تبدو على خط السير الكلاسيكي، وبالتالي توصف المسارات الجسيمية في سياق نموذج الجسيم الكلاسيكي كهذا المثبت بكفاية تجريبيًا.

إن قواعد الملاحظة لهذا النموذج الكلاسيكي الجسيمية على النحو التالي؛ حيث إن أول مشاهدته للمسارات الجسيمية في الغرفة الفقاعية وحتى يومنا هذا كالكتلة والشحنة للجسيم المعبر عنه بالمسار حيث عرفت من الخصائص الزمانية المكانية للمسار وكانت أهم الملامح التجريبية للمسار هي قياس كثافة النقاط المتفردة، وانحناءاتها وطول المسار والرتبة الزمانية للقياسات الموضوعية والتي تقاس بوسائل أجهزة قياس مناسبة، ويتم تحليل هذه الخصائص بوسائل الخلفية المعرفية الآمنة في الفيزياء الجسيمية.

لقد اعتمدت قياسات e/m لطومسون من أشعة الكاثود على نظرية القياس الكلاسيكية والتي ما زالت تعطي أرضية لتحليل نتائج المسارات الجسيمية حتى اليوم، وإنها تبنى على القوانين غير النسبوية كما في وجهة نظر الميكانيكا الكلاسيكية النسبوية، وإن قلب هذه النظرية القياسية هو الحد الخاص بقوة لورنتز. $F = (q/c) (E+v \times B)$

وهذا يتصل بالشحنة q والكتلة m للجسيم الكلاسيكي ذي كمية الحركة $p=mv$ ، وإنها تصف تغير كمية الحركة لكتلة الجسيم المشحون الموضوع في مجال كهربائي خارجي أو مجال مغناطيسي، ويمكن تعيين كمية الحركة p من انحناء المسار الجسيمي طبقاً لقوة لورنتز وهذه العملية تعطي كمية كلاسيكية ومن وجهة نظر ميكانيكا الكم أنها شبه كلاسيكية أي أنها مشاهد غير كلاسيكية والتي لها مقابل كلاسيكي، وبحديث أكثر مباشرة فلا تسمح النظرية الكمية للقيمة المعينة لكمية الحركة للمسار الجسيمي من القياسات المكررة لمواقعها، وإنها تجريبياً كافية لتعيين قيمة كمية الحركة شبه الكلاسيكية للمسار المتولد والذي يمكن شرحه فقط عن طريق نظرية التشتت الكمية^(١).

(١) انظر الفصل الخامس (الفقرة ٥-٣).



شكل ٢-٣ الانحراف المغناطيسي لجسيمات ألفا الملاحظة في غرفة ويلسون

(Rutherford et al. 1930, after Grimsehl 1938, 15)

يعطى اتجاه طيران الجسيم تجريبياً عن طريق التتابع الزمني للقياسات الموضعية المماسية، (وفي ميكانيكا الكم، هذه تقابل تقدم مسار المستوى الكمي على عمليات التشتت فرعية التتابع وقياساتها) وإذا عرف اتجاه الطيران فيتضح فوراً أيضاً الشحنة وإشاراتها من انحناء مسار الجسيم المشحون في المجال المغناطيسي وقوة لورنتز، ويمكن تعيين كتلة الجسيم كمية الحركة والسرعة طبقاً لنظرية القياس الكلاسيكية، وتقاس كمية الحركة بوسائل قوة لورنتز والسرعة من القياسات الفرعية المتتابعة للموضوع والزمن؛ أي أنها تقاس من المسافة وزمن الطيران، على سبيل المثال عن طريق مطياف الكتلة المخترع بواسطة آستون والذي يعمل طبقاً لهذا المبدأ في الأيام المبكرة للفيزياء الجسيمية.

تعتمد نظرية القياس للجسيم الكلاسيكي هذه على توصيفات قانون القوة الكلاسيكي، وإنه يتصل بالمعرفة المقارنة حول المسارات الجسيمية المعروفة أصلها، وهذه المعرفة تعتمد مباشرة على ملامح المسار المشاهد وأنها تدخل أيضًا في تحليل المسار وتعتمد على أساسيات النموذج الجسيمي الكلاسيكي ويمكن أن نستدل (على سبيل المثال)، من كثافة قياس النقاط المنفردة على المسار الجسيمي لتكرار تفاعل الجسيم مع العداد، هذا التردد هو قياس لدرجة التأين المتسبب بواسطة الجسيم الذي بدوره يشير إلى كتلة الجسيم غير المعرف بالمقارنة لكتلة الجسيمات المعروفة، بالنسبة إلى جسيمات ألفا α أو البروتونات فإن درجة التأين تكون فعليًا أكبر من درجته للإلكترونات كما هو معروف من الصور الأولى لمسارات الجسيم منذ عام ١٩١٢، وبالعودة لطول مسار الجسيم المرتبط بالطاقة التي يفقدها الجسيم خلال مساره خلال العداد قبل أن يتوقف أو يمتص.

إن نصف كل هذه المعرفة حول الكميات الدينامية للجسيمات تكون تجريبيًا والنصف الآخر يبنى على النماذج الكلاسيكية، وتم تأكيد ذلك كمياً وقد عبر عن ذلك بالقوانين الظاهرية، إن القانون نصف التجريبي، والمسمى بعلاقة طاقة - مدى والتي تمت صياغتها على قاعدة تجارب التثنت للجسيمات من مصادر إشعاع نشاطها الإشعاعي من الأيام الأولى لفيزياء الجسيمات، وإنها تربط طاقة حركة كتلة الجسيم المشحون بالمدى الخاص به (أو طول مساره) في المواد المختلفة^(١).

(1) Rutherford et al. 1930, 294.

طبقاً للافتراضات العلية والتي تمثل دائماً الخلفية المساعدة لتكوين النظرية في الفيزياء وشرح المسار الزمني المكاني الماكروسكوبي في الغرفة السحابية أو الغرفة الفقاعية بدلالة التفاعلات المعادة أو الموجود الميكروسكوبي نفسه مع العداد، نستدل من المسار الجسيمي للجسيم يكون الاستدلال سببياً، وقد دعم تحقيق أن قوانين القياس الكلاسيكي (مثل الحد الخاص بقوة لورنتز الكلاسيكي) التي تستعمل لتحليل المسارات الجسيمية تكون ملائمة تجريبياً، ومع ذلك فمع المسارات الجسيمية يمكن أن ندرس كيف يمكن تطوير الملازمة التجريبية لقوانين القياس إذا ما تعلقنا بحقيقة القوانين الأساسية للطبيعة أو أن تضعها في حدود نانسي كارتريت⁽¹⁾: توضح تحليل نتائج المسارات الجسيمية كيف تقع قوانين الفيزياء، كانت تفاعلات الجسيمات المشحونة مع المادة هي موضوع نظرية الكم للتشتت، وتوضح هذه النظرية بالتعارض مع دعاوى وجهة نظر الميكانيكا الكلاسيكية بأنه لا يوجد اتصال معين على الإطلاق بين نقاط القياس المنفردة للمسار الجسيمي⁽²⁾.

لقد أشار التنظير الخاص بالطريق التي تبنى مشاهداته على فيزياء الجسيمات إلى عمليتين مختلفتين. استطاع المفهوم الجسيمي للأساس التجريبي من إحدى وجهات النظر أن يمتد بشكل هائل عن طريق وسائل قوانين القياس المألوفة، ومن وجهة النظر الأخرى فإن هذه الأنواع من الاستدلال والتي تتحدث عن وجود جسيمات ميكروسكوبية التي كانت موضع تساؤل

(1) Cartwright 1983.

(2) ومع هذا انظر Mott 1929, Falkenburg 1996 and (بند 5.3)

بالنسبة إلى وصف نظرية الكم لإظهار طريق المسار الجسيمي. ويعتمد تظير المشاهدات على حافتين مزدوجتين: إنها تتكون ليس فقط من امتداد للأساس التجريبي لفيزياء الجسيمات بواسطة الظواهر الطارئة والتي جاءت فقط عن طريق تحليل النتائج النظرية ولكن أيضاً على ما قبل الأوضاع النظرية الضمنية المحتوية لما قبل التحليلات النظرية للمادة الملاحظة، وأنها توضح مظهر المسارات الجسيمية التي تصبح مرئية فقط عن طريق الكمبيوتر المعاد بناؤه هذه الأيام وأنها تجهل شكل المسار المستمر الزماني المكاني الذي يصل النقاط المتقطعة ويعتبر اليوم محملاً نظرياً بشدة، ويرتبط المسار المستمر الزماني المكاني بنموذج القياس الكلاسيكي للمسار الجسيمي، طبقاً لمعايير فان فراسين للتركيب الدقيق التجريبي للنظرية المعروضة حتى إن استحب للتجريبيين أن ينظروا إليها كنموذج تجريبي للنتائج⁽¹⁾، ومع هذا

(1) إن الأحداث الحاسمة التي أوضحت أنه فكر بوجوب صياغة النماذج التجريبية للنتائج في الكميات الزمنية - المكانية للميكانيكا الكلاسيكية الموجودة في 59FF: "من ثم دعنا نصمم مثل تلك المشاهدات الأساسية لجميع الكميات التي وظفت الزمان والمكان بمفردهما، وذلك يحتوي السرعة والعجلة (التسارع) والإزاحات النسبية وزوايا التفريق، جميع الكميات المستخدمة، على سبيل المثال، في تقرير النتائج الفلكية المدة للميكانيكا السماوية!! وبالنسبة إلى الجزء الخاص 64؛ "لنعرض النظرية لتصنيف تركيبها ونمذجتها وثانياً، لتصنيف أجزاء معينة هذه النماذج (البنية الدقيقة التجريبية) مثل المرشحين للتمثيل المباشر للظواهر الملاحظة، ونستطيع أن نستدعي للظهور، البنى التي يمكن أن توصف في تقارير تجريبية وقياسية؛ وهي: النظرية تكون ملائمة تجريبياً إذا كان لها نموذج ما مثل أن جميع ما ظهر يكون متوافقاً للبناء التجريبي الدقيق لهذا النموذج". وهنا كان "ظهور" ما يقابل المستدعي من suppes زاد أم قل لنموذج النتائج، (انظر Suppes 1962).

فإنها فقدت براءتها نتيجة نظرية الكم، فالمسار غير كلاسيكي وأنه ظاهرة شبه كلاسيكية فقط، ونموذجها الكلاسيكي له صلاحية محدودة، وطبقاً لنظرية التشتت الكمي فإن المسار شبه الكلاسيكي يكون له ارتباط ضعيف الحس بالنسبة إلى المشاهدات المبنية على المفاهيم الجسيمية السارية وأنها ليست بسبب العلية الموضوعية ولكنها نتيجة التأثير الديناميكي الثابت الخاضع لقوانين الحفظ ويعاد مشاهدتها لزمان معين عند النقاط المجاورة في المحيط الماكروسكوبي، ومع ذلك فيمكن لنا التحدث حول ملاحظات هذه الظاهرة وبالتالي أيضاً حول مشاهدات المسار الجسيمي بالطبع.

٣-٣-٣ أحداث الاستطارة (التشتت)

يمكن رصد الجسيمات المشحونة مباشرة فقط عن طريق مسارات جسيمية وظواهر ماكروسكوبية أخرى، لقد أحدثوا عمليات التآين عند تفاعلاتهم مع نرات العداد الجسيمي، وعلى الجانب المضاد فإن الجسيمات المتعادلة (مثل الفوتون والنيوترون والنيوترينو أو البيون المتعادل) فإنها تلاحظ بطريقة غير مباشرة فقط، وهنا نعني "بالملاحظة غير المباشرة" بأنهم أحدثوا مسارات ملاحظة من ناتج تفاعلاتهم مع الجسيمات المشحونة فيمكن تعريفهم وذلك بالطرق المبنية على قوانين الحفظ، وهذا التمييز بين المشاهدات المباشرة وغير المباشرة يعتمد على المعايير التي يحدد بها الجسيم من المسار المتفرد للجسيم المشاهد حيثما يحدد من المسارات المتعددة المجاورة التي يتم تحليلها بدلالة الأحداث التشتتية وقوانين الحفظ، ويختلف التمييز من تمييز شابيير الذي نوقش في الفقرة ٢-٥ بالنظر إلى نوع التحليل

العلي المعروض وطبقاً لمفهوم شابيير للملاحظة، فإن الملاحظة تكون مباشرة إذاً فقط إذا كانت القصة العلية غير ملتبسة ويمكن أن تخبر عن الآثار التي ترجع التأثير المشاهد إلى سبب عدم الملاحظة، ففي حالتنا هذه فإن قصة السبب غير الملتبس والذي يمكن أن يخبر باستعمال قوانين الحفظ وتعمل مشاهدات آثار نمطية معقدة لمسارات جسيمية ترجع للسبب الشائع والتأثير المفقود، والسبب الشائع هو تفاعل الجسيم دون الذري الذي يحدث ما يسمى بالحدث التشتتي والتأثير المفقود هو الجسيم غير المعروف حتى الآن والذي يفترض أن يترك موضعاً مفقوداً لبعض الكم المتبقي. إن مفهوم حدث التشتت واستعمال قوانين البقاء (الحفظ) في تحليل نتائجه تم شرحه بمزيد من التفاصيل، دعنا مرة أخرى ننظر إلى تاريخ فيزياء الجسيمات! ففي التجربة التي أكدت الفوتون (وهي حفظ الطاقة - كمية الحركة لتأثير كومبتون عند المستوى المتفرد) حيث قاس كل من بوث وجيغر تطابقات الفوتونات والإلكترونات المرتدة⁽¹⁾، فقد أخذ الرصد الجسيمي المرتبط بدليل التفاعلات دون الذرية التي تتفاعل فيها الجسيمات، وتسمى مثل هذه التفاعلات الجسيمية بالعمليات التشتتية، وتوصف عن طريق نظرية الكم للتشتت والذي قام بورن بإعداد أرضيتها⁽²⁾، أغلب الإشارات التجريبية المدهشة للتفاعلات دون الذرية التي تأتي في تكون المسارات الجسيمية للانحناءات والاتجاهات والأطوال المختلفة والتي تتقابل عند أحد أو نفس نقطة زمان - مكان (أو منطقة) العداد الجسيمي، في الصور التي تم الحصول عليها من الغرفة الفقاعية أو من

(1) Bothe and Geiger 1925.

(2) إنه غالباً ما ينسى أن أوراؤه البحثية الرئيسة في Born 1926 a, 1926b. التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم زودت فعلياً ميكانيكا الكم بنظرية التشتت غير الكلاسيكية.

المستحلبات النووية فإن اتصال العديد من المسارات الجسيمية لمثل هذه الأحداث التشتتية يمكن أن تعرف في الغالب مثل المسارات الجسيمية المنفردة، ففي التحليل النظري للنتائج المسجلة بواسطة العداد الجسيمي فإن المسارات المتجاورة التي تبدأ أو تنتهي عند الوقت نفسه وفي المكان نفسه ترتبط لتكون الحدث التشتتي، وهنا "عند الوقت نفسه وفي المكان نفسه" تعني منطقة زمانية مكانية محددة والتي تعرف عن طريق التصميم الزماني والمكاني للعداد الجسيمي.



شكل ٣-٣ التشتت الفوتوني الإلكتروني

(Compton 1927, after Grimsehl 1938, 211)

يعتمد فحص التفاعلات الجسيمية على إعادة البناء الدقيق للأحداث التشتتية التي يمكن للمسارات الجسيمية فيها أن تتضمن، وهذا هو العمل الرئيس لتحليل النتائج في الفيزياء التجريبية الجسيمية في الحاضر، إن انضمام المسارات الجسيمية إلى أحداث تشتتية هي بالطبع تعتمد على مقدار من الخلفية المعرفية التي تلزم في إضافتها لخط الملاحظة المحيرة للمسارات

الجسيمية مع الأحداث التشتتية فإننا نحتاج غالباً إلى خلفية معرفية للكميات الديناميكية المنسوبة إلى المسارات المتفردة، على وجه الخصوص يتم الاحتياج للافتراضات التي تدور حول كتلة الجسيم، فعلى سبيل المثال، عندما يوجد التواء في مسار الجسيم فيتم شرحه بدلالة عملية التشتت التي تبين أن كتلة الجسيم تغيرت^(١)، وبالتالي فإن التصنيف الملتبس للمسارات الجسيمية إلى أحداث التشتت بقواعد الملاحظة للفيزياء الجسيمية وقد خذل التجريبيون المترمتين حالما لم يجدوا سبباً لعمل فصل تام بين المشاهدات المباشرة وغير المباشرة، وعند هذه النقطة اتضحت الصحة المطلقة للمدافعين عن الواقع العلمي من أمثال ماكسويل وشابير^(٢) وأصبح السؤال الحاسم الوحيد هو: كيفية الوثوق في الخلفية المعرفية حول الجسيمات دون الذرية؟ أينما تأكدت جيداً فإن أي استدلال سببي يتأسس علمه والذي له آثار ملتبسة للمسارات الجسيمية تعود إلى تفاعلات دون ذرية متفردة قد تحسب كملاحظة بالحس الحسابي العام للملاحظة المقترحة في الفقرة ٢-٣٥.

وبمجرد تعريف المسارات الجسيمية فإن التحليل النظري لأحداث التشتت اعتمد مبدئياً على قوانين البقاء وساعد هذا في الاستدلال عن مقادير جميع الجسيمات الموجودة في التفاعل، وقد اعتمدت قوانين البقاء للفيزياء

(١) تطوير نظرية القياس التي اهتمت بتحديد الجسيمات المشحونة تم شرحها في الفقرتين (٣-٤، ٣-٥) من الفصل الثالث.

وانظر الفقرة (٢-٥)؛ Maxwell 1962, Shapere 1982; (2)

(٣) انظر نهاية الفقرة (٢-٥)؛ وضع في ذهنك أن اقتراحي يهدف للمعنى العام والدقة قدر الإمكان.

الجسيمية جزئياً على الحركة النسبوية (حفظ أو بقاء الطاقة - كمية الحركة) وتعتمد جزئياً على الديناميكا الكمية (حفظ أو بقاء اللف والندية والشحنة وهلم جرا). أولاً الجسيمات "عديمة الآثار" التي دون مسارات مثل النيوترون أو النيوتريينو تفهم فقط على أساسيات قوانين الحفظ أو البقاء، ويعزى ذلك إلى فقد مقدار من الطاقة (أو لمقدار آخر) من توازنات جميع كميات الحفظ للمسارات الملاحظة في الحدث التشتتي، ويفترض في المقدار المفقود أن يعامل كأنه جسيم غير معروف حتى الآن.

يؤدي مبدأ حفظ الطاقة - كمية الحركة دوراً خاصاً؛ حيث يؤكد مرة أخرى وأخرى بالتناقض مع قول حفظ الندية، أن التنبؤ بالنيوتريينو واكتشاف النيوترون يعتمد أيضاً على هذا، كما أثبت عملياً وجود الفوتون.

ففي عام ١٩٣٠ وحتى حفظ مبدأ بقاء الطاقة اقترح باولي بافتراض النيوتريينو، الذي يدعى بأنه حليف أو مصاحب الطاقة المستمر للإلكترونات الخارجة في هيئة اضمحلال بيتا β والمتسبب عن طريق الجسيم غير المشاهد وغير المشحون^(١)، وفي عام ١٩٣٢ عرف شادويك النيوترون كجسيم كتلي غير مشحون في النواة الذرية، فقد أوضح أن الإشعاع الذي نشأ من تفاعل جسيمات ألفا α مع البريليوم وأعطى هذا الارتداد الكبير لذرات الهيدروجين أو النيوتروجين والتي لم تكن نتيجة الفوتونات ولكن فقط تكون نتيجة جسيم كتلي ذات كتلة في رتبة كتلة البروتون^(٢)، وتبقى فرضية النيوتريينو افتراضاً طالما لم توجد ظاهرة أو تأثير يكون سببه نيوتريينو

(1) Pais 1986 , 309 – 320.

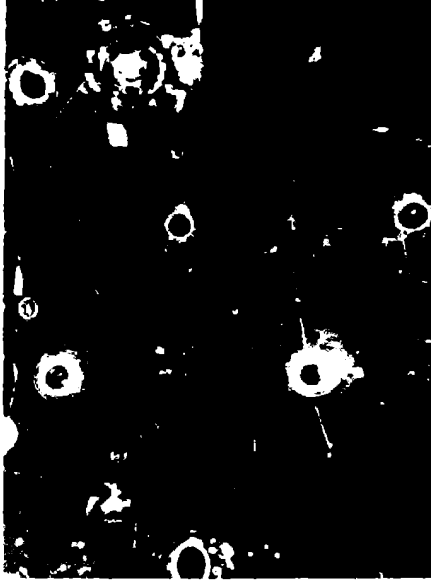
(2) Shamos 1959 , 266 – 280.

مشاهد في وضع متفرد (ويكون انبعاث الإلكترونات مع طيف الطاقة المستمر لاضمحلال بيتا - β هو عملية احتمالية) وتم تأكيد ذلك عن طريق التجربة في عام ١٩٥٦ والتي ولدت النيوتريو المستحث باضمحلال بيتا β العكسي^(١)، وعن طريق الاستدلال التجريبي فقط للتفاعل الجسيمي الذي يمكن إطلاقه فقط عن طريق الجسيم محل التساؤل يتمثل في هذا الافتراض للجسيم المتعادل "عديم الأثر" المؤكد والذي أرسى قواعد هذه الملاحظة، لقد أوضحت حالات النيوترون والنيوتريو مرة أخرى أن الاستدلال التجريبي للجسيم يقوم على شرطين متحققين: تطبيق قانون قياس الجسيم المماثل المسمى بمبدأ حفظ الطاقة - كمية الحركة والتأثير الموضعي المصاحب للكميات المقاسة ديناميكياً والملاحظة عند الوضع المتفرد. ففي حالة النيوترون يكون التأثير الموضعي الذرات المرتدة وفي حالة النيوتريو يكون هو النيوتريو المستحث باضمحلال بيتا - β .

لحفظ الطاقة خاصية القانون القياسي في هذه الأمثلة، وأنها تخدم في اتجاه معيارية الظواهر الملاحظة ونستدل منهم على وجود الجسيمات غير المشحونة لنوع ديناميكي معين. بالمثل، تمد قوانين الحفظ الديناميكية الأساس التجريبي لفروض الجسيمات النوعية بدلالة المقادير الكمية (المكممة) مثل اللف والندية واللف الذاتي ودرجة الغرابة، وبمثل قانون حفظ الطاقة فقد أسهمت في البناء النظري وعن طريق ذلك نقح أساس الملاحظة للفيزياء الجسيمية وجعلتها قادرة على تصنيف مادة الملاحظة التجريبية إلى أنواع من

(١) باستدعاء سلطة Eddington حول إمكانية إنتاج النيوتريونان 570 - 569 , Pais 1986 الذي تم التعبير عنها في (Eddington 1939) ; انظر الفقرة (٢-٣).

المسارات الجسيمية والأحداث التشتتية وتصنيفها لجسيمات وتفاعلاتها. إن تقسيم المادة الملاحظة عن طريق قوانين الحفظ المؤكدة جيدًا تؤدي إلى مرحلة جديدة من التنظير أساس الملاحظة، وأصبحت الآن مخزنة كمسارات جسيمية وأحداث تشتتية تتميز عن طريق قيم الكميات الدينامية المحفوظة.



شكل رقم (٣-٤) حدث تشتت النيوترونو. أول ملاحظة لعملية التيار المتبادل الضعيف في غرفة الفقاعة (163, after Perkins 2000, CERN)

٣-٣-٤ الرنينيات Resonances

منذ خمسينيات القرن العشرين ١٩٥٠؛ حيث أنجزت تجارب تشتت الطاقة العالية في المعجلات الجسيمية، وجد نوعان من تجارب التشتت: تجارب الهدف الثابت وتجارب المصادم. أنجزت تجربة الهدف الثابت

كالتالي: يولد الشعاع في معجل الجسيمات (قد يكون شعاعاً إلكترونياً أو شعاعاً ميونياً أو شعاعاً من البروتونات أو شعاع نيوترينو أو هكذا) تولد التفاعلات الجسيمية عن طريق إرسال الشعاع إلى نوع من القوالب المادية والتي تعمل في الوقت نفسه كعداد أو كاشف جسيمي ويسمى القالب المادي بالهدف الثابت، في الخمسينيات (١٩٥٠) استخدم الهيدروجين السائل في الغرفة الفقاعية كهدف ثابت، وفي تجارب الهدف الثابت السابقة كان القالب المادي على سبيل المثال من ألواح حديد وضعت مع مكبرات فوتونية عن طريق تجهيزات الوميضيات والغرف الحرارية والغرف التدفقية أو أنواع أخرى من العدادات الجسيمية، أما في تجربة المصادم فينقطع نوعان من الأشعة ويتشتتان على بعضهما في منطقة تفاعل صغيرة محاطة بعدة أنواع من العدادات الجسيمية التي ترصد الجسيمات الخارجة جميعها كلما أمكن معتمدة على قواعد حركتهم وكمياتها الديناميكية، هذا وقد بدأ عصر التجارب التصادية في بدايات الثمانينيات (١٩٨٠).

تم تحليل نتائج تجارب تشتت الطاقة العالية على النحو التالي: دائماً ما يتم تجميع العديد من أحداث التشتت لأنواع دينامية معينة في مجموعات موحدة إحصائياً وبالنظر إلى ذلك فإن الأرضية المشتركة للمسارات الجسيمية المتفردة وتحليلات نتائجها بدلالة قوانين القياس الكلاسيكية كانت مُحبطة. الآن تم تفسير المسارات الجسيمية وتجارب التشتت بدلالة نظرية الكم للتشتت، ففي مثل ميكانيكا الكم تعطى نظرية الكم للتشتت احتمالية التنبؤات بدلالة القيم المتوقعة للملاحظات الكمية وهذه الملاحظات الكمية في فيزياء الطاقة العالية تختص بنظرية المجال الكمي.

بالمقابل، استخدمت نتائج تحليل تجارب تشتت الطاقة العالية الطرق الإحصائية وبالمثل أجريت لعدة شهور تجارب تشتت الطاقة العالية في معجل الجسيمات وقد اعتنت بمقادير كبيرة من النتائج الإحصائية والتي تم تحليلها في حدود عديدة وقد جمعت النتائج وقسمت إلى مجموعات موحدة إحصائياً لأحداث التشتت. نظرياً، مثل هذه المجموعات المقابلة لنتائج القياس للنوع المقاس المعطى في مستوى كمي معطي، وتجريبياً، مجموعة الأحداث التشتتية هي مجموعة فرعية للحدث التجريبي الموجود في تحليل النتائج الإحصائية في العمليات الخاصة للتجربة، وأنها تتكون من الأحداث التي تتولد في الشروط التجريبية نفسها وتتقسم إلى عدة مجموعات موحدة - فرعية (أو فرع - لفروع مجموعات الحدث الموجود) والذي يعرف بدلالة الحركة والكميات الديناميكية للجسيمات المشتتة، وتحدد نظرية الكم للتشتت حصيلة عملية التشتت دون الذري عند مستوى احتمالي للعديد من المحصلات الممكنة تطابقاً مع الديناميكا الكمية للتفاعلات دون الذرية، فمحصلات التشتت الممكنة عبارة عن نتائج مقاسة في الحس المعتاد لقياس ميكانيكا الكم، ففي نظرية الكم للتشتت يكون احتمالياتها النسبية معطاة بدلالة المصفوفة S- للتفاعلات الجسيمية، وتعطى عناصر المصفوفة S- القيم المتوقعة النظرية كمياً للأنواع الممكنة للتفاعل الجسيمي والتي بدورها تقابل تجريبياً بالترددات النسبية للتفاعلات الجسيمية للنوع المعين الذي تم قياسه.

لقد عين في تجربة تشتت الطاقة العالية المقطع المستعرض الفعال لتفاعل جسيمي معين من مثل هذه المجموعات لأحداث التشتت^(١). إن المقطع المستعرض الفعال المقاس هو التكرار النسبي لأحداث التشتت لنوع معين،

(١) انظر : الملحق (ج).

وأنها تعين من النسبة لعدد من مقاسين يسمى ترددًا عدديًا أو تكرار الجسيمات الخارجة لكميات معينة منسوبة إلى الجسيمات الداخلة، وتعطى الجسيمات الداخلة بدلالة فيض الجسيمات لنوع معين وبالطاقة التي تولد بواسطة المعجل الجسيمي، والفيض الجسيمي هو مقدار الجسيمات المعجلة أو بدقة أكثر هو مقدار الشعاع الجسيمي في تجربة التشتت وأنها تقاس باستقلال عن نتائج التشتت المقاسة، فالتكرار العددي للجسيمات الخارجة يتم الحصول عليه عن طريق حصر أعداد الجسيمات لنوع معين في نطاق معين لكمية الحركة أو الطاقة وزاوية التشتت للكميات الحركية، وهكذا، فإن المقطع المستعرض الفعال لنوع معين من التفاعل الجسيمي يتم الحصول عليه عن طريق حصر أو عد المسارات الجسيمية المقابلة لهذه الجسيمات.

وهكذا، فإن المقطع المستعرض الفعال هو المقدار الفيزيائي الذي يأتي من نظريات المجال الكمي السارية في عالمناء، وحسب المقطع المستعرض ككمية نظرية من المصفوفة S -لديناميكا الكمية، تعبر أيضًا عن القوة الترابطية النسبية لأنواع المختلفة للتفاعلات الفيزيائية المسماة بالثوابت الترابطية للكهربية الديناميكية والتفاعلات الضعيفة والقوية (والتي تتشابه مع ثابت الجاذبية في الميكانيكا الكلاسيكية) وكمية تجريبية فإنها عدد أحداث التشتت لنوع معين، وهنا، تعرف أحداث التشتت باستخدام الطرق الموصوفة في الفقرة (3-3) والمحسوبة بدلالة الحركة والكميات الديناميكية التي تعزى إلى الجسيمات دون الذرية.

الرنين هو الظاهرة التالية التي تظهر خاضعة للشروط التجريبية التالية، إنجاز تجربة تشتت عند الطاقة العالية وقياس التفاعلات كدالة في

طاقة الجسم المنشتت وطاقة التشتت، وفي النموذج النظري المقابل فإن طاقة التشتت هي كمية حركية نسبية وتعطى في إطار مركز الكتلة للجسيمات المنشتتة، ويمكن تغيير طاقة التشتت عن طريق طاقة الشعاع في تجربة الهدف الثابت (أو شعاع تجربة المصادم) ويتم تعيين المقطع المستعرض الكلي لجميع التفاعلات أو أحداث التشتت والمجمعة على جميع المستويات النهائية المقاسة كدالة في طاقة التشتت (وهذا يعني ببساطة حصر أعداد الأحداث المنشتتة عند طاقة التشتت المعطاة) ويقاس الرنين إذا ظهر لقيمة المقطع المستعرض الفعال قمة عند قيمة معينة للطاقة؛ أي أنه إذا زادت القيمة فجائياً بعدة رتب تقديرية في العلاقة المرتبطة بالمقطع المستعرض التأثيري عند الطاقات المنخفضة والمرتفعة، مثل هذه الزيادة المرتفعة أو المنخفضة في قياسات المقطع المستعرض تشير إلى زيادة واضحة في عدد التفاعلات الجسيمية عند طاقة تشتتية معينة، وأنها تساوي السلوك الرنيني المماثل لذبذبات القوى في الميكانيكا الكلاسيكية أو الديناميكا الكهربائية، ومن ثم سميت "الرنين".

على سبيل التشابه فإن الرنينيات في تجارب تشتت الطاقة العالية تم شرحها كنتيجة لتوليف القوة الخارجة تماماً مع طاقة المستوى الداخلي للنظام الفيزيائي وأنها سبب إثارة إلكترونات المدارات الذرية ولحث انبعاث الضوء وأن المستوى الكمي غير المستقر يتولد ثم يضمحل تتابعياً، وشرح الرنين واضح في الفيزياء الجسيمية ويتولد المستوى الكمي غير المستقر أو الجسم دون الذري قصير فترة الحياة عند طاقة تشتت معينة، وتحدث اضمحلالاتها عند القمة في علاقة الطاقة مع المقطع المستعرض الفعال الذي يعتمد عليها.

تحققت في عصر المعجلات الجسيمية الأختبارات التجريبية للرنينيات ونظرية القياس المنبئية عليها أهمية عظمى تشبه أهمية تحليل المسارات الجسيمية من الإشعاع الكوني ونظرية القياس المقابلة لها في ثلاثينيات وأربعينيات القرن العشرين (١٩٤٠ و ١٩٣٠).

وقد اكتشف أول جسيم رنيني في عام ١٩٥٢ عندما بدأ أول معمل كبير في العمل، فحدد للجسيم قصير فترة الحياة وله لف وندية للنوكليونيات ولكن تكون بكتلة أكبر كثيراً من البروتون؛ حيث ينمو حينئذ جسيم "متضخم" بشكل هائل وينبني عليه المزيد من التنوع للرنينيات التي تحددت بالجسيمات الثقيلة غير المستقرة (الهادرونات)، ولا يمكن للجسيمات غير المستقرة أن تعرف بجسيم تلو الآخر من المسارات الجسيمية وأحداث التشتت؛ حيث لا مسار لها مثل النيوترونات أو النيوتريونات ولكن لسبب ديناميكي آخر يعرف بفترة حياتهم القصيرة، وتقسم هذه الرنينيات طبقاً لقوانين الحفظ للذاتي ودرجة الغرابة وغيرها من المقادير الكمية (المكممة) والتي افترضت أولاً بشكل ذي صلة واقترب التقسيم متصلاً بالمحاولات المبكرة لبناء نظرية المجال الكمي للتفاعلات القوية، وقد أدى ذلك في النهاية إلى نموذج الكوارك في عام ١٩٦٤^(١).

تم فحص اضمحلال هذه الرنينيات الهادرونية في المطياف الهادروني باستخدام الطرق التجريبية الواضحة لهذه الاضمحلالات التي استخدمت في فحص المستويات المثارة للإلكترونات الذرية المدارية في المطياف الذري، وقد أمدنا المطياف الهادروني بجزء مهم في القاعدة التجريبية للفيزياء

(1) Pickering 1984,46-108.

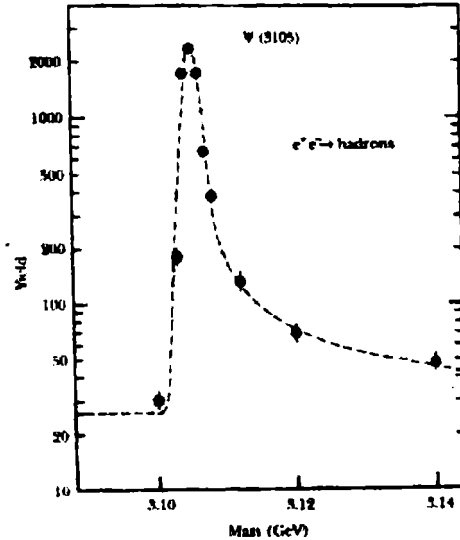
الجسيمية مغطياً العقود القليلة السابقة، وقد ساعد في النهاية النموذج الكواركي في أن يحقق ظهور تقدم مفاجئ في عام ١٩٧٤ عندما اكتشف الجسيم الرنيني J/ψ وفي نطاق قيمة ضيقة تم تحديد فترة حياة طويلة له^(١).

أولاً: حددت الرنينيات بالمقارنة من شكل دالة المقطع المستعرض المقاس فحسب إذا اعتمدت الشواهد على الظواهر المقارنة (في حس التدقيق الكارنابي لشواهد الكميات المقارنة والكميات المكمنة المقاسة)^(٢) تجعلنا نتحدث عن ملاحظة الرنين ولكن هل هي أيضاً تجعلنا نتحدث حول الملاحظة المقابلة للمستوى الكمي غير المستقر أو الجسيم؟

الرنينيات تحدث في المادة الملاحظة للفيزياء الجسيمية والمصنفة طبقاً لأحداث التشتت ولفاعلات الجسيم المقابل لذلك، وأنها تشاهد كظواهر مصادفة أو طارئة، ومع هذا فإن تفسيرها النظري يكون محملاً على النظرية أكثر من الدليل التجريبي على وجود الجسيمات دون الذرية التي نوقشت من قبل، إن نظرية قياس التحليل الكمي للرنينيات تتأسس على نظرية الكم، يحتوى النموذج النظري الكمي للرنين على افتراضات من نظرية الكم للتشتت والحركية النسبوية ونظرية الإثارة واضمحلال الأنظمة الميكانيكية الكمية المركبة إلى مستويات طاقة عالية ومنخفضة والتي تنتج من نظرية المجال الكمي.

(١) المرجع السابق نفسه، ص ٢٥٣-٢٦٠. ومع ذلك انظر نقدي لرؤية بيكرينج البنائية لصياغة النظرية في فيزياء الجسيمات. انظر الفقرة ٢-٣، وأيضاً رؤية القائم بالتجريب، المرجع: Riordan 1987.

(٢) انظر Carnap 1966, part II. 1966



شكل رقم (٣-٥) الرنينة J/ψ (Michael Riordan 1987, 284)

يتميز الرنين عن طريق كميتين فيزيائيتين: طاقة قمته E_0 واتساعها ΔE الذي يقابل مدى الطاقة التي تغطيها عند منتصف قمة ارتفاع هذا الرنين، ويمكن قراءة كلا الكميتين أن تقريباً من شكل المقطع المستعرض الفعال، كدالة في طاقة مركز الكتلة للجسيمات المشتتة، ومع هذا، يعتمد مدى دقة تعيينها على منحني رنين بریت فيجنر والذي يستنتج من نظرية المجال الكمي^(١).

(١) انظر Perkins 1987, 128، وانظر الفصل الثامن من Goldberger and Watson للجهاز الهائل للكمي النظري بأن أهم بنظرية الرنينيات لذي لخص ما احتاجه للفيزيائيون للتجريبون.

الرنين يكون أكثر تمييزاً كلما صغر اتساعه ΔE وكبر التردد النسبي للتفاعلات عندما تكون الطاقة E_0 التي تكون متناسبة مع عدد التفاعلات عندما تصغر جداً أو تكبر الطاقات، وتكون أكثر تمييزاً كلما زادت حدة قمتها (مقابل خلفية أحداث التشتت التي لا تختص بها) وكلما زاد تحديد دقة أقصى طاقتها E_0 واتساعها ΔE يمكن تعيينه وطبقاً لنموذج النظرية الكمية المذكورة سابقاً فإن الرنين يفسر كدليل تجريبي لاضمحلال المستوى المثار للجسيم ذي الكتلة $m=E_0/c^2$ وفترة حياة $\tau = h/\Delta E$.

وطبقاً لهذا النموذج النظري الكمي فإن الرنين يكون غير مؤهل بالدليل التجريبي للجسيم المفرد الذي يكون له زمان ومكان متفرد، ويشير الرنين لترابط الزمان والمكان للعمليات الكمية المفردة التي تسمى اضمحلال المستويات المثارة للنظم الكمية لنوع معين، ولا يمكن شرح هذه العلاقة الترابطية في إطار النموذج الجسيمي الكلاسيكي، وإذا فسر ظهور الرنين كمؤشر تجريبي لوجود نوع معين من الجسيمات وحينئذ يظهر مفهوم جسيمي يعطي معنى جديداً قد أعطاه طومسون بالنسبة إلى الحد "جسيم" وهو شيء مختلف المعنى تماماً في التفسير النظري لقياس المقدار e/m إن التغير في المفهوم الجسيمي المنجز هنا سيتم فحصه واختباره بالتفصيل في الفصل السادس، وأنه يشير إلى أن ملاحظة الرنينية لا تشبه ملاحظة التأثير الموضعي للجسيم.

لتفسير الرنينيات كدليل تجريبي للجسيمات السابق افتراض أوضاع نظريات القياس للمسارات الجسيمية وأحداث التشتت التي نوقشت سابقاً والمتشابهة مع نظرية الكم وقف هذا التشابك فقط عند نهاية تكوين النظرية

التي أدت إلى الديناميكا الكهربية الكمية، ومع الديناميكا الكهربية الكمية وصل تنظير أساس الملاحظة لمرحلة جديدة في فيزياء الجسيمات، لم يطل ما قبل النظرية من مفهوم ميتافيزيقا الجسيم ولكن أعطت نظرية الكم معايير الحكم عن ماذا يخص أساس الملاحظة للفيزياء الجسيمية.

٣-٤ مسار البوزيترون

لفترة طويلة ظلت نظرية القياس الكلاسيكية لتحليل المسارات الجسيمية غير متصلة بالمعرفة اللاحقة بأن المسارات الجسيمية ناتجة من عمليات التأين دون الذري الذي هو موضوع قوانين النظرية الكمية، وحتى بدايات الثلاثينيات من القرن العشرين (١٩٣٠) لم يستوف الوصف النظري الكمي لعمليات التأين المتاحة على الإطلاق، وقد بدأ في الثلاثينيات استكشاف الأشعة الكونية مع الغرفة السحابية (١٩٣٠) وفي ذلك الوقت كانت نظرية التأمين الكلاسيكي لبور فقط منذ عام ١٩١٣ وبعض التعديلات النظرية الكمية لها كانت متاحة وكان وضع نظرية القياس للجسيمات المشحونة يتأسس على خليط من المعرفة التجريبية الكمية غير الافتراضات النظرية الكمية على التأين^(١)، ومع هذا فإن حدود نظرية القياس الكلاسيكية أصبح مرئياً تدريجياً خلال تتابع السنوات في وجود ميكانيكا الكم. لم تتوافق نظرية بور للتأين منذ ١٩١٣ كمياً مع المعرفة نصف التجريبية والظاهراتية حول المسارات الجسيمية المتراكمة خلال استخدام نظرية القياس الكلاسيكية، إنها

(١) وانظر أيضا ؛ Bohr 1913a , 1915; Rutherford et al. 1930,434-439 ; Galison 1987 , 97 – 100.

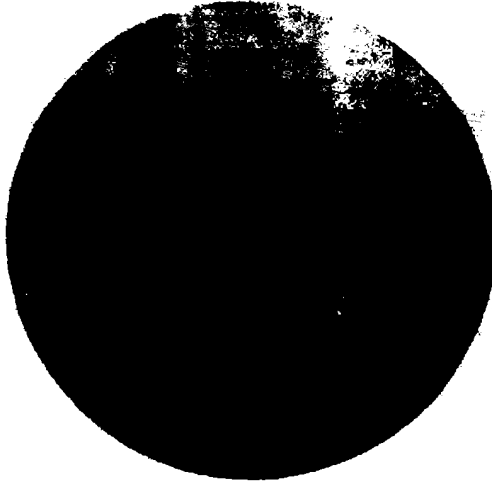
لم تتفق خاصة مع علاقة مدى الطاقة شبه التجريبية، وحول عام ١٩٣٠ عرف أن النظرية الكلاسيكية للطاقة المفقودة للجسيمات المشحونة في المادة تعطي في الإجمال نتائج صحيحة، ولكنها تحتاج تصحيحات نظرية كمياً ولكي لا تتحقق المسارات الجسيمية المنفردة^(١)، ومع ذلك فإن الطرق التجريبية لتحديد الجسيمات الكتلية المشحونة ظلت غير ملموسة للثورة النظرية للفيزياء التي أوجدت فروض أينشتين الكمية للضوء والنموذج الذري لبور وتطور ميكانيكا الكم وفي النهاية الديناميكا الكهربائية الكمية، ولكن وقبل أن تستطيع الديناميكا الكهربائية الكمية في الدخول في تحليل المسارات الجسيمية وفي ظهور البوزيترون والميونات وتحديد البيونات. فالطريق كان طويلاً وصعباً.

إن التكوين النظري الكمي لوصف تفاعلات الجسيمات المشحونة مع المادة وجد منذ نشر أوراق بحث بورن في التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم التي مهدت الأرضية لميكانيكا كم التشتت، وباستخدام ذلك طور بيت في عام ١٩٣٠ نظريته عن مرور الشعاع الجسيمي خلال المادة وفيها وصف تفاعلات الجسيمات المشحونة الكتلية مع المادة في تقريب بورن^(٢)، ومع هذا، يمثل نظرية بورن كانت ميكانيكا الكم غير النسبوية للتشتت، وبالتالي فإنها لا تطبق على المسارات السريعة لجسيمات الطاقة العالية من المادة في سياق ميكانيكا الكم النسبوي والديناميكا الكهربائية الكمية (نظرية المجال الكمي النسبوي للتفاعلات الكهرومغناطيسية). لقد وضعت المعادلات الأساسية لكلا النظريتين عن طريق ديراك عام ١٩٢٧. حدث الاكتمال التقريبي لحسابات

(1) Rutherford et al. 1930 , 439.

(2) Born 1926b; Bethe 1930.

عمليات التأيين لتفاعلات الجسيمات المشحونة ذات الطاقة العالية مع المادة وأصبحت ممكنة بعد عام ١٩٣٣ وكانت تعتمد على صيغة بيث - بلوك التي تم استنتاجها من معادلة ديراك النسبوية ومن نظرية بيث الكمية لتفاعلات الجسيمات المشحونة مع المادة^(١)، وتتوقف أو تسقط الثقة في مثل هذه الحسابات مع الثقة في معادلة ديراك، وقد أمدتنا هذه المعادلة عام ١٩٣٠ بالمحاولة الأولى فقط عند النظرية النسبوية لتفاعل الجسيمات المشحونة مع المادة.



شكل رقم (٣-٦) مسار البوزيترون (Anderson 1933, 492)

ومع هذا فلم تعتمد كثيرًا معادلة ديراك عند الفيزيائيين قبل اكتشاف البوزيترون؛ حيث إن حلولها التي تقابل قيمًا سالبة للطاقة لم يكن لها تفسير تجريبي، وفي مثل هذا الوضع تم استمرار الانفصال التام بين عمل التجريبيين والنظريين بعضهما عن الآخر.

(1) Bethe 1932; Bloch 1933.

ابتداء من معادلة ديراك والمجال الكمي والديناميكا الكهربية الكمية حيث تطورت باستقلال لجميع النتائج التجريبية كأول فكر مرشح لنظرية الكم النسبوية، وفي الوقت نفسه كان التجريبيون يعملون دون التحليل الكمي لمسارات الأشعة الكونية التي اكتشفت عن طريق نظرية الكم وقد استخدم الفيزيائيون التجريبيون الجيدون الخلفية المعرفية المأمونة في تجاربهم وكانت هذه الخلفية المعرفية المأمونة مناسبة نظرياً ومنتقاة جيداً وكافية تجريبياً ولكن الوصف الديناميكي الكهربي الكمي لتفاعلات الجسيمات المشحونة مع المادة لم يستكمل هذه المتطلبات في أعوام الثلاثينيات (١٩٣٠)، ومع طول هذا الوضع المماثل لذلك فإن المسارات الجسيمية للأشعة الكونية تم تحليلها فقط كفيئاً وبالمقارنة على أرضية نظرية القياس الكلاسيكية للجسيم المشحون مستخدمة القليل من الافتراضات النظرية كلما أمكن ذلك. إن اكتشاف البوزيترون خلال هذا الطريق الحذر لتحليل المسارات حينئذ أحدث بقوة الأساس التجريبي للديناميكا الكهربية الكمية.

وقد كان البوزيترون أول جسيم جديد يكتشف في الإشعاع الكوني، وتم تحديده بالنظر للشحنة والكتلة باستعمال الملامح التجريبية للمسارات الجسيمية وقد عمل ج. د. أندرسون بالغرفة السحابية منذ عام ١٩٣١ وحتى فحص الأشعة الكونية في كالتك (معهد كاليفورنيا للتكنولوجيا)^(١). ولكي تحدد إشارة شحنة جسيمات المسارات المتولدة وضع مجال مغناطيسي قوى مطبقاً على الغرفة الفقاعية - فوجد أندرسون على هذه الصور الفوتوغرافية عدداً قليلاً من المسارات التي أشارت إلى الجسيمات الموجبة، وقد أرجعهم في أول

(1) Pais 1986, 351-352.

الأمر إلى مسارات للبروتون، التي كانت فقط هي الجسيمات الموجبة الشحنة المعروفة في ذلك الوقت ومع هذا فقد وجد شيء من الدليل الذي يقف قوياً ضد كونها بروتونات: فقد أشارت درجة التأين المنخفضة للمسارات الجسيمية هذه لكتلة برتبة الإلكترون ناهيك عن عدم كونها كتلة بروتون (بما يساوي ألفي مرة وبزبد)، ومع هذا وتحت افتراضات أنها كانت إلكترونات من الأشعة الكونية فإن اتجاه الطيران لم يكن مقارناً مع انحناء المسار في المجال المغناطيسي، لتحديد اتجاه الطيران للجسيمات الموضحة فقد وضع أندرسون في النهاية لوح رصاص بعرض ٦ ملم في مركز غرفة السحابة، فتفقد الجسيمات المارة في اللوح الرصاصي طاقة وكمية حركة وتظهر هذه الطاقة المفقودة عن طريق الزيادة في انحناء المسار، اكتشف أندرسون أن المسار الخاص مناسب لتحديد الجسيم وكان ذلك في أغسطس عام ١٩٣٢، وقد أوضحت صورة المسار الملامح الظاهرية التالية^(١):

١- يتقابل المسار بين المكملين في منتصف نصفي الغرفة الفقاعية عند لوح الرصاص.

٢- يعتبران مختلفين في إشارة انحناء المسار وليس في القيمة أو مقدارهما.

٣- كلا المساران المكملان يكونان أطول من ٥ سم.

٤- عندما يعزى كلا المسارين إلى جسيم مفرد وشحنة سالبة أي أنه بالنسبة إلى الإلكترون، يعرف الانحناء المساري في المجال المغناطيسي اتجاه الطيران تماماً يعاكس اتجاه فقد الطاقة نتيجة لوح الرصاص.

(١) انظر : Anderson 1932, 1933

لقد ناقش أندرسون في تحليله للمسار كل درجات الحرية للتفسير النظري للمسار^(١):

الكتلة ومقدار الشحنة وإشارتها وعدد الجسيمات وإشارتها وعدد الجسيمات التي قد ينسب إليها المسار، كما استنتج من درجة تأيين المسار فإن قيمة شحنة المسار لا يمكن أن تختلف في المقدار بما يتراوح حول قيمة الضعف وشحنة الإلكترون، وقد حسبت الكتلة بطريقة غير مباشرة باستعمال طول المسار وانحنائه وقيم الكتل المعروفة للإلكترون والبروتون، وقد استعمل فرضين نظريين (١) قوة لورنتز الكلاسيكية طبقاً للانحناء المعطى للمسار المشار إليه لشحنة وكتلة جسيم البروتون ذي طاقة ٣٠٠ م أ ف و(٢) امتداد علاقة مدى الطاقة شبه العملية للبروتون في اتجاه قيم الطاقات المنخفضة طبقاً لقيمة الطاقة للبروتون التي تساوي ٣٠٠ م أ ف وتستطيع أن تعمل مدى في حدود ٥ ميليمترات^(١)، ونتيجة للخاصية السابقة (٣) للمسار فإن الكتلة بالتعويض يكون مقدارها في حدود أكبر من كتلة البروتون ومع هذا فبسبب (٤) فرض أنه إلكترون يحقق قانون حفظ الطاقة بشكل قاطع: ونتيجة الانحناءات الفرعية أو المكملة للمسارات فإن الإلكترون المسبب في إكمال المسار (نهائيه) لا يفقد طاقة في لوح الرصاص ذي السمك ٦

(١) المناقشة التفصيلية لظواهر نظرية المعرفة لاكتشاف البوزيترون موجودة أيضاً في (Brown 1987, 186 - 189)، وقد فسر فيها براون Anderson لمسار البوزيترون طبقاً لنظرية المعرفة الطبيعية، شبيهة لمفهوم شابير Shapere للملاحظة المباشرة منذ عام ١٩٨٢ والتي نوقشت في الفقرة (٢-٥) من الفصل الثاني، إنها تسمح بتأثير للخلفية المعرفية النظرية على الملاحظات.

(2) Rutherford et al. 1930, 294.

ملليمترات، بالأحرى فإنه يتعجل بطاقة ٤٠ م أ ف كما أكد أندرسون، ومع هذا، فإنه لا يمكن تكون مسارين للإلكترون غير معتمدين على بعضهما ويتقابلان بالصدفة عند قرص الرصاص وذلك لأن مثل هذا التطابق يكون احتمالاه ضعيفاً جداً، ومن ثم يتبقى احتمالان، إما أن يكون المسار نتيجة شحنة موجبة لجسيم مفرد فقد طاقته عند لوح الرصاص وتتراوح كتلته وشحنته مع كتلة الإلكترون أو أنه كان نتيجة زوج من جسيمات متضادة الشحنة والمتساوية الكتلة والذي نتج من شيء واحد وبالتفاعل نفسه في لوح الرصاص والذي يكون أحد الخارج منه إلكترونًا، وفي كلتا الحالتين فإن وجود الإلكترون الموجب، البوزيترون هو الناتج من هذا.

إن تحديد أندرسون للمسار المماثل لجسيم موجب الشحنة ذي الكتلة الأقل يوضح تاريخياً أن الفيزيائيين التجريبيين قد تناولوا بحذر شديد جميع الافتراضات النظرية التي لم تزل تخص الخلفية المعرفية الآمنة، وقد استحسن القياس التجريبي الكلاسيكي والنصوص الظاهرية وقد استخدمهم فقط لمقارنة مسار البوزيترون والإلكترون المعروفة جيداً، ومع هذا فقد فعل ذلك لكتلة البوزيترون؛ لأن ذلك يتطلب نظرية ملائمة للطاقة المشحونة في داخل المادة والتي لم تكن متاحة في ذلك الوقت. إن تحليل أندرسون لمسار البوزيترون علم التجريبيين أن يفضلوا العمل دون الدقة الكمية إذا لم تَبْدُ نظرية القياس المطلوبة مسموعة بصيت كاف.

يمكن تعلم حقيقة أخرى من خطوات طريق أندرسون بمجرد ظهور الاكتشافات التجريبية الحاسمة وأن تحليل الظواهر غالباً ما تقود إلى تكون نظريات مستقلة تماماً، إن تحقيق التجارب وتقييمها يتمتع بحكم ذاتي بالنظر

للتطور المتزامن للتصورات النظرية كما طبقت أيضاً دراسات حالة جاليسون في تاريخ الفيزياء الجسيمية^(١).

لقد عرف أندرسون معادلة ديراك الموضوعية في عام ١٩٢٧ مثل العديد من فيزيائيي الجسيمية الآخرين، إذا فسر أحد الحلول الحرفية لمجموعاتها الكاملة فهذا أدى إلى وجود مستويات جسيمية ذات طاقة سالبة، ومع هذا، هذه المعرفة لم تأخذ طريقاً تدفع به تحليل مسارات البوزيترون التي كانت متاحة في المادة الملاحظة منذ عام ١٩٣١، ولم يجد التجريبيون في فترة ١٩٣٠ طريقاً يركزون فيه البحث عن وجود جسيمات لها كتلة الإلكترون وشحنة موجبة ليمدوا حلول معادلة ديراك بالأساس التجريبي، وتاماماً على النقيض فقد حاول أندرسون قدر ما أمكن ليفسر المسارات المثيلة بدلالة شحنة وكتلة البروتون، كما فعل ميليكان في مجموعته التي عمل معها، وقد حاول ديراك بنفسه أيضاً ليعطي تفسير الحفظ أو البقاء لحلول معادلته المسماة بخصوص حلول معادلة ديراك ذات الطاقة السالبة للبروتون^(٢).

٣-٥ تحديد الجسيم والديناميكا الكهربائية الكمية

إن الفيزيائيين محافظون. وهم يسعون قدر الإمكان إلى الاعتماد على الخلفية المعرفية المتفق عليها فقط دون وضعها موضع التساؤل. وبالنسبة إلى الخلفية المعرفية الموثوق بها في عام ١٩٣٠، كان ثمة افتراض لم يتم تفنيده

(١) انظر Galison 1987، وخاصة حالته في دراسة اكتشاف التيار المتعادل المحقق للرؤية البنائية لفيزياء الجسيمات الحديثة، والمذكورة في Pickering 1984.

(٢) انظر: Pais 1986, 346-348.

بشأن وجود اثنين فقط من الجسيمات الأولية الكبرى المشحونة؛ أعني الإلكترون والبروتون، ولكن لم تنتم إلى هذه الخلفية المعرفية الآمنة إلى ذلك الوقت المقاربات والمناهج النظرية الكمية والتي كانت قد تطورت في عشرينيات القرن العشرين وقامت بهز دعائم صرح الفيزياء كما عُرفت سابقاً. وقد استحضر الفيزيائيون في الثلاثينيات جسيمات جديدة لتؤدي دوراً في شرح الظواهر التجريبية ما لم يكن بالإمكان تجنب مثل هذه الافتراضات دون تعريض المزيد من المبادئ الأساسية مثل حفظ الطاقة إلى الخطر. فيتم استخدام قانون حفظ الطاقة عن طريق النظرية النسبية بتلك الخاصة بكمية الحركة فأبقت الثورة الكمية في محل غير نقدي، وقبل اكتشاف الإلكترون الموجب عن طريق أندرسون لم يأخذ أي شخص مجمل مجموعة حلول معادلة ديراك بجدية (بما فيهم ديراك نفسه)^(١)، وقد تم تحديد البوزيترون بعد ذلك بمستويات جسيمية ذات طاقة سالبة خاصة بحلول معادلة ديراك، ولم يكن هذا التفسير يخص أندرسون ولا ديراك ولكن يخص بلاكيت وأوشالييني فقد أكد اكتشاف أندرسون للبوزيترون في عام ١٩٣٣ عن طريق الفحص التجريبي لما عندهم وأعطوه تفسيراً نظرياً بدلالة حلول معادلة ديراك^(٢) وقد حددت هذه التفسيرات حلول معادلة ديراك لقيم الطاقة السالبة مع وصف الجسيمات الحرة بشحنة موجبة وكتلة إلكترون أي بوصف مثالي للبوزيترون يترك مساراً مؤيماً في الغرفة السحابية عند عمليات التشتت المتعددة مع الهيدروجين السائل.

(١) للتفصيل التاريخي للتفسير الفيزيائي لمعادلة ديراك انظر: stockler 1984,94,106.

(٢) انظر: Pais 1986, 362-363.

من ثم فقد تحقق اكتشاف البوزيترون باستقلالية غير معتمد على معادلة ديراك وقد أمد ذلك الحلول غير التبريرية (أو غير الفيزيائية) للطاقة السالبة بالأساس التجريبي غير المتوقع، وقد استطاع أندرسون في نفس عام ١٩٣٣ أن يوضح توليد بوزيترونات الأشعة الكونية عن طريق عمليات الخلق الزوجي التي ينبث فيها الإلكترون والبوزيترون معاً، وعلى قاعدة معادلة ديراك فقد وجد تفسيراً طبيعياً كهذه العملية أيضاً^(١). هذا ومن أحد الوجوه شجع النظريين تطوير الديناميكا الكهربائية الكمية المبنية على معادلة ديراك ومعادلات ماكسويل والمجال الكمي، وتطبيق ذلك على تفاعلات الجسيمات ذات الطاقة العالية مع المادة. ومن وجهة النظر الأخرى، بطريقة الخطوة تلو الخطوة التي شجعت التجريبيين ليستعملوا نتائج النظريين لتحليل الأشياء الملاحظة من الأشعة الكونية، وكان تطوير المجال الكمي في أول الأمر على يد النظريين غير معتمد تماماً على فيزياء الجسيمات التجريبية وبالحوار فإن تحليل المادة أو الأشياء الملاحظة عن الأشعة الكونية عن طريق التجريبيين لم تكن لتدفع من البداية (في ميكانيكا الكم) لعمل حسابات الديناميكا الكهربائية الكمية، ومع هذا وبمجرد أن تأكدت معادلة ديراك بواسطة اكتشاف البوزيترون بدأ كلاهما في التشابك. لقد طالت الخطوات الرئيسة تجاه الوصف النظري لتفاعلات الجسيمات النسبوية المشحونة مع المادة وذلك قبل التعزيز النظري والتجريبي للديناميكا الكهربائية الكمية، ففي عام ١٩٣١ رتب مولر ليستنتج تشتت إلكترونين من معادلة ديراك في تقريب بورن لميكانيكا الكم في الوصف النسبوي غير المتغير^(٢)، وفي عام ١٩٣٢ استعمل بيث معادلة مولر للتشتت ليستنتج المعادلة النسبوية لفقد طاقة

(١) انظر : Anderson and Anderson 1983.

(2) Moller 1931.

الإلكترونات نتيجة عمليات التأين في مادة العداد الجسيمي، ومع هذا، فقد حسبت هذه المعادلة بدقة لذرة الهيدروجين فقط، أي تم حساب طاقة الإلكترونات المفقودة في الغرفة السحابية⁽¹⁾ وفي عام ١٩٣٣ أكمل بلوك معادلة بيت لأكثر الذرات تعقيداً في سياق النموذج النظري الذي يصف إلكترونات الذرة التي في مثل غاز فيرمي⁽²⁾، وبهذا السبيل تم استنتاج معادلة بيت - بلوك (المذكورة سابقاً) لجسيمات الطاقة العالية المشحونة كقانون يصف قدرة توقف الذرات. وفي عام ١٩٣٤ تم تقديم معادلة الفرملة والإنتاج الزوجي ويكون الشكل هو العملية العكسية لتشتت كومبتون والأخير هو إنتاج زوج الإلكترون - بوزيترون من الفوتون. هذا وقد اكتشف الإنتاج الزوجي في عام ١٩٣٣ بواسطة بلاكت وأوشياييني عن طريق تحليل مسارات الأشعة الكونية⁽³⁾، وعن طريق صيغة بيت - بلوك والصيغ الخاصة بالفرملة والإنتاج الزوجي أمكن حساب الطاقة المفقودة للجسيمات المشحونة نتيجة مرورها خلال المادة، وبهذه الطريقة زادت للغاية في منتصف الثلاثينيات (١٩٣٠) المعرفة النظرية الكمية التي أمكن استعمالها في تحليل مسارات الجسيمات.

لكن في ذلك الوقت كانت لا تزال الديناميكا الكهربائية الكمية بعيدة عن الأخذ في الحسبان وعندما تطورت نظرية المجال الكمي وتم تنقيحها على التوازي مع الميكانيكا الكمية النسبوية ظلت مشاكل نظرية داخلية شديدة باقية (والتي تم حلها فقط في الخمسينيات ١٩٥٠ عن طريق التقريب المعياري)

(1) Bethe 1932.

(2) Bloch 1933.

(3) Bethe and Heitler 1934, Pais 1986 , 376-375;

انظر أيضاً ما وجد في (Rossi 1952 , 151) والعرض التاريخي في Galison

1987,103 , 110)

إضافة إلى وجود تضارب تجريبي حول تحليل المسارات الناتجة من الأشعة الكونية، وتوجد مسارات نتيجة جسيمات ذات كتل متوسطة (سميت وقتها "ميزوترونات" والتي تسمى الآن "ميزونات"، لكن تم تحديدها فقط عام ١٩٣٦ وسبق ذلك الدخول في دائرة قاسية في تحليل المسارات الجسيمية، ولكي يتم تعيين كتلة الجسيم الذي يمثله المسار بدقة فلا بد من الاستعانة بالديناميكا الكهربائية الكمية، فحساب الطاقة المفقودة للجسيمات المشحونة في المادة يصمد أو يخفق جنباً إلى جنب مع الديناميكا الكهربائية الكمية. على طرف النقيض، وحتى نصير متأكدين من الديناميكا الكهربائية الكمية، فلا بد من قياس الطاقة المفقودة للجسيمات المعروفة جيداً في المادة، ومع هذا، فإن تنبؤات الديناميكا الكهربائية الكمية للجسيمات المعروفة يتعارض مع مسارات الميزون غير المعرفة، ومن ثم حتى بعد تأكيد معادلة ديراك بواسطة البوزيترون فإن صلاحية الديناميكا الكهربائية الكمية ما زالت في حالة تشكك، وعلى وجه الخصوص قبل تحديد الميزونات فقد افترض فشل الديناميكا الكهربائية الكمية عند الطاقات العالية عندما حكمت الطاقة المفقودة للجسيمات المشحونة في المادة بواسطة عمليات الفرمة والإنتاج الزوجي^(١).

استنتجت القوانين التي تصف الطاقة المفقودة عن طريق التأيين والفرمة والإنتاج الزوجي كثرت أو قلت في الطريق نفسه من معادلة ديراك في تقريب بورن، ومع هذا ونتيجة الدائرة القاسية المرسومة سابقاً فإنهم لم يدخلوا النظريات المقاسة وقد تم التوافق عليها كخلفية معرفية آمنة فقط بعد نهاية الثلاثينيات من القرن العشرين إلى الامتداد بأنه وجد حينئذ تأكيدات تجريبية إضافية للديناميكا الكهربائية الكمية.

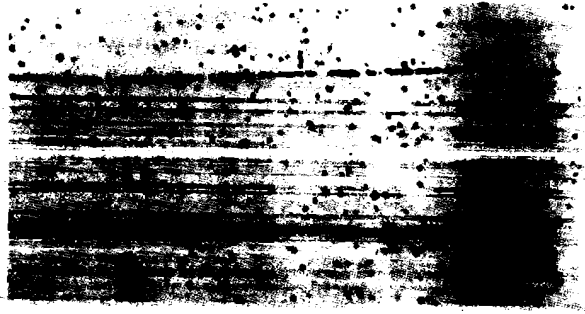
(١) لقد سبب تحديد الأصل والمحتوى الجسيمي للجسيمات الرذاذية من الأشعة الكونية مشاكل كبيرة، انظر: (Ibid., 110-124)، وأيضاً Cassidy 1981.

التأكيد التالي كان من حقيقة التحديد التجريبي "للميزوترونات" أو الميزونات، فقد أثبت أندرسون في عام ١٩٣٦ بالنسبة إلى المسارات الجسيمية للأشعة الكونية أنه يوجد جسيمات مشحونة ذات كتلة تتراوح بين كتلتي الإلكترون والبروتون، ويسمى الآن الجسيم الذي عرفه بالميون وهو أثقل نسبة إلى الإلكترون، إن التأخر في الوثوق في الديناميكا الكهربائية الكمية وفي حسابات الطاقة المفقودة عن طريق عمليات التشتت عند الطاقات العالية للجسيمات نتيجة تأخر تحديدهم لها مدة عامين وكان هذا التأخير نتيجة الدائرة القاسية التي وصفت سابقاً، ونتيجة عدم كفاية الطرق التجريبية التي انتقاهما في عام ١٩٣٣ فقد وجد أندرسون بعض المسارات الجسيمية التي نظر إليها على أنها مسارات للإلكترونات في صورة الفوتوغرافية الناتجة من الأشعة الكونية ومع هذا فهي حتى الآن مسارات ميونية غير محددة، وهذا أكد الشك في فشل الديناميكا الكهربائية الكمية عند طاقات الجسيمات العالية^(١)، وقد نقح أندرسون المزيد من طرق القياس عن طريق وضع ماص بلاتيني بعرض واحد سم في الغرفة الفعّالة، فأوقف هذا الماص الإلكترونات وسمح للميونات بالمرور خلاله، فكانت النتيجة الواضحة أن هذا الماص البلاتيني سمح للميونات بالمرور للجسيمات المشحونة الأثقل من الإلكترون، فمن إحدى وجهات النظر أن الديناميكا الكهربائية الكمية تكون أفضل في تحقيقها لمعرفة الطاقة المفقودة عن طريق عمليات التأيّن وأنها تتنبأ بمعرفة الجسيمات الأخف من البروتون (إذا كانت تنبؤاتها صحيحة للجسيمات ما بين

(1) Ibid., 2 and 12-15.; Anderson and Anderson 1983, 143-146.

وقد أكد جاليسون (Galison 1987, 137) أن أندرسون قد استخدم الغرفة السحابية عنها لاكتشاف البوزيترون، ولكنه قام بعمله بتقنية تجريبية أكثر تقدماً.

الطاقة المنخفضة والطاقة المتوسطة⁽¹⁾، وبهذه الطريقة انتهى التضارب الذي كان موجودًا وزادت الثقة في الديناميكا الكهربائية الكمية.



شكل (٣-٧) مسارات البروتون المقاسة بالمستحلبات للنوية
(Powell et al. 1959, 31)

(1) Pais 1986 ,432, Cassidy 1981,14

ينتمي السياق النظري والتجارب المختلفة إلى مدرستين منفصلتين في الفيزياء الجسيمية. ليس بمقدورنا الاستقاضة هنا في شرح التفاصيل التاريخية للمراحل الدقيقة التي أدت إلى تحديد الميونات، انظر جاليسون ١٩٨٧، الفصل الثالث؛ خصوصًا من ص ١٢٦ إلى ص ١٣٣.

فقد أكد جاليسون أن اللحظة الدقيقة لاكتشاف الميون لم تكن معروفة لأن الاكتشاف كان نتيجة عملية التعليم التجميعي بين جسيم الفيزيائيين (مثل التيونترينو). وفي هذه العملية التعليمية التجميعية قد تم حذف مزيد ومزيد من الخيارات بعناية: "قالانتقال إلى قبول للميون لم يكن كشفًا لحظيًا. ولكن عبر تعقب سلسلة ممتدة من التفكير التجريبي مثل هذا، فقد رأينا عملية ديناميكية تحدث، بينما تكون محصورة أحيانًا في الزمان، في فيزياء الجسيمات مرارًا وتكرارًا. وبوسعنا أن نرى هذا النمط من الحذف التدريجي للبدائل، على سبيل المثال، في اكتشاف النيوتريينو". المرجع السابق نفسه، ص ١٣٣.

إن تطوير الديناميكا الكهربائية الكمية ونجاحاتها التجريبية أخذت عدة منعطفات في الثلاثينيات ١٩٣٠ ولم نتمكن هنا من عرضها بمزيد من التفصيل^(١)، ومع هذا فإن النتيجة واضحة حتى لو أن درجة قبول هذه النظرية أخذت في ازدياد بعد اكتشاف البوزيترون، وقد استعرض محتواها التجريبي بعناية قبل دخول أية قوانين لها في تحليل المسارات الجسيمية.

وعندما تمت الموافقة النهائية للديناميكية الكهربائية الكمية، فقد أحدثت تنبؤاتها للطاقة المفقودة للجسيمات المشحونة في المادة قوانين قياسية أفضل، والآن يمكن الأخذ بميزات صيغة بيث - بلوك وهكذا، بالنسبة إلى تحليل المسارات الجسيمية أو بالنسبة إلى تطوير الكمي لنظرية القياس الكلاسيكي.

لقد أحدثت صيغة الديناميكا الكهربائية الكمية للتأين والفرملة والإنتاج الزوجي تنبؤات نظرية لعلاقة مدى الطاقة، فأمكن مقارنة التنبؤ الديناميكي الكهربائية الكمية للعلاقة شبه التجريبية المقابلة مباشرة والتي تعتمد على النموذج الجسيمي الكلاسيكي وتعتمد على الأطوال المقاسة للمسار في تجارب التشتت. وبهذه الطريقة يمكن تحديد الجسيمات المشحونة عن طريق قياس كتلتها، وتجمع نظرية القياس المقابلة بين العلاقة النظرية الكمية لمدى الطاقة مع الحساب الكلاسيكي لانحناء المسار في المجال المغناطيسي المبني على قوة لورنتز، وتم تنقيح قانون القياس الكلاسيكي عن طريق التصحيح النظري الكمي، وأنه يطابق مثيله في تطوير نظرية القياس التي تتبني علي الفيزياء بأجزائها المتنوعة^(٢)، والآن أصبحت قياسات الكتلة دقيقة بالمقارنة لحسابات

(١) انظر: Schweber 1994

(٢) انظر الفصل الرابع.

أندرسون الخام القديمة لكثلة البوزيترون والميون والتي كانت أقل كثيرًا في النظرية المحملة.

إضافة إلى أنه تم تنقيح المزيد في الأربعينيات ١٩٤٠ لطرق قياس الكتلة التي لا تعتمد تمامًا على الديناميكا الكهربائية الكمية، فكانت للمستحلبات النووية الجديدة حيزًا عاليًا من الثبات، وقد سمحت بتعيين كتلة الجسيم بدقة عالية غير معتمدة على مداها مستخدمة قياس الكثافة النقطية الحبيبية^(١)، وقد أمكن لهذه الطريقة في عام ١٩٤٧ أن تميز الميون المكتشف في ١٩٣٦ والبيون الذي تم التنبؤ به عام ١٩٣٥ في نظرية يوكاوا للتفاعل القوى، وأخطأت في الميون من عام ١٩٣٦ حتى ١٩٤٧، فقد كانت كتل الميون والبيون ١٠٦ م أف و ١٤٠ م أف على التوالي^(٢)، لم يستطع أندرسون أن يحلم بإقرار مثل هذا الفرق البسيط من قياس الكتلة تجريبيًا في عام ١٩٣٢ وأصبح المزيد من التقدم في تطوير مثل هذا النوع من التحليل الظاهراتي للمسارات الجسيمية ممكنًا عندما اخترع جلاسر الغرفة الفقاعية في عام ١٩٥٤ حيث استطاعت أن تسجل مضاعفات المسارات الجسيمية في الوقت نفسه وتجعلهم مرئيين لحظيًا في الصور الفوتوغرافية.

لقد أمكن أيضًا فحص العلاقة شبه التجريبية لمدى الطاقة بدقة عالية للعديد من أنواع الجسيمات وبمدى كبير من الطاقة بمجرد استخدام الغرفة الفقاعية في تجارب التشتت في المعجلات الجسيمية، وهكذا فمن إحدى وجهتي النظر عند حساب الطاقة المفقودة للجسيمات المشحونة في المادة وجد

(1) Rossi 1952, 138-142.

(2) Ibid., 162-163, and Lattes 1983.

التشابك للديناميكا الكهربائية الكمية مع نظرية القياس الكلاسيكية لمسارات الجسيم، ومن الوجهة الأخرى ما زال للفيزياء الجسيمية طرق مستقلة لتحديد الجسيمات عند نهايتها، على الأقل فإن ذلك يتحقق كلما أمكن تحديد لأنواع الجسيمات باستعمال المسارات الجسيمية هي وأحداث التشتت في المادة الملاحظة.

يعتمد قياس التغير في الرنينيات فقط على النموذج النظري الكمي للاضمحلات المرتبطة بالجسيمات غير المستقرة. وبذلك وصل تشابك الديناميكا الكهربائية الكمية مع طرق قياسها إلى مرحلة لم تكن لتطول حتى حدد نوع الجسيم دون الاعتماد على نظرية الكم، وسميت هذه المرحلة الجديدة بالنظرية المحملة لخطوات القياس بنظرية T لسنيدي⁽¹⁾. وقد وصلت إلى هذا بعد التدعيم التجريبي والنظري للديناميكا الكهربائية الكمية إضافة إلى تفسير الرنينيات بدلالة الجسيمات غير المستقرة التي بقيت أيضاً في العديد من السبل متعلقة بتحليل المسارات المرتبطة بأحداث التشتت المنفردة التي تعزى إلى الرنين.

٣-٦ هل توجد جسيمات دون ذرية؟

يتكون أساس الملاحظة في فيزياء الجسيمات من قياسات الموضع ومسارات الجسيم وأحداث تشتت ورنينيات. لقد رأينا في هذا الفصل كيف يرتبط هذا الأساس باثنين من المفاهيم غير الصورية للجسيم؛ أعني المفهوم العلي والمفهوم الميربيولوجي. بناءً على ما تقدم؛ تتسبب الجسيمات في الآثار

(1) Smeed 1971.

الموضعية في كشافات الجسيمات. فأحدثت ملاحظات ارتدادية كما يحدث في تأثير كومبتون والطفقة التي تحدث في عدادات جيجر والمسارات الجسيمية وأحداث التشتت التي ينطبق عليها قوانين حفظ معينة وهكذا. وطبقاً لما سبق فإن الجسيمات عبارة عن أجزاء ميكروسكوبية من المادة. فتمثل أساس علاقات الجزء بالكل التي يتم التعبير عنها من خلال قواعد جمع معينة لمكونات نظام ديناميكي مركب. لقد تم توارث المفهومين الصوريين للجسيم كليهما عن الميتافيزيقا التقليدية وفلسفة الطبيعة. كما فحصنا تفصيلاً البنية التحتية للأساس الملاحظاتي لفيزياء الجسيمات التي تم تفسيرها من خلال هذه المفاهيم الجسيمية. ونقف الآن على أرضية أفضل كثيراً فيما يتعلق بالسجل حول الواقعية العلمية والتساؤل حول ما إذا كان هناك ثمة جسيمات دون ذرية.

وفقاً لما توصلنا إليه في الفصل الأول والثاني، يتكون الواقع التجريبي من أحداث عارضة ونتائج قياس فعلية. ومن وجهة نظر الواقعية المعتدلة التي تتبناها هنا فإن الواقعية التجريبية مُحملة بالنظرية. فتعتمد كل القياسات على نظريات القياس ويتم التعبير عن كل نتائج القياسات من خلال الكميات الفيزيائية. وتندمج الكميات في المقاييس وتُعزى إلى موضوعات ونُظم فيزيائية. إن المقاييس وفكرة الموضوع الفيزيائي هي المخططات الإدراكية الأساسية أو الأولية للفيزياء الحديثة. إنها تأتي جنباً إلى جنب مع المناهج التحليلية والخصائص البنوية للعلم الجاليلي. إنها السائدة كلاسيكياً وينشأ عنها المفهوم التعميمي للملاحظة التي ناقشناها في الفقرة (٢-٦). ثم شرح هذا المفهوم التعميمي للملاحظة في الواقع من خلال مصطلحات ميتافيزيقية تقليدية عن الجوهر والعلية. فَيُعد الموضوع أو النسق القابل للملاحظة

بالمعنى الواسع حاملاً فردياً للكميات الفيزيائية، أي جوهرًا. ويتم نسبة هذه الكميات إليه على أساس رداية رلية فردية تربطه بالظواهر الملاحظة والمعطيات المقاسة.

لقد صارت المخططات الإدراكية للفيزياء الكلاسيكية ضعيفة بلا ريب في ضوء بنية الكم لمجال ما دون الذرة. وهنا لم تعد المخططات الإدراكية للجوهر والعلية منطبقة بشكل كامل. لقد أصبحت نسبة القيم المقاسة للموضع، وكمية الحركة، والكتلة، والشحنة، والطاقة وما إلى ذلك؛ إلى الأجزاء دون الذرية للمادة أمرًا مثيرًا للجدل إلى حد بعيد في ضوء علاقات عدم التحديد عند هايزنبرج، لذا فبمقدورنا القول: إن ثمة جسيمات دون ذرية فقط إذا ما كان ممكنًا أن نقيم روابط رلية تعود بنا بوضوح من المعطيات إلى الكميات الفيزيائية للأجزاء الميكروسكوبية للمادة. أو - بعبارة أخرى - أن ثمة جسيمات دون ذرية فقط إذا ما كان ممكنًا ملاحظتها بالمعنى التعميمي كأجزاء للمادة تُسبب آثارًا موضعية في مجسات الجسيمات.

وفي الواقع فإن كل طرق الكشف عن الجسيمات التي نوقشت في هذا الفصل تفي بهذا المعيار لوجود جسيمات دون ذرية. من الجلي أن اكتشافات الإلكترون والفوتون كانت ملاحظات بالمعنى التعميمي المقترح هنا. فقد قاس طومسون خصائص قيم e/m لأشعة الكاثود (أى النسبة بين شحنة وكتلة الإلكترون الذى هو أساس أشعة الكاثود) في عام ١٨٩٧. وأكد ميليكان بعد ذلك أنه يمكن أن يعزو ذلك بوضوح إلى قطرات الزيت المنفردة (انظر فقرة ١-٢-٣).

وضع أينشتين فرضية الضوء الكمي في عام ١٩٠٥ وعزا كمية الحركة $p = h\kappa$ إلى الضوء الكمي. وأكد بعد ذلك كل من بوث وجيجر أن الضوء الكمي ينقل كمية حركة (أو يفقد طاقة ويقلل ترددها) عندما ينتج عنه إلكتروناتاً مرتدًا (انظر فقرة ٣-٢-٢). إن الطرق النظرية لعمل قياسات الموضع وتحليل المسارات الجسيمية تُتيح إمكانية نسبة قيم واضحة للكتلة، والشحنة، وكمية الحركة إلى مسار الجسيم متى كانت مناهج تحليل المعطيات حصرية إلى حد كاف الفترتان (٣-٣، ٣-٥). يهدف تحليل أحداث التشتت إلى تفريد الجسيمات الموجودة في التفاعلات دون الذرية والتي تخضع لقوانين حفظ معينة. وهنا تعود الرابطة العلية خلفاً من مسارات الجسيمات القابلة للملاحظة إلى كميات دينامية محافظة من قبيل اللف المناظر $isospin$ (هو لف مغزلي لجسيم ما موجود في مستوى طاقة معين يتم التعبير عنه برقم كمي يأخذ قيمة صفرية أو ذات مضاعفات العدد الصحيح أو النصف) والغرابية والتي يمكن نسبتها بوضوح إلى حدث تشتت منفرد. وحدها الرنينيات مختلفة. فالرنين في حد ذاته لا يُشير إلى جزء منفرد من المادة ولكن إلى نوع معين من حالة الجسيم غير الثابتة فحسب. ومن أجل فصل جسيم معين عبر التفسير التعميمي للملاحظة، ينبغي القيام بالمزيد من العمل الاستكشافي.

من الواضح أن المعيار المذكور آنفاً ضروري، ولكنه ليس شرطاً كافياً لوجود جسيمات ما دون الذرة. ومن أجل إعطاء شروط كافية، فإن الطرق التي تنطبق بها مفاهيم الجسيمات الميرولوجية والعلية على ظواهر فيزياء الجسيمات يتعين بحثها بشكل أكثر تفصيلاً. تمثل البنية الكمية للمجال دون الذري العقبة الأساسية من أجل إيجاد شروط كافية من هذا القبيل.

ومع ذلك يخفق مذهب ضد-واقعية الفلسفية الحديثة في فهم هذا النوع من العقبات. تُركز الاتجاهات التجريبية والبنوية المعاصرة في فلسفة الفيزياء على المشكلات الفلسفية التي تكون غير ذات صلة - بدرجة أو بأخرى - بفهم لماذا تكون واقعية ما دون الذرة على المحك. إن البنية الراسخة لأساس الملاحظات لفيزياء الجسيمات يدعم الحُجج العامة ضد التجريبية والبنوية التي عُرضت في الفصل السابق. دعونا نستحضر الاعتراضات المركزية للتجريبيين والبنويين ضد استدلالات الفيزيائيين من المُعطيات التجريبية إلى الكيانات غير القابلة للملاحظة من قبيل جسيمات ما دون الذرة.

١- المُعطيات التجريبية مُنتجات تقنية وليس لها وجود في الطبيعة. يفوت هذا النقد عرضية المُعطيات المأخوذة عن طريق مُكتشف الجسيمات. حتى لو أن الآثار الموضوعية للإلكترونات أو البروتونات يمكن مشاهدتها عن طريق الأجهزة التكنولوجية مثل الغرفة الفقاعية وهذه الجسيمات لا تستطيع أن تتولد اعتباطياً، فالمسار الجسيمي إما أن يكون مصوراً أو لا يكون وقد يكون للمسار انحناء صغير أو كبير وقد يكون لنقاطه المقاسة كثافة منخفضة أو عالية، وهكذا إن الشكل الظاهري للمسار لا يكون في مرمى التجريبيين، بالإضافة إلى أن الظواهر الملاحظة في تجارب التشتت الخاصة بالشعاع الناتج من المعجل الجسيمي تتداخل مع الظواهر الملاحظة دون الشعاع الجسيمي. توجد استمرارية التركيبات التجريبية الملاحظة والنسي يتراوح مداها من خارج الطبيعة إلى فيزياء داخل المعمل. ما زالت

العدادات الجسيمية تصطاد أو تعد المسارات الجسيمية نتيجة وجود الأشعة الكونية وذلك عندما يتوقف الشعاع (من المعجلات) (لقد بدأت الفيزياء الجسيمية بفحص الأشعة الكونية وعادت إليها في جسيمات الفيزياء الفلكية الحديثة) وتحت الظروف والشروط المعروفة جيدًا فإن صور مسارات الميون الناتجة من الأشعة الكونية يكون لها نفس شكل مسارات الميون الناتجة من الأشعة الكونية يكون لها نفس شكل مسارات الميون الذي تم عده عن طريق العداد الجسيمي (الموضوع أمام المعجلات المنشأة).

٢- العلل غير القابلة للملاحظة والبني غير التجريبية لا تنتمي إلى الواقعية التجريبية ولكن إلى الميتافيزيقا. إن عرضية ظواهر ما دون الذرة مفقودة مُجددًا. لقد سجلت النتائج المعملية وهي ليست متولدة اعتباطًا، إن البناء أو التركيب التجريبي المثبت يكون نظرية - محملة، ولكنها لا تحدث ظواهر محتملة أو طارئة، وإن أي مسار جسيمي يكون جاهزًا في معرفته من خلال النتائج، ولا سيما في حالة مسار الإلكترون الذي يظهر له انحناء عكسي لحالة مسار البوزيترون حينما يوجد في مجال مغناطيسي وكذلك الحال في حالة انحناء الميون بإشارتها ولكنها بانحناء أصغر كثيرًا، وقد دل العلم النيوتوني بتأثيرات مختلفة نتيجة أسباب قانون شبيه ولكن مختلف، والاستدلالات العلية لم تكن لتحدث ميتافيزيقا فاسدة، إن الاستدلال فقط بأن سبب مسار الجسيم هو في تحول الجسيم الكلاسيكي ليكون ميتافيزيقياً فاسدًا حقيقة، فقد أوضحت المسارات الجسيمية أنه المكون

التجريبي للنظرية لم يستطع أن يكون ثابتاً كما اعتقد (فان فراسين) بسهولة، يكون المكون التجريبي للمسار الجسيمي في عالم دون الذرة من نقاط مقاسة متفردة فقط ويكون التركيب التجريبية المقابل لذلك غير متصل، بما يتعارض مع التركيب التجريبي للميكانيكا الكلاسيكية والتي تختص بحركة الكواكب، ويعتمد مفهوم التركيب التجريبي جداً على المعرفة النظرية، ولا تختص نماذج النتائج المتصلة بالتركيب التجريبي لنظرية الكم ولكن تخص التركيب التجريبي للميكانيكا الكلاسيكية، ومن ثم فإن معيار فان فراسين الخاص بنماذج النتائج والتي سمحت فقط للبناء الزمني المكاني أن يقتصر على البناء الكمي وهذا طبيعي تم تدوينه^(١) وهنا ظهرت نقطة إضافية، أن الاكتشافات التجريبية قد تغير المكون التجريبي للنظرية، فقد أعطى اكتشاف البوزيترون مكوناً تجريبياً لحل معادلة ديراك ذات الطاقة السالبة والتي كانت تسمى في السابق غير الفيزيائية، وأن الجزء غير التجريبي للنظرية لم يكن ميتافيزيقا فاسدة، وأنها لا غنى عنه في وصفنا للحقيقة الفيزيائية، وقد يكون الوصف خاطئاً أو صائباً، وفي أي الأحوال فإنه يصبح قابلاً للاختبار في طريقة غير متوقعة ويحدث تنبؤات تجريبية غير متوقعة.

٣- التحميل النظري theory-ladenness للمعطيات والظواهر يتأسس على التعايش المشترك بين النظرية والقياس. يصطدم هذا الاعتراض بالحجتين السابقتين. إذا ما تشابكت النظرية مع القياس فهنا لا توجد

(١) انظر مناقشاتي لـ : (Van Fraassen 1980) في (الفقرة ٢-٦) ص ٥٩-٦٠.

نتائج محتملة. وطبقاً لما جاء بكتاب بيكرنج "تأسيس الكوارك"⁽¹⁾ التي وضح فيها اعتماد نتائج التركيبة النظرية - الجمعية لفيزياء الطاقة العالية على التكوين المدرسي للمجتمع العلمي، ومع هذا فإنها تعرف هنا بأن أساس الملاحظة للفيزياء الجسيمية له تركيب طبقي والذي يبنى تجريبياً بعناية، يوجد في كل طبقة لاعب داخلي مشاهد قياسي ونظري، ولكن في كل طبقة فقط تعتبر طرق القياس مستقلة لتكون موثوقة كما لم تؤكد النظرية طوال ذلك، إن تكافل النظرية والتجربة هو النتيجة وليس نقطة البداية لهذا التطور، إن اعتماد القياس على نظرية المجال الكمي في الفيزياء الجسيمية يأتي فعلاً في مرحلة متأخرة جداً للتكوين النظري.

إذا كان هناك فعلاً تكافل للنظرية والتجربة عند بدايات التكوين النظري فحينئذ تكون هذه استنباطات كلاسيكية للفيزياء دون الذرية، في التكافل إذا لم يمنع أحد الفيزيائيين من إحلال الميكانيكا الكلاسيكية وأديناميكا الكهربائية بما يقابلها من النظريات الكمية، وبعد كل ذلك فلم يترك شيء للبنائين والتجريبيين ليعارضوه ضد تفسير القياسات الموضعية والمسارات الجسيمية وأحداث التشتت والرنينيات كدليل تجريبي للجسيمات دون الذرية، ومع هذا فنحن لا نرى حتى كيف يمكن تفسير الحقيقة دون الذرية بدلالة الجسيمات. إن التساؤلات حول ما إذا كانت المفاهيم العلية والميرولوجية الجسيمية تعمل أيضاً، وإلى أي مدى، في مجال الكم ما زالت مطروحة حتى اليوم.

(1) Pickering 1984.

سبر أغوار البنية وون الذرية

لقد ظل البحث في البنية دون الذرية من خلال تجارب التشتت على مدار قرن من الزمان؛ حيث أجريت أولى تجارب بحث البنية الذرية التحتية في مختبر "رنرפורد" حوالي عام ١٩١٠. في هذه التجارب، افترض "رنرפורد" وجود نواة نقطية داخل الذرة كمركز تشتت جسيمات ألفا عند سقوطها على شريحة الذهب وذلك لتفسير ارتداد بعض من هذه الجسيمات في الاتجاه الخلفي. ولقد أوضح المزيد من تجارب التشتت أن نواة الذرة ليست مجرد نقطة صماء. فقد اتضح أن النواة، كما اتضح في الذرة سابقاً، أن لها تركيباً داخلياً في تجارب التشتت عند قيم من الطاقات العالية. وقد قيس الآن تأثيرات البروتونات والنيوترونات. وبعد ذلك بكثير، عاودت قصة التشتت الخلفي لرنرפורد الظهور وظهرت معها مكونات الكواركات كتركيب داخلي للنويدات (النيوكلونات) على الساحة.

لقد قدمت تجارب التشتت لفيزياء الجسيمات مفهوم الجسيمات الجديدة. إن الجسيم هو "مركز تشتت" داخل الذرة في عرف نظرية التشتت وما يرتبط بها من طرق قياس. ويكون معنى "الذرة" هنا هو ذرات داخل حيز مادي ماكروسكوبي قد تكون في الحالة الصلبة لهدف ثابت كما هو في الرقيقة الذهبية في تجربة "رنرפורد" أو في خزان مملوء بالهيدروجين السائل كما

فى تجربة الغرفة الفقاعية أو واحدة من الكشافات الكبيرة ذات الهدف الثابت فى تجارب السبعينيات وما تلاها. وهذا المفهوم للجسيمات الجديدة يأتى مناظرًا للفضاء الكونى. إن مركز التشتيت قد يكون نقطيًا أو غير نقطى. فالجسيمات النقطية تعمل فى تجربة تشتت عمل الشحنة النقطية بينما يعمل التركيب اللانقطى عمل توزيع شحنى ممتد.

إن مفهوم الجسيمات الجديدة عبارة عن نظرية مُحملة. فهو مبنى على نظرية تشتت تقليدية وميكانيكية كمية. إنه يأتى من وصف رذرفورد التقليدى لتشتت "كولوم" على نواة الذرة، كما يأتى من تعميمها الكمى النظرى. ويمكن صياغته، حقًا، بطريقة نموذجية مستقلة. وتحت ظروف تجريبية محددة فهو يقابل اعتبارًا تقليديًا لمركز تشتت. ومن ثم فقد يفيد فى تفسير البنية الذرية التحتية بمصطلحات شبه تقليدية. وفيما يلى سوف يتبين كيف أن المفهوم النقطى واللانقطى لمركز تشتت يرتبط بالمفهوم غير الصورى للجسيم فى الفصل السابق. والسؤالان الآتيان: كيف يتسق المفهوم السببى والكل - جزئى مع تحليلات تجربة تشتت؟ هل مركز التشتيت بالتركيب النقطى أو اللانقطى قد تم رصده فى معنى مفهومنا العام فى الفقرة (5-2)؟ يعتبران سؤالين فاصلين عند فهم الحديث المعتاد الشائع لمشاهدة البنية الذرية التحتية لمادة بواسطة ميكروسكوب إلكترونى أو معجل جسيمات. فإلى أى مدى وبأى معنى يمكن أن تقارن تجارب التشتت بالملاحظات الماكروسكوبية؟ هناك اعتباران نموذجيان عند بحث البنية الذرية التحتية:

أ- لقد أثبتت تجارب التشتت فى معامل "رذرفورد" أنها طرق تجريبية إرشادية عند بحث البنية الذرية التحتية.

ب- لقد أثبتت الفروض التقليدية حول مركز التشتيت النقطة التي ساق تحتها "رذرفورد" معادلته للتشتت، بشكل مذهل، أنها مقاومة للتحويل من الفيزياء الكلاسيكية إلى ميكانيكا الكم؛ إذ إن هذه الفروض من الممكن أن تكون كامنة في نظرية التشتت لميكانيكا الكم. فمع هذه النظرية تتقل هذه الفروض بكفاءة أدوات لوصف تشتت الجسيمات المشحونة عند الذرات وكذلك لتفسير مراكز تشتت البنية الذرية التحتية.

وطبقاً لنموذج "رذرفورد" للتشتت، يفسر تركيب مركز تشتت بدلالة الطول. واعتماداً على نتائج تجربة تشتت، المسمى المقطع المقاس الفعلي، يصف الفرد مركز التشتيت الممتد أو شبه النقطة^(١). وبهذه الطريقة يمد الفرد مقياس الطول إلى نطاق التركيبات غير المرئية بهدف جعل الولوج إليها ممكناً. وطالما لا توجد حيل فيزيائية لبلوغ هذا النطاق، تؤدي الطرق المشجعة فقط إلى المعلومات حول تركيب المادة على هذا المقياس. فهي تمضي قدماً بالنماذج المألوفة على نحو وبعبارات ما وراء الفيزياء على نحو آخر^(٢). وبذلك تبنى الجسور بين النظريات غير القابلة للقياس مثل الميكانيكا النقطية التقليدية وميكانيكا الكم. إنها نموذج الفيزياء الراهنة في أن المعابر الأساسية ممتدة بالفعل في تكوين النظرية وبناء النموذج. إنها تختبر هنا نظرية قياس تركز على تشتت "رذرفورد" التي تؤدي إلى كشف هوية الجسيمات والتركيبات المجهرية لمراكز التشتت. إن التساولين الآتيين فاصلان:

(١) انظر الملحق (ج).

(٢) انظر الملحق (ب).

إلى أى مدى تخضع نظرية القياس هذه لنموذج؟ إلى أى مدى يمكن أن يزال الخضوع لنموذج بالتعميمات؟ إن من الواضح أن خضوع نظرية القياس لنموذج يؤثر أيضاً فى التركيب النظرى للظاهرة. إن النموذج هنا هو الوصف المحدد لنظام فيزيائى لنظرية معينة. وبهذا المفهوم يتحدث الفيزيائيون عن الخضوع لنموذج بينما يلحون إلى وصف أعم مبنى على ما وراء الاعتبارات النظرية كعدم الخضوع لنموذج.

ومن باب جدل الواقعية، فإن علينا أن نقول: إن نظرية قياس تجارب التشتت التى تسبر أغوار تركيب الذرة يتمخض عنها بناء تحت ذرى تقليدى واقعى. ولكن نظرية الكم تخبرنا بأن صورة البناء التقليدى للمادة لم تعد تعمل. ففى إطار نظرية الكم، يتبين لنا أن بنية ما دون الذرة شبه تقليدى. والفحص الأقرب يبين لنا أن نموذجها قد صمم كما لو كان مركز التشتت هو توزيع شحنى تقليدى. ومن ثم، فأين الحدود الفاصلة بين النطاقين التقليدى والكمى؟ وأين بالتحديد تسقط؟ وإلى أى مدى تحوى تجارب التشتت أى نموذج مستقل أو بناء واضح المعالم لواقعية ما دون الذرة؟

وللإجابة عن هذه الأسئلة نمضى كما يلي:

نبدأ ببعض تجارب التشتت النموذجية لفيزياء الجسيمات ونظريات قياسها التى تم شرحها فى الفقرة (٤-١) ثم يتم تقديم مفهوم ما وراء النظرية وهو مفهوم "لا متغيرة" المقياس. فإن "لا متغيرة" المقياس هو تماثل. إنه "لا متغيرة" مقطع مقياس عند مقياس متحول. فمن حيث التماثل، فهو مرشح جيد لمفهوم النموذج المستقل. على أى حال، هذا الموضوع لا يرقى إلى حد اليقين. فالمقياس الثابت يدخل تحليل بيانات تجارب التشتت من خلال التحليل البعدى، فى حين أن التحليل البعدى هو نهج كشفى يعتمد بدوره على بناء

شبه تقليدي لمقاييس الكميات الفيزيائية فقرة (٤-٢). إن التحليل البعدي و"لا متغيرة" المقياس يؤديان إلى المظهر النقطي. ذلك مفهوم فراغى لا يمكن تعميمه طواعية ليدخل فى نطاق نظرية الكم النسبية فقرة (٤-٣). إن مفهوم المظهر النقطي يؤدى أخيراً إلى تعريف "معامل الشكل" الذى يصف أبنية المظهر اللانقطى، ويجب تحليل تعريفاتهم بعناية فى النطاقين النسبى وغير النسبى الفقرتان (٤-٣-١، و٤-٣-٢). إن البناء شبه التقليدى لبنية ما دون الذرة قد بنى على سلسلة من نماذج تقابل تشنت "رذرفورد" التقليدى ووصف التشنت بمصطلحات التوزيع الشحنى التقليدى. هذا التقابل (ومعه أى بناء شبه تقليدى لواقعية ما دون الذرة) يهدم بالتتابع تجربة تشنت ذات الطاقة الأكبر فالأكبر، والأصغر سبراً لغور التركيب فقرة (٤-٤). إن علينا أن نعتقد أن تجارب التشنت تؤدى إلى تفسير شبه تقليدى لواقعية ما دون الذرة، بالقدر الذى نهمل به التأثير النوعى لنظرية الكم النسبية. وفى النطاق غير النسبى، تكون "معاملات الشكل" هى الملاذ للواقعية غير المثيرة للمشاكل. ويدعم هذا الزعم تشابهاً بين تجارب التشنت والميكروسكوب الإلكتروني فقرة (٤-٥). فالتشابه يدعم مجاز النظر الأعمق فالأعمق داخل الذرة بواسطة معجلات الجسيمات. ويناقش هذا المجاز أخيراً بمصطلحات المفهوم العام للمشاهدات المطورة فى الباب الثانى فقرة (٤-٦).

٤-١ تجارب التشنت

إن تجارب التشنت بسيطة. ففى التجارب ذات الطاقة المنخفضة، يتم إرسال الإشعاعات فى صورة حزمة ضيقة تجاه هدف ما. وقد تكونت تجارب "رذرفورد" لتشنت من جسيمات "ألفا". وقد استغرق "رذرفورد" عشر

سنوات ليحدد كتلة وشحنة جسيم ألفا. وبمجرد أن أصبحت حقيقة مادية ثابتة، بدأ مساعد "رنر فوردر" وهو "جيجر" استخدامها في إجراء تجارب التشتت^(١)؛ حيث كان المصدر هو خيط الراديوم وكان المشتت رقيقة من الألومنيوم أو الذهب. ولقد كان كشف جسيمات ألفا فرادى بواسطة طريقة عداد "كروكس" الوميضى التي تم توصيفها في الفقرة (٣-٣). ولقد كانت الدهشة الكبرى لكل من "جيجر" و"مارزدن" أن يجدا تشتتاً خلفياً بدرجة أكبر من ٩. درجة. وبعد ذلك بسنين عديدة وصف "رنر فوردر" هذا الكشف غير المتوقع في محاضرة كما يلي:

"لقد كان ما حدث أكثر ما شهدته في حياتي من إعجاز على الإطلاق. فالأمر في إعجازه يشبه أن تطلق قذيفة سمكها ١٥ بوصة نحو قطعة من ورق المناديل الورقية لترتد إليك لتصدمك"^(٢).

من الجلي أن هذا الكشف كان عن طريق الصدفة. ليس فقط في إمكانية حدوثه بصورة مختلفة؛ بل في أنه كان متوقع الحدوث ليس إلا. فسي الحقيقة، كانت طريقة القياس مستقلة النموذج فيما يتعلق ببنية ما دون الذرة لرقيقة الذهب. لقد اعتمدت فقط على خلفية المعلومات حول طبيعة جسيمات ألفا وطريقة "كروكس" الوميضية؛ حيث كانت المعلومة الأولى مؤكدة باستقلال من العقد السابق لذلك الوقت بينما تولد عن الثانية مشاهدة تجريبية في إحساس صارم. ثم جاءت حسابات نظرية التشتت بعد ذلك فقط. ولقد استفذ "رنر فوردر" سنتين يحسب احتمال التشتت الخلفي في نظريات ذرية

(١) انظر Pais 1986 ص ٦٠-٦٢ وص ١٨٨-١٩٠.

(٢) نقلا عن المرجع: Andrade 1964, 111.

متعددة. (وهو يمضى الآن طبقاً لنموذج افتراضى استنتاجى لتكوين النظرية. هو لم يوجه كلام من "جيجر" و"مارزدن" نحو قياس المقطع التفاضلى لجسيمات ألفا بما يمكن تحديداً وشمولاً، بهدف أن يسوق بأسلوب حث نظرية توزيع شحنى داخل الذرة. فأنتهى حساباته أولاً. ثم طلب من "جيجر" و"مارزدن" أن يختبرا معادلته للتشتت). ولم يستطع التوزيع المتجانس للشحنة فى نموذج "طومسون" للذرة أن يفسر اكتشاف "جيجر" و"مارزدن". ثم استنتج معادلته للتشتت أخيراً من نموذج ذرى بشحنة شبه نقطية وصفت بجهد "كولوم". فى هذا الوقت استطاع أن يفسر التشتت الخلفى. فطبقاً للنموذج، فإن المقطع التفاضلى ($d\sigma/d\theta$) يعتمد على $[\sin^4(\theta/2)]$ لزواية تشتت θ . فالمعادلة تتنبأ باحتمال تشتت زاوى كبير؛ حيث تم التأكيد على تنبؤ هذه المعادلة بتجارب تشتت تالية قامت بقياس التوزيع الزاوى لجسيمات ألفا المتناثرة، باستخدام طرق القياس المستخدمة نفسها من قبل^(١).

لقد بدأت تجارب التشتت فى معجلات الجسيمات فى الخمسينيات (من القرن العشرين). ففى المعجل يتم تعجيل الجسيمات المشحونة (الإلكترونات،

(١) المرجع ٣ و 1971 Trigg الباب الثانى . فقد أدخل "رذرفورد" حدًا إضافيًا للوقاية بالإلكترونات التى اتضح أنها مهمة. ولجهد "كولوم" ، فالحسابات موجودة فى كتب دراسة للفيزياء النووية. وبالتأكيد، كان لـ"رذرفورد" حسن حظ فى تنبئه. لقد أجرى "جيجر ومارزدن" تجربتهما للتشتت عند طاقة منخفض لجسيمات ألفا عند طاقة تبلغ ٥ ملايين إلكترون فولت. لقد كانت التجارب غير حساسة للانحرافات عن معادلة "رذرفورد" بسبب التفاعلات القوية بين جسيمات ألفا ونواة الذهب، ولا لآى تأثيرات كم ميكانيكية. ولجهد "كولوم" فقط فميكانيكا الكم لنتائج التشتت تنتج المعادلة نفسها، انظر (الفقرة ٤-٣-١).

بروتونات أو أيونات ثقيلة) بواسطة مجال كهربى أو مغناطيسى أو كلاهما حتى قيمة محددة من الطاقة أو كمية الحركة.

وقد كان أول معجل جسيمات هو "السيكلترون" الذى صممه "لورنس" عام ١٩٢٩؛ حيث بدأت السيكلترونات الأولى العمل عام ١٩٣٠. وكان لأول ماكينة أقطاب مغناطيسية ذات قطر ١٠ سم. وكانت العلامة الفارقة الثانية نموذج البوصات التسع؛ حيث عجلت بروتونات لأعلى من مليون إلكترون فولت^(١) وبعد الحرب العالمية الثانية بدأ عصر الماكينات الضخمة. فقد ازداد حجم الماكينات بغية رفع طاقة وابل الجسيمات.

وقد بنى أول سينكروترون فى الخمسينيات من القرن العشرين؛ حيث عجلت جسيمات تراوحت طاقاتها من ١ الى ١٠ بلايين إلكترون - فولت، وصلت الى ٥٠٠ بليون إلكترون - فولت فى السبعينيات^(٢). وفى الوقت الحالى تعجل الماكينات جسيمات تصل من ١ الى ١٠ تريليونات إلكترون - فولت.

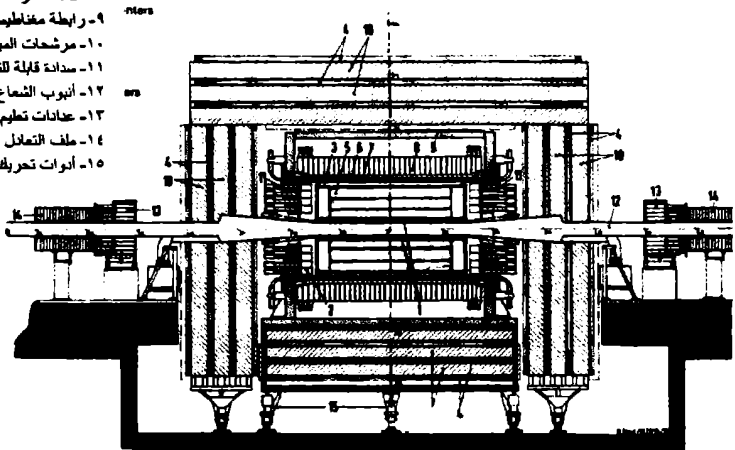
فى تجارب التشتت، تأتى الجسيمات محددة الطاقة من المعجلات. وفى تجارب الهدف الثابت، يوجه الواابل نحو كتلة المادة التى يحدث عندها التشتت. ويتم تتبع الجسيمات المشتتة إما بالهدف ذاته كما فى حالة غرفة الفقاعة التى ظهرت على يد "جلاسر" عام ١٩٥٢، أو عن طريق تزويد الهدف بكشافات متطورة كالوامضات ومضاعفات الفوتونات وغرف الشرارة وغرف الانجراف وعداد "شيرينكوف" وغيرهم. هذه الأنواع الجديدة من

(١) المرجع ٣ ص ٤٠٨.

(٢) المرجع ٣ ص ٤٧٥ - ٤٧٨.

كشافات الجسيمات جعلت تجارب المصادمات أمراً ممكناً. ففي تجربة مصادم، يتقاطع وإبلان من الجسيمات في منطقة تفاعل ثم تتشتت عن بعضها. ويتم تسجيل الجسيمات المشتتة بواسطة كاشفات تحيط بمنطقة التفاعل بشكل كامل قدر الإمكان، حتى تشمل كل تفاعلات الجسيمات خلال زاوية فراغية كبيرة بقدر الإمكان. والفكرة التي تكمن وراء تصميم تجارب المصادم هي، للمرة الثانية، لزيادة طاقة التشتت. فالهدف الثابت يكون في وضع السكون طبقاً لمحاور إسناد المعمل، بينما في المصادم يرغم وإبلان نوي طاقتين عاليتين يسيران في اتجاهين متعاكسين على التصادم. وبالتالي تكون طاقة التصادم في نظام مركز الكتلة، أعلى بكثير.

- ١- عدادات أنبوب الشعاع
- ٢- عدادات سداة الرصاص-الزجاج
- ٣- صهريج ضغط
- ٤- غرف الميون
- ٥- غرف نفقة
- ٦- عدادات زمن الطيران
- ٧- ملف
- ٨- عدادات الرصاص-الزجاج المركزية
- ٩- رابطة مغناطيسية
- ١٠- مرشحات الميون
- ١١- سداة قابلة للتحرك
- ١٢- أنبوب الشعاع
- ١٣- عدادات تعليم
- ١٤- ملف التصادم
- ١٥- أدوات تحريك



الشكل (٤-١). تجربة "كولدر"، الكشاف JADE لقياس تصادم الإلكترون والبوزيترون من DESY (المرجع Perkins 1987)

لماذا صنعت الماكينات أضخم وأضخم للوصول إلى طاقات أعلى وأعلى؟ إن السبب الكامن وراء ذلك بسيط. إنه يقول: إنه كلما ارتفعت طاقة وابل الجسيمات تحسن معها التمييز الفراغى لتجربة التشتت وبالتالي يصغر التركيب الفراغى الذى يمكن مشاهدته. والفكرة الأساسية التى تكمن وراء ذلك الموجة المُساعد تتبع من ميكانيكا الكم. ففي ميكانيكا الكم للتشتت، يوصف الوابل بدالة موجية Ψ . والجسيمات داخل الوابل المسماة الجسيمات المسبارة لها كمية حركة p . وطبقاً لميكانيكا الكم، تقابل كمية الحركة هذه طولاً موجياً $(\lambda = \frac{h}{p})$ طبقاً لمعادلة "دى برولى". وبزيادة طاقة وابل الجسيمات أو كمية حركته يقل الطول الموجى للجسيمات المسبارة لأغوار المادة. ولكن كلما صغر الطول الموجى للإشعاعات لجهاز مشاهدة، صغرت معه التركيبات التى يمكن مشاهدتها. والخلفية النظرية لهذا المبدأ هى محاكاة معادلات الموجة فى ميكانيكا الكم والبصريات أو معجل الجسيم والميكروسكوب^(١). على أى الأحوال، معجلات الجسيمات كبيرة. فهى تعجل الجسيمات المشحونة بجعلها تمر خلال مجالات كهربية ومغناطيسية ماكروسكوبية عبر مسافات ماكروسكوبية كبيرة. ومن ثم يتم التعجيل طبقاً لقوانين الميكانيكا الكلاسيكية والديناميكا الكهربائية. وعلى النقيض الواضح بالنسبة إلى الإلكترونات داخل الذرة (ذات الوضع الكمى الثابت)، فإن الوابل الماكروسكوبى الدوار المكون من جسيمات مشحونة يطلق أشعة سينكروترونية. وعلى الرغم من أن الوابل ينتج ويستخرج من المعجل طبقاً لقوانين الفيزياء الكلاسيكية، فإن التشتت يوصف من خلال ميكانيكا الكم.

(١) انظر فقرة (٤-٤).

فطبقاً لميكانيكا الكمّ يجهز الوابل في وضع كمّ حركى. هذا الوضع الكمّ حركى يقابل الموجة المستوية. وطبقاً لميكانيكا الكمّ للتشتت، يتمّ حيود الموجة بالتشتت. ومن هنا وبالموجه المساعد المشار إليه سابقاً، يأتي دور طول "دى برولى" الموجى إلى دوره فى اللعبة. على أية حال، يتمّ بعد ذلك رصد الجسيمات المشتتة أو آثار مساراتها. وطبقاً للتفسير الاحتمالى المعتاد لميكانيكا الكمّ، فإن احتمال تشتت الجسيمات ذات حالة معينة تقابل مربع السعة $|\Psi|^2$ للموجة الحادثة. ويقابل هذا، من وجهة النظر التجريبية، احتمال التكرار النسبى لرصد جسيم من نوع معين، لعدد كبير من تفاعلات الجسيمات أو حالات التشتت^(١).

ويمضى تحليل البيانات لتجربة تشتت طبقاً للخطوات السابق بيانها فى الفقرة (٣-٣). ثم يتمّ قياس المواضع؛ حيث تقود إلى آثار مسارات الجسيمات. ويتمّ تفسير آثار مسارات الجسيمات بدلالة حالات التشتت. فى الوقت الحالى يتمّ تسجيل قياسات المواضع بواسطة أجهزة إلكترونية ثم يتمّ إعادة تركيب آثار مسارات الجسيمات ووقائع التشتت من خلال برامج كمبيوتر. ويتمّ تحليل آثار مسارات الجسيمات ووقائع التشتت من حيث الكتلة والشحنة وكمية الحركة وغيرها من الكميات الحركية. إن تحليل آثار مسارات الجسيمات هو عبء نظرى. على أي حال، فالخلفية المعلوماتية الموثقة وما وراء الفروض النظرية المتعلقة بوحدة الفيزياء فقط هما الجائزان

(١) طبقاً للتعريفات المعتادة للاحتمال، فاحتمال حدث يقابل تجريبياً التكرار النسبى لهذا الحدث فى نهاية أحداث كثيرة لا نهائية. انظر الملحق (ج).

هنا^(١). وتؤخذ في الاعتبار أعداد التفاعلات ذات النمط المعين. وفي تحليل بيانات تجربة تشتت ذات طاقة عالية تستخدم أسس علم الحركة المجردة النسبية. وتوصف تفاعلات التشتت بالكميات الثابتة النسبوية، مثل كمية الحركة المنقلة الرباعية q^2 . وأخيراً، ومن العدد النسبي لتفاعلات التشتت ذات كمية حركة معينة، يتم تحديد المقطع التفاضلي أو المقطع الكلي لتفاعل جسيم معين. وتستخدم الطرق الإحصائية القياسية لتحديد نسبة الخطأ في القياسات.

وفي النهاية، تقدم نتائج القياسات في صورة جدول أعداد للمقطع التفاضلي أو للمقطع الكلي لتفاعل جسيم معين، كدالة في كميات الحركة المجردة لتفاعلات التشتت.

إن مقطع عملية تشتت هو الكمية التي تتقابل عندها التجربة مع نظرية الكم. وعلى العكس، ففي المقطع التفاضلي والكلي لتفاعلات معينة لعمليات التشتت هي التي تهبط فيها نظريات المجال الكمي الحالية إلى الأرض. وبحسب مقطع تفاعل جسيم من مصفوفة S لحدّ التفاعل في نظرية المجال الكمي. فالمصفوفة S تعطى الاحتمالات الانتقالية من حالات كمية ابتدائية إلى حالات كمية نهائية. وتمثل الحالات الكمية الابتدائية الجسيمات القادمة في تجربة تشتت بمعنى وابل الجسيمات وأنوية الهدف. بينما تمثل الحالات الكمية النهائية الموجات الحادثة الناتجة أو الجسيمات المشتتة التي تم رصدها. فمصفوفة S تصف التشتت بالمعنى الإجرائي في ميكانيكا مصفوفات "هايزنبرج". إنها تعطى الاحتمالات الانتقالية التي تقابل التكرارات النسبية

(١) يتم بحث طريقة القياس في الفقرة (٥-٣).

القابلة للقياس. على أنها تتعامل مع التشتت كما لو كان صندوقاً أسود. أما ما يجرى داخل الصندوق الأسود، أى أثناء التشتت، فهو ما تبينه أشكال "فينمان". وهى ليس لها معنى حرفيُّ بأى حال. إنها أمثلة لأيقونات بسيطة فى امتداد الاضطراب فى نظرية مجال الكم. إنها تجعل الحسابات أيسر ولكنها لا تمثل عمليات فيزيائية منفردة^(١).

هنا، تتبنى نظريات مجال الكم الكهروديناميكا الكمّية نظرية "سلام - وينبرج" للتفاعلات الكهربائية الضعيفة والتفاعلات القوية الحالية أى الكروموديناميكا فهى تجمل النموذج القياسى الحالى لفيزياء الجسيمات. وطبقاً لذلك، فهناك ثلاثة أنواع من اللبتونات (الإلكترون والميون والميزون تاو وما يقابلهم من نيوترينوات) والكواركات (فوق وتحت وشاذ وفانتن وقاع وقمة) التى تختلف فى الكتلة وما يقابلها من الاثنى عشر من جسيمات مضادة، الفوتونات التبادلية والتفاعلات الكهربائية الضعيفة والتفاعلات القوية (γ و W^\pm و W وثمانية جلونات (غرويات) وبوزون "هجز"^(٢)). ويتنبأ النموذج العيارى

(١) المصنوفة S معناها مصنوفة التشتت. وقد تمت الحسابات طبقاً لنظرية الكم للتشتت. ويتم حسابها عادة طبقاً لتقريب "بورن" أى طبقاً لأقل المراتب من نظرية الاضطراب. ولقياسات أكثر تحديداً، تؤخذ فى الاعتبار مراتب أعلى من التصويبات. وتقابل رسومات "فينمان" البيانية تماماً الحدود الرياضية التى تصف تراكيب تأثيرات نظرية الكم على التفاعل. انظر المراجع:

Brown & Hare 1988., Falkenburg 2002a., & Fox 2006.

(٢) لم يتم إيجاد الأخير حتى الآن، ولكن فى كل التصييلات الأخرى قد تم تأكيد النموذج العيارى. وقد فشلت كل محاولات تزييفه. والنتيجة الوحيدة فى الخمس والعشرين عاماً الماضية هى الاكتشاف الحديث لترددات النيوترينو.

بالكثير من التفاصيل فيما يتعلق بالمقاطع المقاسة في تجارب التشتت. وعلى وجه التحديد تتنبأ بالرنينيات وانتهاكات "الندية" - الشحنة في الانحلال الضعيفة للكيونات وغيرها من الحالات غير المستقرة من الكواركات المقيدة. على أي حال، فقد تم الانفكاك عندما كشفت تجارب التشتت للإلكترونات والميونات عن السلوك التدريجي الذي سيشرح الآن.

٤-٢ تشتت "رذرفورد" والمقياس غير المتغير

دعنا الآن نأخذ نظرة أكثر قريباً لنموذج "رذرفورد" التقليدي لعملية التشتت. فالشحنة شبه النقطية ذات الكتلة m والسرعة الثابتة v وكمية الحركة mv وطاقة الحركة $\frac{1}{2}(mv^2)$ تتفاعل مع جهد كهروستاتيكي مركزي $v(r)$. وهذا الجهد من الممكن أن يتولد عن توزيع شحني ممتد $\rho(r)$ أو شحنة نقطية. فالأول يقابل نموذج "طومسون" للذرة وهو لا يمكن أن يفسر الارتداد الخلفي لجسيمات ألفا. والثاني يوصف بجهد "كولوم" $v(r)=\pm Ze/r$ ، حيث Ze هي شحنة نواة الذرة ذات العدد الذري Z بوحدات شحنة الإلكترون e و r هي المسافة بين الجسيم المشتت ونواة الذرة. فالجسيم المشتت يتبع مساراً تقليدياً. والتشتت هو انحراف المسار طبقاً لقانون "نيوتن" للقوة. والمسار الناتج هو قطع زائد. وهو يقابل حلاً تقاربياً من معادلة الحركة. والنموذج يقابل قضية "كلر" الشهيرة لحركة الكواكب التي تنطبق على الأجرام السماوية غير المقيدة كالمذنبات. فالشهاب التي تتبع مسار القطع الزائدي تظهر مرة واحدة في المجموعة الشمسية. وبعد التشتت ينحرف الجسيم بزاوية θ . والمسافة الصغرى بين الجسيم ومركز التشتت هو "معلمة

الصدمة" التقليدية b. في هذا النموذج التقليدي، قام "زرفورد" بحساب التوزيع الزاوي للجسيمات المشتتة في معادلته الشهيرة للمقطع:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{c^2}{16E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (4.1)$$

وأبعاد المقطع التفاضلي $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ هي أبعاد مساحة. وهي مقياس لعدد الجسيمات التي تشتتت في نطاق زاوية θ . ويميز هذا المقدار أنه لا يؤول إلى الصفر لزاويا التشتت الكبيرة ($\theta > 90^\circ$). بمعنى أنه يقرّ بوجود الارتداد الخلفي الذي تمت مشاهدته في تشتت جسيمات ألفا على رقيقة ذهب. ويمكن الحصول على الثابت C من عدد الشحنة Z و Z' للجسيمات المسبارة ونواة الذرة، والثابتين \hbar و c والثابت القارن α للتفاعل الكهرومغناطيسي الذي يمكن الحصول عليه من الشحنة الكهربائية الأولية e طبقاً للعلاقة $c\alpha = e^2/\hbar$.

ولمعادلة "زرفورد" ملمحان أساسيان: أولهما؛ التشتت الخلفي الذي شاهده "جيجر" و"مارزدن" في معمل "زرفورد". وثانيهما؛ "التدرج الثابت" للكمية عديمة الأبعاد المستنتجة من معادلة "زرفورد". فالملمح الأول ذائع الصيت؛ إذ قاد إلى وجود نواة للذرة. أما الملمح الثاني فهو أقل شهرة. فقد تولد عنه تشابه نظري مهم لمعادلة "زرفورد" بعد ستين عامًا حينما سبرت تجارب التشتت تركيب النواة ودعت الحاجة إلى تفسير البروتون والنيوترون. إنها صفة "ثابت أساسي" في نموذج "زرفورد" لتشتت يدعى "التدرج اللا متغير".

(١) انظر الملحق (ج-).

إن التدرج الثابت هو تماثل. فهو "لا متغيرة" كمية عديمة الأبعاد تحت تدرج متحول. ففيما يتعلق بالمقطع التفاضلي أو الكلى⁽¹⁾؛ هو يعنى أن الكمية عديمة الأبعاد التي يتم الحصول عليها بضربها بكميات فيزيائية مناسبة هي ثابتة تحت تحويل تدرجي الطول والطاقة. والمقطع التفاضلي والكلى لهما أبعاد فيزيائية، هي المساحة. فإذا لم تعتمد الكمية عديمة الأبعاد التي تم الحصول عليها من مقطع مقياس على الطول، فسيعتقد الفرد أن مركز التشتيت والجسيمات المسبارة لا تركيب لها، أو نقطية. إن النقطية تعنى أن الجسيمات المسبارة عديمة التركيب تتفاعل مع مركز تشتيت عديم الحجم. دعنا الآن نرى كيف يرتبط مفهوم النقطية والتدرج الثابت في نموذج "رذرفورد" التقليدي لتشتت جسيم مشحون نقطى على مركز تشتيت نقطى.

حيث إن: $ZZ' \alpha^2 \hbar^2 c^2 =$ فيمكن كتابة المعادلة (4-1) كما يلي:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \left(\frac{\hbar c}{E}\right)^2 \frac{(ZZ' \alpha)^2}{16 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (4-2)$$

وكالمقطع، فالكمية $\left(\frac{\hbar c}{E}\right)^2$ لها أبعاد مساحة. وبضرب $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ في

نحصل على الكمية عديمة الأبعاد الآتية: $\left(\frac{E}{\hbar c}\right)^2$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \left(\frac{E}{\hbar c}\right)^2 = \frac{(ZZ' \alpha)^2}{16 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (4-3)$$

(1) يتم تكامل المقطع الكلى على كل اتجاهات الفراغ؛ أى على زاوية فراغية θ ط .

هنا، تم جعل المقطع التفاضلى عديم الأبعاد بضربه فى $\left(\frac{hc}{E}\right)^2$. هذه الكمية عديمة الأبعاد لم تعد تعتمد على الطول أو الطاقة أو كميات أخرى ذات أبعاد. إنها تعتمد فقط على الأعداد Z و Z وعلى زاوية التشتت θ . وحقيقة أنها لا تعتمد على أى مقدار له أبعاد طول هى فى "لا متغيرة" مقياسها. وهذا يعنى أن مقدارها ثابت عند تحويلات مقياس الطول. وفى الوقت نفسه فمقدارها ثابت عند الطاقة لتجربة تشتت. إنها تبقى كما هى بغض النظر عن ارتفاع أو انخفاض الطاقة التى أجرى عندها القياس.

إن مفهوم "لا متغيرة" المقياس لا يجب أن يختلط مع "اللا متغيرة" العادى لمقياس الكميات الفيزيائية وقوانين الفيزياء عند الاختيار الحر للوحدة التى يصاغ بها المقدار. فالفيزيائيون يعتقدون أن قوانين الطبيعة تبقى كما هى سواء قُترت بوحدات "سم - جرام - ث" أو بوحدات مقياس "بلانك". فإن "لا متغيرة" المقياس يجب أن تميّز عن "لا متغيرة" الأبعاد هذا. هذا أمر يتعلق بالفيزياء، فبالفهم المخالف، فإن "لا متغيرة" الأبعاد أمر تقليدى. إن اختيار وحدات الطول والزمن والكتلة ودرجة الحرارة المستخدمة فى قوانين الفيزياء اختيارية، بينما يكون المقياس الثابت ليس اختيارياً بأي حال. فمن ناحية أخرى قد يكون دالاً على تركيب داخلى (تحتى) لمركز التشتت المسبور. إن "لا متغيرة" المقياس هى مجرد خاصية لبعض ظواهر التشتت فى فيزياء الجسيمات، أو فى قوانين الفيزياء التى تصفهم. أما "لا متغيرة" الأبعاد فهى من المتوقع أن تكون صالحة لكل قوانين الفيزياء. إنها تظهر اتفاق الفيزياء فيما يتعلق بالكميات الفيزيائية. فالكميات التى تقيس خصائص نظم فيزيائية من المتوقع أن تكون من النوع نفسه على المقاييسين الكبير والصغير.

إن "لا متغيرة" الأبعاد ينبثق عنها تحليل نظم ونماذج معينة. فهي تجادل الخصائص الجبرية لقوانين ونماذج الفيزياء^(١). هذه الخصائص الجبرية يعبر عنها بدلالة الأبعاد: طول [L]، زمن [T]، وكتلة [M] أو مزيج من هؤلاء. إنها استدلال من الأبعاد التي تميز ظاهرة فيزيائية إلى الأبعاد التي تدعو الحاجة إليها لوصف سببها والعكس صحيح. فى حالة تشتت "ذر فوررد"، تكون الظاهرة هى معادلة "ذر فوررد" ويكون سببها الشحنة النقطية أو جهد "كولوم". والظاهرة لها أبعاد المساحة، L^2 . وكمية عديمة الأبعاد تأتي منها بالضرب فى $(E/\hbar c)^2$ التى يتبين أن لها الأبعاد L^{-2} . والكمية عديمة الأبعاد التى يتم الحصول عليها بهذه الطريقة لا تعتمد على أى طول ولا على طاقة التشتت للجسيمات المسبارة^(٢).

و"لا متغيرة" المقياس هى بالتحديد تلك الخاصية الأساسية من الاستقلالية عن الطول وطاقة التشتت. إنها خاصة أساسية لمقطع "ذر فوررد". فالكمية عديمة الأبعاد التى نتجت من مقطع "ذر فوررد" تعتمد فقط على الزاوية θ . والمقطع التفاضلى الذى تم حسابه من شحنة لا نقطية تقليدية ليس لها هذه الخاصية الأساسية. وإذا تم جعلها عديمة الأبعاد بضربها فى $(E/\hbar c)^2$ فالكمية التى نحصل عليها لا تعتمد فقط على θ . وتحليل الأبعاد يظهر بالإضافة إلى احتوائه على معامل عديم الأبعاد يتغير بتغير طاقة

-
- (١) إنها مبنية على النظرية المسماة π . انظر الملحق (ب). والتركيب الجبرى الذى يكمن وراء التحليل البعدى قد تم بحثه فى المرجع Carnap 1947 الباب العاشر.
- (٢) للتفاصيل انظر الملحقين (ب) و(د).

الحركة E ويعتمد على الطول الكامن، R، الذى يجب أن يرجع إلى مركز التشتيت أو الجسيمات المسبارة^(١).

طبقاً لهذا المنطق، فإن الكمية عديمة الأبعاد الناتجة من مقطع مقياس يبين ما إذا كانت الجسيمات المشتتة نقطية أم لا. ففي حالة الجسيمات المسبارة النقطية، فإن "لا متغيرة" المقياس تبين مركز تشتيت نقطى. بينما يبين انتهاك المقياس مركز تشتيت لا نقطى. إن "لا متغيرة" المقياس للمقطع عديم الأبعاد ونقطية الجسيمات المشتتة مترادفان. ففي نموذج تشتت "رذرفورد" التقليدى تكون "لا متغيرة" مقياس المقطع عديم الأبعاد هى شرط لازم وكاف لنقطية الجسيمات المسبارة ومركز التشتيت. إن الجسيمات المشتتة تتفاعل بنمط نقطى فقط إذا كانت الكمية الناتجة من المقطع التفاضلى المقياس طبقاً للمعادلة (٣-٤) لا تعتمد على طاقة التشتت.

في إطار تفسير الموجه المُساعد "لا متغيرة" المقياس، يميل الفيزيائيون إلى القول: إن الجسيمات المسبارة لا ترى أى تركيب فراغى عند طاقة تشتت معينة. وبمنهج أكثر إحكاماً، فعلى الفرد أن يقرّ بأنه فى حالة "لا متغيرة" المقياس فالمقطع المقياس ليس له أى أثر يمكن تعليقه بوجود مركز تشتيت لا نقطى. على أي حال، هذا النهج مبنى على الكثير من المعالجات المثالية. وبالطبع فإن التكافؤ بين "لا متغيرة" المقياس للمقطع ونقطية جسيمات التشتيت ممكن بذلك. فهو يصلح فقط فى نموذج لا يأخذ فى اعتباره عوامل أخرى ذات صلة بالتشتت قد تسبب انتهاكاً للمقياس أو ما شابه، فضلاً عن صلاحيتها فقط فى نموذج "رذرفورد" التقليدى للتشتت. إن كل التفكير الذى تم تصويره أعلاه قائم على مقياس تقليدى لكميات فيزيائية. وعلى الفرد

(١) انظر الملحق (-).

أن يسأل كيف أن طريقة تحليل الأبعاد ومفهوم "لا متغيرة" المقياس أو النقطية يمكن تمديدها إلى ميكانيكا الكم للتشتت.

٤-٣ شبيه النقطية في النطاق الكمي

في نهاية الستينيات من القرن العشرين تم تعميم مفهوم "لا متغيرة" المقياس ليشمل عمليات التشتت في فيزياء الجسيمات في الطاقة العالية. ففي النموذج التقليدي، مسموح في الواقع بالولوج من المقطع المقاس إلى التركيب الفراغي للجسيمات الداخلة في التشتت. وفي الطاقات العالية والعالية جداً المشار إليها سابقاً، وفي جدل إشكاليّ مضاد للحقائق، يأخذ هذا الاستدلال المعنى الآتي: إن وابلأ ذات طاقة عالية أو طول موجي متناقص لـ"دى برولى" يتفاعل مع مركز التشتت بطريقة ليس فيها ما يسبب وجود تأثير للطول في المقطع المقاس.

هذا الجدل ينسجم مع التفسير الكلاسيكي للتركيب الفراغي لمركز تشتت وميكانيكا الكم للتشتت والذي طبقاً له تحيد الجسيمات المشحونة في الواابل، كما لو كانت موجات، في عملية تشتت. وما هذا إلا الانقسام الكمي، المعتاد، العامل في ممارسة الفيزياء. وهناك تعايش سلمى بين زعماء التجريبيين والنظريين إزاء تضارب صورتى الجسم والموجة. إن الفيزيائيين العصريين يعتقدون في ازدواجية الموجة والجسيم. وطبقاً لبديهتهم الفيزيائية هذه فالميكانيكا الكلاسيكية تستبعد أن تكمل صورة أحدهما الآخر^(١). وعلى

(١) هذا النوع من الانقسام الكمي يتبع خطوط قاعدة "بور" للتنامية. وفي أغلب الحالات يتم استخدامها بتحفظ، في نظرة غير متجانسة لظاهرة فيزياء الجسيمات، انظر الباب القادم. وفي آخر باب من هذا الكتاب نتناولها صراحة.

أي حال، فلن يتحقق التعايش السلمى للصور الكلاسيكية (النماذج) للجسيم والموجة ما لم يكن هناك تناظر بين الصورتين. وهذا التناظر محسوم طبقاً لمفهوم "لا متغيرة" المقياس.

هناك فرق جوهري بين الموقع الكلاسيكى للميكانيكا وميكانيكا الكم بالنسبة إلى التشتت وهو وجود أو عدم وجود مسار للجسيم. وفى نموذج ميكانيكا الكم للتشتت فعلى تحليل الأبعاد أن يتم دون وجود متغير التصادم b لمسار جسيم. عندئذ فقط يمكن ترحيل نتائج تحليل الأبعاد لميكانيكا الكم فى التشتت. وبالإضافة إلى ذلك، يجب أن يبقى مركز التشتت كما هو فى ميكانيكا الكم فى التشتت. بمعنى أنه يجب أن يكون هناك تناظر بين التشتت التقليدى والكمى عند جهد "كولوم". هذا هو الحال حقاً. وبالمصادفة فقد أعطت حسابات ميكانيكا الكم والحسابات الكلاسيكية النتائج نفسها. كلا الحاسبين أتى إلى معادلة "رنرورد"⁽¹⁾.

يفترض وجود هذا التناظر، يصبح تحليل الأبعاد للمقطع صحيحة فى ميكانيكا الكم فى التشتت. وبذلك تبقى كطريقة لما وراء النظرية لتحليل بيانات تجارب تشتت لما دون الذرة.

(1) يتم الحصول على مقطع "رنرورد" بالتأكيد فى ميكانيكا الكم للتشتت من الحل التام لمعادلة "شرونجر" لجهد "كولومب"، كما يتم ذلك من تقريب "بورن" لجهد محجوب. انظر المرجع Born 1926c و Hermann 1962 و Mott & Massey 1965 والسبب هو الفرض المسبق أن جهد "كولومب" يستوفى الشرط المشار إليه فى المرجع Born 1926c. للسلوك نصف الكلاسيكى لوابل جسيمات فى مجال خارجى. وهو يؤدي حقاً إلى وصف نصف تقليدى لنواة الذرة، انظر إلى تعريف معاملات الشكل الكلاسيكية المشروحة فى الفقرة ٤-٣-١.

إن تحليل الأبعاد ينطبق ليس فقط على تشتت "رذرفورد" التقليدي بل على كل النماذج النظرية لعملية تشتت متميزة بالكميات الفيزيائية لهذا النموذج (ماعدًا متغير الصدام). وينطبق الشيء نفسه على "لا متغيرة" المقياس. إن "لا متغيرة" المقياس لمقطع عديم الأبعاد، يكافئ النقطة للجسيمات المشتتة، في كل مراتب النماذج التي لها طاقة E وتعديبة Z و Z' لشحنة عامة للجسيمات المشتتة. وثابت الاقتران عديم الأبعاد α المميز لنوع التفاعل أو الديناميكية الداخلة في التشتت. وبناء عليه فإن مفهوم "لا متغيرة" المقياس ليس مقيدًا لا للنماذج التقليدية لعملية تشتت ولا لنماذج التفاعلات الكهرومغناطيسية.

وفي إطار مناسب فالتفسير النظري لمقطع مقياس وفقًا للمصطلحات المذكورة قد تم تعميمه ليصل إلى ميكانيكا الكم النسبوية للتشتت^(١). وبذلك، فالجدل الذي بسببه يقترح "لا متغيرة" المقياس عديم الأبعاد أن الجسيمات النقطة الداخلة في التشتت يمكن ترحيلها إلى الحالة النسبوية. وقد طبقت أيضًا في نتائج تجارب تشتت ذات طاقة عالية عام ١٩٦٨، حينما اعتبرت "لا متغيرة" المقياس دليلًا على البنية النقطة داخل البروتون والنيوترون^(٢).

وعلى أي حال ففي نطاق نظرية الكم، على الفرد أن يكون أكثر تحفظًا. فطبقًا للتحليل البعدي تشير "لا متغيرة" المقياس إلى غياب التركيب الموصوف بالطول. ودون فروض إضافية توصف نموذج عملية التشتت،

(١) يختار الفرد محور الإسناد الذي تختفي فيه مركبة الطاقة في كمية الحركة المنتقلة الرباعية (نظام "برايت"، انظر المرجع. Breit and Wheeler 1934).

(٢) المرجع. Riordan 1987.

فلن يعنى هذا شيئاً، ولكن ما يقوله هنا هو "اللا تركيبية". أما مفهوم اللا نقطية فهو أكثر تحديداً. إنه يعطى الانطباع بالموضعية. إنه مبنى على الفرض قريب الارتباط بمفهوم الجسيم السببى غير الرسمى الذى تمت مناقشته فى الباب السابق، وهو أن التفاعل بين الجسيمات المشتتة موضعى. وقد يميل الفرد إلى البحث عن مواصفات نموذجية مستقلة لتفسير "لا متغيرة" المقياس بدلالة التشتت النقطى أو تأثير مركز تشتيت مهمل الحجم. وقد كان ملمح الارتداد الخلفى غير المتوقع الذى شوهد للمرة الأولى فى معمل "رذرفورد" هو هذه المواصفة إلا أنها كانت فى نموذج تقليدى للجسيم. وفى نطاق كمى، فتفسير فراغى لتركيب نقطى أو لا نقطى يتأثر بالعديد من الشكوك؛ إذ إنه طبقاً لميكانيكا الكم للتشتت، تحيد الجسيمات المتناثرة كالموجة. ففى عملية تشتت، يكون للجسيمات طولان موجيان، هما طول موجى "دى برولى" والآخر طول موجى "كومبتون". وفى نظرية الكم النسبية، تحل المسافات المكانية للحظية مكان الطول. وفى نطاق نظرية الكم للمجال فيما وراء تقريب "بورن"، يصبح المعنى الفيزيائى لفرض الموضعية المستتر فى مفهوم النقطة موضع شك هو الآخر^(١).

إن مفهوم اللا نقطية ينبع من نموذج "رذرفورد" التقليدى للتشتت. لقد كان مرتبطاً بمفهوم "لا متغيرة" المقياس المبنى على التحليل البعدى. إن التحليل البعدى هو طريقة ما وراء النظرية التى تعتقد فى وحدة الفيزياء. وتبين ميكانيكا الكم أن هذه الوحدة لم تعد من المسلّمات. إننا لسنا ملزمين بالاعتقاد فى الواقعية الفيزيائية بدقة تقليدية، أو بتركيب موضعى؛ بل إن

(١) انظر التعريف المعمم لمعاملات الشكل التى نوقشت فى الفقرة (٤-٣-٢).

العكس هو الصحيح، في الحقيقة. ولذلك، فعلى الفرد أن يكون حريصًا تمامًا في التفسير الحرفي لمفهوم النقطة الذي يتناوله باحثو فيزياء الجسيمات. ومن وجهة النظر الحساسة المتبناة هنا، فالنقطة هي خاصية للجسيم تنتمي إلى البنية شبه الكلاسيكية لواقعية ما دون الذرة. بمعنى آخر، ففيزياء الجسيمات تسعى لبناء نتائج تجارب التشتت في الطاقة العالية بدلالة النقطة. وكلما ارتفعت طاقة التشتت، ازدادت إشكالية هذا التشديد، كما سيظهر فيما يلي. فالانحرافات عن سلوك تشتت نقطي؛ أي "لا متغيرة" المقياس، يعتبر تركيبات لا نقطية. هذه التركيبات توصف بدلالة معاملات الشكل النسبوية وغير النسبوية. وكلما ارتفعت الطاقة، على أي حال، زادت صعوبة تفسير معاملات الشكل حرفيًا.

٤-٣-١ معامل الشكل التقليدي

في نموذج "ذر فوردر" للذرة، تكون نواة الذرة هي شحنة نقطية تقليدية تولد جهد "كولوم". هذا النموذج لنواة الذرة هو أيضًا الأساس في وصف النواة كتركيب لا نقطي من حيث معاملات الشكل. وفي النموذج التقليدي للتشتت، فعدم التركيبية تعني نقطية. وعلى النقيض، فانتهاكات المقياس للمقطع عديم الأبعاد يشير إلى تركيب داخلي لمركز التشتت. وهذا التركيب يوصف بتمديد التوزيع الشحني $\rho(r)$ بدلاً من شحنة نقطية. فقد وجد "ذر فوردر" بداية حيودات عن معادلاته للتشتت في عام ١٩١٩، عندما أجرى

تجارب تتأثر بجسيمات ألفا وبالهدروجين^(١)؛ حيث أرجع ذلك في نموذجه التقليدي إلى ما يشير إلى وجود تأثيرات قوى نووية. وحيث إن معادلة "رذرفورد" التقليدية من الممكن أن تستنتج من ميكانيكا الكم غير النسبوية، فإن التفسير التقليدي لتوزيع شحنيّ ممتدّ بدلالة معاملات الشكل قد تمّ ترحيله إلى ميكانيكا الكم^(٢). إن النموذج التقليدي لنواة الذرة كتوزيع شحنيّ قد أظهر ثباتاً بشكل مذهل عند التحول إلى ميكانيكا الكم. وعلى الرغم من أن ميكانيكا الكم لا تسمح بتفسير مكانيّ لمقطع فعال، فإنها تسمح بتعريف محدد لما هو مركز تشّيت، نقطى أو لا نقطى. وفي الحالة غير النسبوية، فمركز التشّيت الذي يعتبر نقطياً فقط أدى إلى مقطع تفاضلى "لرذرفورد" في حال تشّيت جسيمات مشحونة.

في النموذج التقليدي للتشّيت، ترجع ظاهرة الارتداد الخلفى إلى مركز تشّيت غير قابل للاختراق لجسيمات مشّتة عند معامل صدام صغير. وفي ميكانيكا الكم توصف الجسيمات المتناثرة بموجات، ويكون السلوك التشّيتى (بما فيه الارتداد الخلفى) ما هو إلا ظاهرة حيود. ويتّصاف أن تعطى معادلة الحركة التوزيع الزاوى نفسه في نمونجى الجسيم والموجة لتشّيت "كولوم". ففي جهد "كولوم"، يتساوى المقطعان.

وفي كلا الحالين، التقليدى والكمى، يتم وصف مركز التشّيت بدلالة جهد كهربي ساكن ثابت. تلك صورة تقليدية لمركز تشّيت. فهو يوصف بدلالة كهربية ساكنة تقليدية. ومن المفترض في ميكانيكا الكم، أن يعنى هذا

(١) انظر المرجع. Pais 1986 ص ٢٣٧-٢٤٠.

(٢) انظر الملحوظة ١٩ عليه.

أن مركز التشتيت موضعى. وبمعنى دقيق، فهذا الوصف يقود إلى نموذج نصف تقليدى للتشتت. وبينما توصف الجسيمات المسبارة بدلالة دالة موجية لميكانيكا الكم Ψ ، فإن مركز التشتيت لا يوصف كذلك؛ إذ إنه يوصف إما كشحنة نقطية أو كتوزيع شحني نصف تقليدى ممتد. وفي الحالة الأخيرة، لا يكون المقطع التفاضلى ثابت المقياس. وتصاغ حيوداته عن معادلة "رنر فوردر" بدلالة معامل شكل. والتعريف التقليدى لمعامل الشكل هو كما يلي. فى الكهربية الساكنة التقليدية، يوصف توزيع شحني بواسطة كثافة شحنة $\rho(r)$ ⁽¹⁾. وتوزيع شحني فى النموذج التقليدى فالتوزيع الشحني قد يمكن فهمه إما على أنها كثافة شحنة متصلة أو على أنها كثافة احتمالية لمواقع شحنات نقطية منفصلة. والكمية $\rho(r)$ تولد الجهد الكهربي الساكن $V(r)$:

$$V(r) = C \int \frac{\rho(r') dr'}{|r - r'|} \quad (4.4)$$

وهنا $C = ZZ' \alpha \hbar c$ معطاة بدلالة عددي شحنة Z و Z' وثابت الاقتران α والثابتين \hbar و c . فى النموذج التقليدى، يمكن كتابة $\hbar c \alpha$ بدلالة وحدات الكهربية الديناميكية التقليدية. وفى نموذج ميكانيكا الكم، من المفترض أن مركز التشتيت المشحون يوصف بدالة موجية $\Psi(r)$ تؤدي إلى توزيع شحني شبه تقليدى $\rho(r)$ متسقاً مع التفسير المعتاد لميكانيكا الكم:

$$\rho(r) = |\Psi(r)|^2 \quad (4.5)$$

(1) هنا فى الآتى تكون الإسهامات غير القطرية $\rho(r)$ والجهد $V(r)$ مخفيين بصفة عامة. وعندما يظهران فى اللعبة يعبر عن ذلك بالتمثيل الاتجاهى $\rho(r)$ و $V(r)$ على التوالي.

وباستخدام المعادلة (4.4)، يؤدي هذا التفسير إلى جهد $V(r)$ ،
 يصاغ جزئيًا بدلالة مفهوم تقليدي وجزئيًا بدلالة دالة موجية لميكانيكا الكم.
 وتتجاوز المعادلة (4.5) التفسير الاحتمالي المعتاد لميكانيكا الكم. فهي مبنية
 على زعم يصاد الحقيقة في أن الدالة الموجية لميكانيكا الكم لمركز تشتت
 يؤدي إلى كثافة احتمالية $\rho(r)$ في حالة قياسات مواضع متعددة في حين
 مركز التشتت. وفي الحقيقة، فإن وصف مركز التشتت قد بنى على إصدار
 عمومي لمبدأ مقابلة "بور" التي ستناقش في الباب الخامس. وبهذه الطريقة
 يصبح من الممكن إعطاء وصف ميكانيكي كمي متماسك لتشتت الجسيمات
 المشحونة على نظام يوصف بدلالة دوال موجية - ميكانيكية - كمية
 لجسيمات عديدة. ولجهد "كولوم" $V(r) = C/r$ ، تختزل كثافة الشحنة
 إلى دالة دلتا "ديراك" ، $\delta(r) \equiv \rho(r)$ ، ولتوزيع شحني ممتد، يصبح الحل الدقيق
 لمعادلة "شرودنجر" غير ممكن في ميكانيكا الكم للتشتت. وفي تقريب "بورن"
 يعطى الجهد في المعادلة (4.4) المقطع التفاضلي التالي⁽¹⁾:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{\pi^2 C^2}{E^2 \sin^4 \frac{\theta}{2}} \int \rho(r) \frac{\sin(qr)}{q} r dr \quad (4.6)$$

(1) المرجع Mott & Massey 1965. يجب إضافة تحذيرين هنا. الأول أن تقريب "بورن"
 يفشل جهد "كولومب"؛ حيث إنه يصلح فقط في الجهود التي تتناقص أسرع من $(1/r)$.
 على أي حال فالحل التام يختلف فقط عن الطور التخيلي الذي لا يغير المقطع. الثاني
 هو أن التشتت عند جهد "دلتا" يؤدي إلى مقطع صفري. كل من النقطتين يبين أن
 التفسير الحرفي للحسابات هو إشكالي. ولاحظ أنهما لا تؤثران في عبارتي العامة عن
 شبيه النقطة والموضعية.

q هنا هي كمية الحركة المنقولة من الجسيمات المسبارة لمركز التشتيت. وهي ترتبط بكمية الحركة p وطاقة الحركة E للجسيمات المسبارة وزاوية التشتت، كما يلي:

$$q = 2|p|\sin\frac{\theta}{2} = 2\sqrt{2E}m\sin\frac{\theta}{2} \quad (4.7)$$

وبمقارنة المعادلة (4.6) بمعادلة "رنفورد" للمقطع (4.1) (المسماة $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_R$ فيما يلي) يتبين أن $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ و $(\frac{d\sigma}{d\Omega})_R$ منطقتان حتى يعتمد معامل شكل $F(q)$ فقط على كمية حركة منقولة q :

$$F(q) = \frac{4\pi}{q} \int \rho(r) \sin(qr) r dr \quad (4.8)$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = R \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_R |F(q)|^2 \quad (4.9)$$

طبقاً للمعادلة (4.8) فمعامل الشكل $F(q)$ هو تحول "فورير" للتوزيع الشحني $\rho(r)$ ، والأسلوب الذي يعتمد به على كمية الحركة المنقولة q هو مقياس التكوين المكاني للشحنة المركزية اللا نقطية التقليدية، بقدر ما كان هذا التفاعل كهرومغناطيسياً.

وطبقاً للمعادلتين (4.7) و (4.9) فمعامل الشكل $F(q)$ يعتمد على طاقة الحركة E وزاوية التشتت θ ، مما يؤدي إلى انتهاك المقياس لمقطع "رنفورد" الذي أصبح عديم الأبعاد بالضرب في $(E/\hbar c)^2$:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} (E/\hbar c)^2 = \frac{(ZZ'\alpha)^2}{\sin^4 \frac{\theta}{2}} |F(q)|^2 \quad (4.1.)$$

وفى جهد "كولوم" لتوزيع شحنة نقطى $\delta(r) \equiv p(r)$ ، يختزل معامل الشكل إلى الواحد الصحيح، مما يؤدي مرة أخرى إلى مقطع "رنفورد" ثابت المقياس:

$$1 \quad (4.11) \equiv F(q)_R$$

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R (E/\hbar c)^2 = \frac{(ZZ'\alpha)^2}{16\sin^4 \frac{\theta}{2}} \quad (4.12)$$

وبهذه الطريقة يكون التكافؤ بين اللا تركيب و"لا متغيرة" المقياس الذى تتبأ به التحليل البعدى قد عاد كما هو. فى النموذج التقليدى؛ حيث يوصف تركيب مركز التشتيت بدلالة معامل الشكل، فعدم التركيب والتوزيع الشحنى المكائى $\rho(r)$ متكافئان، بينما يعنى اللا تركيب، اللا نقطية. وطبقاً لهذا النموذج التقليدى لمركز التشتيت، فالتوزيع الشحنى $\rho(r)$ ، يمكن الحصول عليه من قياس المقطع التفاضلى ومن معادلة "رنفورد"، طبقاً للمعادلتين (4.8) و(4.9). فطبقاً للمعادلة (4.8)، يكون معامل الشكل $F(q)$ مقداراً تجريبياً يأتى من تطبيع مقطع مقياس $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Exp}$ بمقطع نظرى $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R$ لمركز تشتيت نقطى:

$$|F(q)_{\text{Exp}}|^2 = \frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Exp}}}{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{R}}} \quad (4.13)$$

وطبقاً للمعادلة (4.7) نحصل على التوزيع الشحني القطري بقياس معامل الشكل $F(q)_{\text{Exp}}$ بواسطة تحول "فورير":

$$\rho(r) = \frac{1}{2\pi^2 r} \int F(q)_{\text{Exp}} q \sin(rq) dq \quad (4.14)$$

طبقاً للمعادلتين (4.13) و(4.14)، فممكن قياس التوزيع الشحني القطري للقشرة الإلكترونية للذرة في الفيزياء الذرية. وقد تم عمل ذلك بحيود الإلكترونات منخفضة الطاقة وأشعة إكس. بينما تم بحث تركيب النواة بتجارب تشتت عند طاقات أعلى من ذلك بكثير^(١).

وكان لزاماً تحديد معاملات الشكل في هذه التجارب ضمن حدود نظرية الكم النسبية للتشتت.

(١) انظر الفقرة (٤-٥)، حيث القاعدة الحاسمة في زيادة طاقة التشتت بغية الحصول على تمييز فراغي أفضل يتم تفسيره في النهاية.

لقد بنيت العلاقة بين "لا متغيرة" المقياس واللا تركيب على حجج بعدية عامة. وعلى النقيض من ذلك، فالتعريف المذكور سابقا عن النقطة واللا نقطية هو يعتمد على النموذج المستخدم. إنه يعتمد على الوصف التقليدي لمركز التشتيت من خلال التوزيع الشحني الموضعي، والجهد الثابت وما يؤدي إليه من معامل شكل.

على أي حال، فقد تم تعميم "لا متغيرة" المقياس واللا نقطية حتى نطاق النسبية كما حدث لمفهوم انتهاك المقياس ومعاملات الشكل؛ حيث إن هذه التعميمات فاصلة في تطوير فيزياء الجسيمات في الخمسينيات وفي أواخر الستينيات من القرن العشرين. ففي الخمسينيات قام "هوفستادر" ومجموعته في جامعة "ستانفورد" بقياس معاملات الشكل لأنوية الذرات عند طاقات تتجاوز الطاقات التي عمل عندها "رذرفورد". وقد حددوا معاملات الشكل لأنواع عديدة من أنوية الذرات. وعلى أي حال، فقد ذاع صيت التجارب التي قاموا بإجرائها لسبر أغوار تركيب البروتون والنيوترون^(١). لقد أظهرت هذه التجارب أن التركيب الكهرومغناطيسي للنويدات من الممكن أن يعبر عنها بدلالة معاملي شكل يصوران حيودات عن التشتت النقطة. تعلق الأولى بالشحنات ١ و صفر للبروتون والنيوترون، على التوالي. وتعلق الثانية بالعزم المغناطيسي للنويدات، شارحة بذلك العزم المغناطيسي الشاذ^(٢).

(1) Hofstadter 1956., 1958 & 1989

(٢) المرجعان Rosenbluth 1950. & Hofstadter 1958.

وفي عام ١٩٦٨، حدث اكتشاف يشبه اكتشاف "زدرفورد". ففي إحدى تجارب التشتت التي تم إجراؤها في معجّل "ستانفورد" الخطّي المسمى "SLAC" تمت مشاهدة وقياس تشيّتات عند زوايا كبيرة واتضح أن المقطع الكلي ثابت المقياس. وقد فسر كل من "بوركن" و"فينمن" "لا متغيرة" هذا المقياس بأنه مؤشر تجريبيّ على وجود مكونات دقائقية للنويد النقطي. وبعد إجراء المزيد من التجارب من النوع ذاته، وبعد تجميع المزيد من الأدلة، تم تحديد هوية البارتونات على أنها الكواركات، تلك هي كسور الشحنة في نموذج الكوارك الذي أسس عام ١٩٦٣^(١).

ومن أجل تفسير تلك التجارب التي أجريت في الخمسينيات والستينيات من القرن العشرين، فقد تم تعميم نموذج "زدرفورد" ومفهوم معاملات الشكل حتى نظرية الكم النسبوية كما يلي. ففي ميكانيكا الكم النسبوية، يتم وصف الجسيمات المتناثرة المسبارة بمعادلة "ديراك" بدلاً من معادلة "شرودنجر". والرابطة بالوصف غير النسبوي للتشتت تتوطد من خلال وصف التشتت في محاور إسناد مناسبة. فلتختر محاور "برايت" التي تختفي فيها مركبة الطاقة في كمية الحركة المنقلة الأربعة النسبوية^(٢). فمركز التشتت في هذا الإطار يتم أمثلتها بجهد $V(r)$ يمكن إدخال توزيع شحني مكانيّ $\rho(r)$ فيه. وكتقريب

(١) للتفاصيل التاريخية في هذه القصة المربعة للاكتشاف غير المتوقع وتفسيره انظر: المرجع:

Riordan 1987 الأبواب 8-6 و تقرير النتائج العملية في المرجع :

Panofsky 1968. والمقالات الأصلية في التفسير النظري في المراجع:

Bjorken 1969.,Bjorken and Paschos 1969.,Bjorken 1970. &Feynmann 1969.

(٢) المراجع 1990. Nactmann و Breit and Wheeler1934.

في البداية، يتم وصفه بجهد "كولوم" ثابت؛ بمعنى أنه ثقيل جدًا ولكنه نواة ذرية نقطية. وقد شمل هنا معالجتين نموذجيتين: أ- الكتلة المسماة اللامتناهية التقريبية التي طبقاً لها تهمل كتلة الجسم المسبار m بالنسبة إلى كتلة مركز التشتيت M (أي أن $m \ll M$ أو أن $M \rightarrow \infty$) و ب- فرض أن مركز التشتيت هو نقطى. ومن الواضح أن هذين الفرضين في الحقيقة لا يجتمعان. هما ينتجان نموذجًا بسيطاً ولكنه غير واقعى لتشتت. وفى تقريبية "بورن"، يحصل الفرد على صيغة بسيطة للمقطع التفاضلى، وهو معادلة "موت" للتشتت^(١). ويقابل مقطع "موت" تشتت "رذرفورد" التقليدى على النحو الآتى. فللجسيمات المسبارة منخفضة الطاقة ($v \ll c$) أو ($2E \ll c^2$)، تؤول إلى مقطع "رذرفورد". وللجسيمات عالية الطاقة، على أى حال، فالكميات اللابعدية التى يتم الحصول عليها تكون، مرة أخرى، ثابتة المقياس.

ويمضى التعميم الثانى من الأنوية الثقيلة إلى أخف النوية، البروتون. ويوصف التشتت للمرة الثانية بدلالة سلوك نموذجى غير واقعى. فقد بنى النموذج على ما يسمى "بروتون ديراك"؛ أى بروتون نقطى دون عزم مغناطيسى شاذ وهو الخاضع لمعادلة "ديراك". (إن وجود عزم مغناطيسى شاذ يدل على وجود تركيب داخلى للبروتون. وهو ما يتم إهماله فى هذا النموذج. ومن المفترض أن يسلك البروتون سلوك البوزيترون الثقيل). وفى تقريب "بورن"، تنتج الحسابات صياغة أكثر تعقيداً للمقطع التفاضلى. على أى حال، هى ثابتة المقياس مثل معادلات تشتت "موت" و"رذرفورد".

(١) المراجع، Perkins 2000، و Itzykson and zuber 1985، و Nactmann 1990.

وللأتى انظر النظرة العامة الممتازة فى المرجع: Povh et al. 1999، ص ٤٣-١١١.

إنها تؤول إلى معادلة "موت" للتشتت فى حالة الكتلة الصغيرة للجسيمات المسبارة ($m \ll m_{\text{proton}}$)⁽¹⁾.

إن كلاً من المعادلتين اللتين تم حسابهما فى ميكانيكا الكم النسبية تمثل تعميمات لمعادلة "رذرفورد". ويشترك معها معادلات أساسية من "لا متغيرة" المقياس. وتحت ظروف تقريبية واضحة المعالم، فإنهما يؤولان إليها كحدود تقليدية غير نسبية. وفى المقابل، فإن كلاً من المعادلتين يمكن أن يدخل بديلاً من $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R$ فى المعادلة (4.13). وبناء على ذلك، أدخلت معاملات الشكل فى نماذج التشتت. وإدخال معامل الشكل يلغى المعالجات المثالية فى وصف مركز التشتت. وعلى أي حال، فإن إلغاء المثالية هذا يدفع ثمن إدخال التوزيع الشحني التقليدى إلى ميكانيكا الكم النسبية فى التشتت. فالنموذج الناتج للتشتت هو نصف تقليدى بشكل جلى. (هذا الثمن هو ما كان يجب أن يدفع لحفظ التوافق مع نموذج "رذرفورد" التقليدى). هذا النهج شبه التقليدى جعل قياس معاملات الشكل ممكناً فى تجارب التشتت ذاتطاقات العالية التى أجريت على الجسيمات ذات الطاقات النسبية. ولقد اتخذ من اعتماد معاملات الشكل على كمية الحركة المنقولة الأربعة q دليلاً على اللانقطية الجسيمات المشتتة:

$$|F(q)_{\text{Exp}}|^2 = \frac{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Exp}}}{\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{RQM}}} \quad (4.15)$$

(1) Bjorken and Drell 1964, Chap. 7.4.

والحد $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{RQM}}$ هنا، هو مقطع تفاضلى محسوب فى ميكانيكا الكم

النسبوية من معادلة "ديراك". إنها تمثل تنشئت جسيمات مسبارة قيمة مغزلهما $\frac{1}{2}$ على مركز تنشيت ممثل بأى جهد كهرومغناطيسى. وترسى المعادلتان (4.14) و (4.15) الأسس النظرية لتجارب التنشئت التى قاس فيها "هوفشتادر" ومجموعته معاملات الشكل وما تعلق بها من توزيعات شحنية للعديد من أنوية الذرات فى "ستانفورد" فى الخمسينيات^(١). وقد ذاع صيت التجارب التى سبرت أغوار التركيب الكهرومغناطيسى للبروتون والنيوترون. لقد أظهروا فى هذه التجارب أن التركيب الكهرومغناطيسى للبروتون والنيوترون من الممكن أن يعبر عنه بدلالة معاملى شكل يصوران حيودات عن التنشئت النقطى، فى توافق مع العزمين المغناطسيين الشاذين لهما. فيرتبط معامل الشكل الأول بالشحنة والثانى بالعزم المغناطيسى^(٢). وقد كانت بداية تحديد معاملات الشكل الكهرومغناطيسية للنيودات بعلم الظواهر طبقاً لمعادلة من النوع رقم (4.15)، من علاقة مقطع مقياس ومقطع محسوب لجسيمات مشحونة نقطية. ومعاملات الشكل المقاسة بهذه الطريقة هى كميات شبه تقليدية. إنها تظهر إلى أى مدى تحيد التركيبات المقاسة عن العزم المغناطيسى التقليدى. ففى نموذج شبه تقليدى للتنشئت، تتعلق بالتوزيع الشحنى الكهربى وكثافة العزم المغناطيسى للبروتون أو النيوترون^(٣).

(1) Hofstadter 1956, Hofstadter et al. 1958, Hofstadter 1989.

(٢) المرجعان Rosenbluth 1950 و Hofstadter 1958.

(٣) لقد سبق تاريخياً الولوج الظواهرى الفهم النظرى لهذه الكميات إلى معاملات الشكل أيضاً. لقد أعطى التفسير الفيزيائى لمعاملات الشكل الكهرومغناطيسية للنيودات فى سياق ميكانيكا الكم النسبوية فقط بضع سنوات بعد القياس (المرجع Ernst et al. 1960).

والخطوة التالية فى التعميم تستغنى عن النماذج نصف التقليدية. إنها خطوة من ميكانيكا الكم النسبوية إلى الكهروديناميكا الكمية، نظرية المجال الكمى للتفاعلات الكهرومغناطيسية. ففى نظرية المجال الكمى النسبوية، يكون من الممكن حقاً أن نعطى تفسيراً عاماً محدداً غير معتمد على نموذج معامل الشكل للبروتون والنيوترون قد تم قياسه وفقاً للمعادلة (4.15).

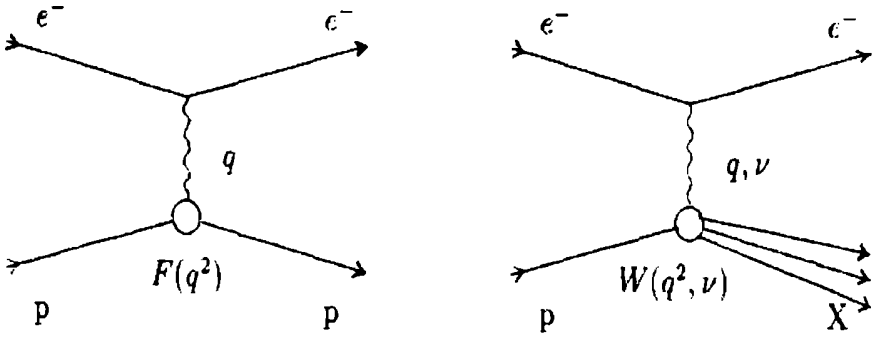
ومن أجل استنتاج صيغة لمعاملات الأشكال مستقلة عن النموذج، فليبدأ الفرد من المبادئ العامة لنظرية المجال الكمى النسبوية، المسماة "لا متغيرة" "لورنس" و"لا متغيرة" المعيار وصلاحية معادلة "ديراك" للجسيمات ذات القيمة المغزلية $\frac{1}{2}$. وبذلك يحصل الفرد على وصف عام جداً لعملية تشتت لم يتم تفصيلها خصيصاً لتلائم الظروف التقليدية. ويتكون الوصف من حدين من "لا متغيرة" "لورنس". إنهما يعتمدان فقط على ("لا متغيرة" "لورنس") q^2 ، وهو مربع كمية الحركة المنقولة الأربع q . إنها من الممكن تحديدها بحدود معاملات الشكل التى حصلنا عليها طبقاً للمعادلة (4.15). وبهذه الطريقة يمكن التخلص من التبعية للنموذج والذى تم وضعه بداية لمعاملات الشكل. وهكذا، يصبح من الممكن تعريف ما الجسيمات النقطية فى تجربة تشتت دون فرضيات نصف تقليدية مسبقة، وذلك فى سياق نظرية المجال الكمى النسبوية⁽¹⁾. إن التركيب الكهرومغناطيسى لجسيم مشتت اختياري يوصف بدلالة معاملى شكل $F_1(q^2)$ و $F_2(q^2)$ ، اللذين يقابلان الشحنة والعزم المغناطيسى للجسيم المشتت لكمية الحركة المنقولة الأربع $q=0$.

(١) المرجع. Drell and Zachariasen 1961.

ويتضح أن الجسيم المنشئت يكون نقطياً فقط إذا كانت معاملات الشكل له ثابت. إن له تركيباً كهرومغناطيسياً فقط إذا كان معاملى الشكل له، $F_1(q^2)$ و $F_2(q^2)$ دالتين فى q^2 .

فى عام ١٩٦٩، اقترح "بوركين" و"فينمن" تفسير "لا متغيرة" المقياس المكتشف فى تجارب التشتت عالية الطاقة بدلالة نويد مركب من دقائق نقطية. وكان هذا التفسير مرتبطاً بتعميم أبعد للتعريف النسبوى لمعاملات الشكل الكهرومغناطيسية. فى هذا الوقت تم تمديد النموذج ليصف عملية التشتت غير المرنة وفيها تنقل الجسيمات المسبارة طاقة لمركز التشتت، مما يؤدي إلى حالة جسيمات ماثارة وما يستتبعها من انحلالات بعمليات ثانوية مثل إشعاعات جاما أو إنتاج رزاز "هادرونى". وعلى النقيض من التشتت المرن (الذى يتميز بكمية الحركة المنقولة الرباعية q فقط)، يتميز أيضاً التشتت غير المرن من ناحية طاقة الإثارة v التى تنقلها الجسيمات المسبارة إلى مركز التشتت، بالنسبة إلى طاقة الوابل E . ويمكن بيان عملية تشتت الإلكترون والبروتون بما يناظرها فى التمديد المضطرب لعملية التشتت فى تقريب "بورن" وذلك باستخدام رسم "فينمن" التوضيحي فى الشكل 4.2:^(١).

(١) فى التشتت المرن وغير المرن لليبتون-نويد انظر المرجع Perkins 2000. الصفحات ١٥٤-١٦٠.



الشكل (٤-٢): لتشتت المرن وغير المرن للإلكترون والبروتون (q هي كمية الحركة المنقولة الرباعية و ν هي الطاقة النسبية المنقولة).

وطبقاً لنموذج الميكانيكا الكم لعملية التشتت، فالتشتت غير المرن يؤدي أيضاً إلى رنينيات. وفي التشتت المذكور هنا، تكون الطاقة المنقولة لمركز التشتت مرتفعة جداً. وعلى النقيض من تولد الرنينيات، فهي تسمى التشتت غير المرن الفائق. وللتشتت غير المرن للإلكترون - النويد، فالوصف الثابت الأكثر عمومية للتفاعلات الكهرومغناطيسية يؤدي إلى معاملي شكل هما $W_2(q^2, \nu)$ و $W_1(q^2, \nu)$. فهي تعتمد على كميتين ثابتتين نسبيتين هما q^2 و ν ؛ حيث قيست في الستينيات. وبعد نتائج "هوفستادر" العملية لمعاملات الشكل الكهرومغناطيسية، لم يتوقع أحد أن يجد "لا متغيرة" مقياس حقيقة، ولم يوجد أحد حتى ظهور تجارب "تابلور" الحالية ومجموعته في SLAC.

وقد أعلنت النتائج المدهشة في مؤتمر "فيينا" عام ١٩٦٨^(١). هذه التجربة، لعدة اعتبارات، هي تكرار لتجربة ١٩٠٩ التي دفعت نتائجها المذهلة "زرفورد" أن يفترض وجود نواة للذرة وأن يحسب معادلته للتشتت.

(١) المرجعان. Riordan 1987. Panofsky 1968.

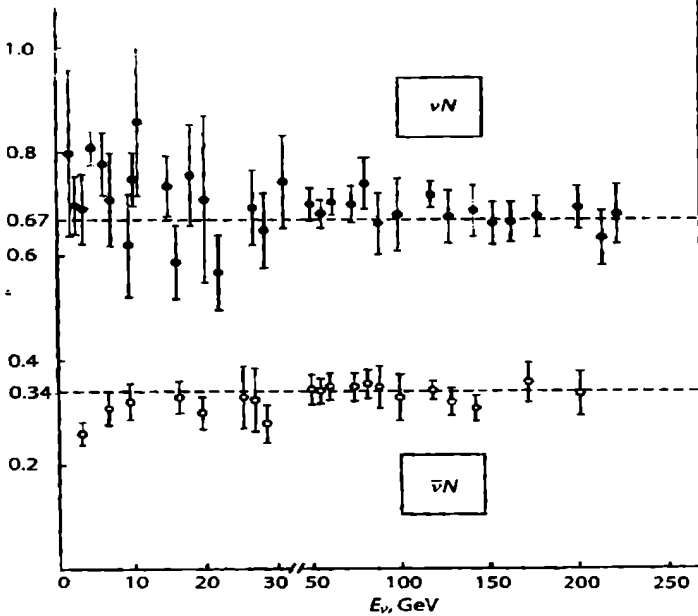
وبعد تجارب قياس معاملات الشكل التي قام بها "هوفشتادر" لكل من البروتون والنيوترون، ساد الاعتقاد في تركيب النويدات أنه متجانس تماما كالتوزيع المتجانس الموجب للذرة في نموذج "طومسون" للذرة عام ١٩٠٩. وقد فرض "تابلور" ومجموعته أن النويدات تحتوى على توزيع شحني ممتد أكثر أو أقل. ولكم كانت دهشتهم، فقد تم دحض هذا الفرض في نطاق مجال لم يتم التطرق إليه مسبقاً. وقد تمت الإشارة إلى هذا الاكتشاف ثانية بوجود زوايا تشتت كبيرة شملت أيضاً الارتداد الخلفي غير المتوقع. وعلى أي حال فقد اختلف التفسير النظرى عن عام ١٩٠٩. ففي هذه المرة كان افتراض مراكز التشتيت النقطية مبرراً بواسطة نموذج نظرى تفصيلى حول مراكز التشتيت. فهو كان بالأحرى مبنياً على الاستدلال المأخوذ من كميات "لا متغيرة" المقياس اللا بعدى حتى وجود اللا تركيب أو نقطية مراكز التشتيت. تلك الكميات اللا بعدية التي نحن بصدها قد تم حسابها من المقطع المقاس، قد تساوت مع معاملى الشكل $W_1(q^2, \nu)$ و $W_2(q^2, \nu)$ للتشتت غير المرن للإلكترون - النويد. هذان المعاملان يعتمدان فقط على كميات "لورنس" الثابتة q^2 و ν . وبذلك فهما أيضاً كميتان ثابتتان من "لورنس" وقد أعطى "بوركين" و"فينمن" التفسير النظرى من حيث "لا متغيرة" مقياسهما. فقد اعتقدا أن كلاً من البروتون والنيوترون يتركب من دقائق شبيهة نقطية^(١). وهكذا اتخذت أولى الخطوات نحو البرهان التجريبي على وجود الشحنيات الكسرية، المسماة الكواركات، داخل النويدات. وبعد ذلك تم إجراء المزيد من

(١) المراجع:

Bjorken 1969.
 Bjorken and Paschos 1969.
 Riordan 1987.
 Feynmann 1969.

تجارب تشتت على أنواع من الليبتونات - النويدات. وعلى وجه الخصوص، فقد أعيد إجراء تجارب التشتت البالغة في عدم المرونة باستخدام الميونات والنيوترينات. (وقد تم الحصول على النيوترينات من تشتت وابل البروتونات على هدف بحيث تنتج جسيمات ثانوية عديدة يبقى منها فقط النيوترينات بعد مسافة انحلال معينة).

لهذه التجارب، تولد النموذج بعد ذلك من الكهروديناميكا الكمية حتى نظريات المجال الكمي للنموذج الحديث لفيزياء الجسيمات. ويحتوي النموذج الناتج على ثلاث مما يسمون دوال التركيب: $W_2(q^2, \nu)$ و $W_3(q^2, \nu)$ و $W_1(q^2, \nu)$.



الشكل (٣-٤). المقياس اللامتغير للتشتت غير المرين العميق للإلكترون-النيكولون (Perkins 2000, 163).

وقد تم تفسيرهم بدلالة توزيع كمية حركة التركيب النقطة "الكواركي" للنويد. ومع ذلك فقد وجد انتهاك مقياس أيضًا، وقد فسر ذلك بدلالة تأثيرات طاقة للكروموديناميكا الكمية في كمية الحركة ومغزلية النويدات^(١).

٤-٤ سلسلة النماذج

لقد رأينا كيف أن معاملات الشكل قد تم تعميمها تدريجيًا. والتسلسل الذي جرى به التعميم قد بين الطريق الذي به جعلوا خلق نطاق جديد لنظرية التشتت ممكنًا. فقد أنشئوا سلسلة من النماذج بادئين بأساسيات النظرية التقليدية المعروفة للتشتت. ويقف كل نموذج على علاقة من الاختزال التقريبي لما يجاوره في التشتت الأقل طاقة، آخرهم نموذج تشتت "موت" بعلاقة الاختزال التقريبي لمعادلة "زرفورد". وبذلك، تأتي لهم سلسلة من النماذج لتشتت جسيمات نقطية مسبارة ذات طاقة متزايدة عند شحنة نقطية أو جهد "كولوم". وبالنسبة إلى معادلات المقطع المحسوبة في هذه النماذج، فقد تم تحديد معاملات شكل مختلفة. إنها تصف انتهاك "لا متغيرة" المقياس بدلالة بنيات غير نقطية، مما أدى إلى نماذج شبه تقليدية لتركيب ما دون الذرة. في تلك النماذج شبه التقليدية، قد تم تفسير انتهاكات المقياس المقاسة أو التركيبات اللانقطية بدلالة توزيعات الشحنة الكهربائية توزيعات العزم

(١) المرجعان Povh et al. 1999 و Perkins 2000، ١٥٤. طبقًا لفرضيات الكروموديناميكا الكمية ونظرية المجال الكمي للتفاعلات القوية فهي نتيجة تفاعلات الكواركات التي فيها تتبع وتمتص الجلونات التصورية مما يؤدي إلى أزواج الكواركات والكواركات المضادة الافتراضية.

المغناطيسي. وكلما كانت طاقة التشنت أعلى، صغرت التركيبات المقاسة لما
دون الذرة، كما يفترض "دي برولي" للطول الموجي $\lambda = h/p$.

وتبنى سلسلة هذه النماذج شبه التقليدية جسراً بين الأوصاف التقليدية
وغير التقليدية لمراكز التشنت. كل من النماذج شبه التقليدية توظف نصاً
عمومياً لمبدأ تناظر "بور" على اعتبار أنها تصف البناء الكهرومغناطيسي
للذرة بدلالة توزيعات الشحنة والعزم المغناطيسي ومعاملات الشكل بدلاً من
دالة الموجة متعددة الجسيمات لميكانيكا الكم⁽¹⁾. على أي حال، فالسلسلة
مكونة من المزيد والمزيد من النماذج العامة لعملية التشنت، والنموذج الأكثر
عمومية لم يعد شبه تقليدي. فهي لم تعد تعتمد على الوصف النوعي لعملية
التشنت ونموذج شبه تقليدي لتركيب ما دون الذرة. إنها بنيت فقط على
السمات العامة لنظرية مجال كمّي، تسمى ثابت "لورنس" و"لا متغيرة" المعيار
ومعادلة المجال النسبوي.

وحقيقة، لقد أنشأت هذه السلسلة جسوراً من دلالات الألفاظ بين نطاقات
النظريات غير القابلة للقياس في توجه "توماس كوهن"⁽²⁾. إنها تصل الجفوات
بين الميانيكا النقطية التقليدية والكهروديناميكا التقليدية وميكانيكا الكم
اللا نسبوية ونظرية مصفوفة S ونظرية المجال الكمّي النسبوية. فميكانيكا
الكم النقطية تصف المسارات الفردية للجسيمات المشحونة الكلاسيكية.
والكهروديناميكا التقليدية تصف البنية الكهروديناميكية للذرة والنواة والنويد

(1) انظر الفقرة (٥-٤-٢).

(2) Kuhn 1962, 1970.

بدلالة جهد "كولوم" أو بدلالة معاملات شكل. وتستغنى نظرية المجال الكمي عن الجهود شبه الكلاسيكية والأوصاف شبه الكلاسيكية لمركز التشتت. عبر سلسلة النماذج، تم الاستغناء عن المزيد والمزيد من الفروض الكلاسيكية. إن نموذج "رذرفورد" للتشتت مقيد بالنظرية وكذلك النماذج شبه الكلاسيكية لتركيب ما دون الذرة. على أي حال، ففي التدرج من أجل تعميم النموذج، يحاول الفرد قدر الإمكان، التخلص من الفروض الكلاسيكية النوعية في النماذج. وعلى وجه التحديد، فنموذج التركيبي المكاني غير النسبوي قد تم استبداله بنموذج تركيب "زمانى - مكاني" به. ثم تم تفسير النموذج النسبوي بدلالة تركيب كهرومغناطيسى وأخيراً تم تعميمه إلى نموذج عام لتركيب حركى. ولا يزال تعريف ثابت "لورنس" الأكثر عمومية لمعاملات الشكل، على كل حال، مبنياً على الفروض الحاسمة الأربعة الآتية:

(أ) الجسيمات المشتتة حرة تقريباً قبل التشتت وبعده (غير مقيدة)، طبقاً لتقريب "بورن".

(ب) الجسيمات المشتتة تتبع قوانين الحركة النسبوية؛ حيث يحفظ كمية الحركة الرباعية النسبوية.

(ج) التفاعلات الخاصة بالجسيمات الحرة ذات اللاتركيب يتم وصفها بنظرية المجال الكمي النسبوية.

(د) التفاعل بين جسيمين لا تركيبيين يمكن حسابه بتمديد الاضطراب. بتأثيرات الجسيمات المشتتة على محلل عوامل مصفوفة S.

الفرضان الأول والرابع يقرآن الانفصالية. إنهما يجعلان من الممكن نسبة التراكيب الحركية المنفصلة للجسيمات المشتتة. فالفرض الأول يقول: إن الجسيمات المشتتة منفصلة بوقت طويل قبل التشتت وبعده؛ بمعنى أن حالاتهم الكمية ليست متشابهة. (وهذا يقابل دليلاً تجريبياً، بمعنى أنه يقابل قياس المواضع الفردية وأثار مسارات الجسيمات).

والفرض الرابع يقول: إن تأثيراتها في التشتت من الممكن فصلها، بمعنى أن حد التفاعل الـ"لا جراني" بالنسبة إلى ما يقابله من نظرية المجال الكمي (طبقاً لتقريب "بورن") ينحل إلى فراغين مستقلين فرعيين من فراغ "هيلبرت". (وهذا سلوك مثالي. ولكن، على أي حال، فالتأثيرات التي تم إهمالها يمكن إضافتها بدلالة مراتب عليا من التصحيحات).

والآن، ماذا عن إمكانيات تفسير معاملات الشكل بأسلوب حرفي؟ ما نوع البنية الذرية التحتية التي يصفها معامل الشكل؟ وهل يقابل البناء شبه الكلاسيكي للتوزيع الشحني المكاني واقعية ما دون الذرة؟ إذا كانت النظرية المبنية على الفروض من (أ) إلى (د) مقبولة تجريبياً، فهي تدعم إسناد معامل الشكل المشروط المقياس لجسيمات ما دون الذرة. ومن ثم يمكن دعم التفسير الحرفي لمعاملات الشكل. وفي هذه الحالة، يمكن اعتبار التراكيب الكهرومغناطيسية التي وصفت بمعاملات الشكل النسبوية صحيحة، على الأقل في محاور إسناد نسبوية معينة. على أي حال، هذا التفسير صالح فقط في الواقعية النقدية. إن قياس معامل الشكل يعبر عن تركيب حقيقي لواقعية البنية الذرية التحتية. وتركيب البنية التحتية هذا يعد سبباً لانتهاكات "لا متغيرة" المقياس. وانتهاكات "لا متغيرة" المقياس هذه، على أي حال،

تفسر ارتباطاً بما يعتبر تشتتاً عند شحنة نقطية. إن التفسير الواقعي لأبنية ما دون الذرة المقاسة متعلق بأربعة اعتبارات؛ بمعنى أن البنيات تحت الذرية تعرف ارتباطاً بما يلي:

١- النطاق الممكن دخوله عند طاقة تشتت معينة.

٢- محاور الإسناد التي تمكن من التفسير المكاني.

٣- نموذج التشتت النقطة في هذا النطاق.

٤- درجة الاضطراب المستخدم في الحسابات.

وتفصيل النقاط الأربع هو كما يلي:

١- كلما ارتفعت طاقة التشتت، صغرت تركيبات البنية التحتية الذرية المقاسة، طبقاً للطول الموجي لـ'دي برولي' ($\lambda = h/p$)

لوابل تجربة التشتت. وسوف تبحث الأسس النظرية لهذه الاعتبارات الكشفية في الجزء التالي. والآن نقطة أخرى هي الفاصلة. إن البنية الذرية التحتية ليس لها وجود في حد ذاتها. إنها تعرض فقط في تجربة تشتت عند طاقة معينة؛ أي أنها نتاج تفاعل. وكلما كانت الطاقة المعطاة أثناء التفاعل أعلى، كانت المقاسة أصغر. وبالإضافة إلى ذلك، فطبقاً لقوانين نظرية المجال الكمي، عند طاقات بالغة الارتفاع، تظهر تركيبات جديدة. وتختبرنا الكروموديناميكا الكمية (أي نظرية المجال الكمية للتفاعلات القوية) أنه بارتفاع طاقة التشتت يكثر إنتاج أزواج الكواركات والكواركات المضادة والجلونات داخل النويد. وطبقاً لنموذج التشتت في هذا النطاق، يترتب عليه، مرة

أخرى، انتهاكات قياسية حدث أن شوهدت بالفعل^(١). ويلقى هذا ضوءًا جديدًا على سؤال "أدينجتون" القديم حول ما إذا كان هذا اكتشافًا أم ترفيقًا. هل تكشف التفاعلات التي تجرى عند طاقة معينة التركيبات المقاسة أم تولدها؟ ودون إعطاء إجابة سريعة، يجب ملاحظة أن القضية هي حنطة في الطاحونة الكانطية. وطبقا لنص "كانط" للواقعية النقدية، فإن الواقعية التجريبية (المادة العيانية) هي "حصيلة علاقات إجمالية" بدلا من مادة في الحس التقليدي لشيء في حد ذاته، أي "ديكارتي" في حد ذاته^(٢).

٢- في النموذج غير النسبوي، يكون معامل الشكل ببساطة هو تحول "فوربير" للتوزيع الشحني المكاني. أما في النماذج النسبوية، فلا تمكن معاملات الشكل، بصفة عام من التفسير المكاني. وتفسيرها المكاني ممكن فقط نسبة إلى محاور إسناد خاصة جدًا: محاور "برايت"؛ حيث تختفي فيها مركبة الطاقة في كمية الحركة المنتقلة الرباعية $q^{(3)}$. ولا تتطابق هذه المحاور عامة مع المحاور الساكنة في مركز التثبيت. ولذلك فمن الواضح كيف أن معامل شكل نسبوي (وما يقابله من توزيع شحني مكاني في نظام "برايت") يتصل بالشكل الحقيقي لجسيم أو مركز تثبيت في حد ذاته في إطار المحاور الساكن. ويتفق الإطاران من المحاور فقط إذا كانت كتلة الجسيم المسبار صغيرة جدًا

(١) المرجعان. Povh et al. 1999. و Perkins 2000.

(٢) المراجع: Kant 1787.,Heisenberg 1930a&b.,Nactmann 1990.

(٣) المرجعان. Breit and Wheeler1934. و Nactmann 1990.

بالنسبة إلى كتلة مركز التثتيت، بمعنى أنه، إذا كان من الممكن اعتبار الأخير ثابتاً في المكان (تقريب الكتلة النهائية)⁽¹⁾. على أي الأحوال، هذا هو بالتحديد النموذج النسبوي لتثتت عند جهد ثابت (تثتت "موت") الذي يوجد الصلة مع تثتت "زرفورد". وفيما عدا تثتت "موت" فلا يوجد تفسير مكاني لمركز التثتيت. وعلى وجه التحديد، معاملات الشكل الكهرومغناطيسية للبروتون أو النيوترون لا توضح إطاراً مستقلاً للتركيبات المكانية بل تركيبات "لورنس" الكهرومغناطيسية الثابتة.

٣- وبالإضافة، فتركيبات ما دون الذرة تحدد فقط نسبة إلى نموذج معين للتثتت. وماهية التركيب اللا نقطي تعتمد على نموذج تثتت على شحنة نقطية. وقد تم بالفعل بيان أن المفهوم الأصلي لمعامل شكل هو شبه كلاسيكي وغير نسبوي؛ بمعنى أنه يحدد نسبة إلى معادلة "زرفورد" التقليدية أو طبقاً لميكانيكا الكم. وتعميماتها تحدد نسبة إلى معادلة "موت" وتثتت الإلكترونات عند بروتون "ديراك". ومن ثم تحدد النقطية واللا نقطية بدلالة "لا متغيرة" المقياس أو انتهاكات المقياس للمقاطع المقاسة والمحسوبة.

والتعريف الأكثر عمومية لمعامل "لورنس" الثابت ودالات التركيب لا تتعلق بالنموذج، معقدة نسبة إلى الفروض الأربعة التي تمت مناقشتها عليه. فهذه الفروض حاسمة حقاً عند حسابات تفاعلات الجسم طبقاً لنظرية

(١) بصورة جذابة تقليدية للتثتت، فهذا يعنى أن الفرد يمكن أن يهمل ارتداد مركز التثتت بالمقارنة مع الجسم المتثتت.

المجال الكمي في إطار نظرية مصفوفة S في تقريب "بورن". على أي حال، هي بوضوح ليست المنهج الأكثر عمومية الوحيد الذي يمكن أن يتصوره الفرد في نظرية كمّ أساسية للتفاعلات الأربعة المعروفة.

٤- تعريف "لامتغيرة" "لورنس" لمعاملات الشكل للنويد ودالات التركيب، على وجه التحديد، تستند إلى تقريب "بورن" لنظرية الكم للتشتت. وعلى أي حال، فمن خلال هذا الفرض، يكون الاعتماد على النموذج قد عاد من الباب الخلفي. فالتعريف يفترض مسبقاً تمديد الاضطراب للتفاعل. وكوصف نظري للتركيبات اللانقطية؛ إذ إن معاملات الشكل تحسب من أدنى درجة لنظرية الاضطراب. وفيما عدا نموذج تشتت "زرפורد"، فهي تعرف أيضاً نسبة إلى تقريب "بورن" في تشتت "زرפורد" للجسيمات اللانقطية. ويقدر ما يكون تقريب "بورن" جيداً، يكون تعريفها مفهوماً. ولكن في تجربة تشتت عالية الدقة، تدخل اللعبة درجات أعلى من تمديد الاضطراب. فبالنسبة إلى معادلة تشتت تشمل حدوداً أعلى، يصبح تعريف معاملات الشكل مبهماً. والآن يبرز السؤال، هل يجب أن تفهم معاملات الشكل على أنها كميات خللية (ذات خلل) (أي تتعلق بتقريب "بورن" لمعادلة تشتت لجسيمات نقطية)؟ أم هل يجب أن تفهم على أنها كميات غير خللية (أي تتعلق بمعادلة تشتت تشمل حدوداً أعلى للنصحيح)؟ في حالة عملية تشتت توصف بمعادلة "بيراك"، تكون هذه الخيارات كما يلي: في الحالة الأولى تكون إسهامات الدرجات الأعلى للتشتت قابلة للصياغة بدلالة معاملات الشكل. وفي الحالة الثانية،

يحتوى مقطع الجسيمات مزدوجة النقطية أو اللا تركيبية على كل الإسهامات ذات الصلة بالتشتت.

هذا الغموض يأتي صراحة بعنصر مألوف إلى تعريف معاملات الشكل وإلى تركيب جسيمات ما دون الذرة. وطبقاً للتعريف الاضطرابي لمعاملات الشكل، يظهر التركيب الكهرومغناطيسي للإلكترون عند طاقة تشتت عالية بدرجة كافية⁽¹⁾. فى الكتب الأساسية، تفسر هذه القضية غالباً بدلالة جسيمات وهمية، ويقال: إن الدرجة الأعلى لبنية الإلكترون تناظر سحابة من الجسيمات التخيلية محيطة بالإلكترون المجرد. وعلى الرغم من أن النظريين ليس لديهم مشكلة مع الوصف الصوري لعمليات التشتت الكامن وراء هذا الحديث غير الصوري، فإن معنى هذا الحديث لا يكون واضحاً. فإسناد سحابة من الجسيمات الوهمية للإلكترون، يشوش مفهوم الإلكترون فى حد ذاته والإلكترون ككيان منطقي، بالتحديد كأداة فى عملية تشتت.

وعلى ذلك، فتعريف تركيب ما دون الذرة ليس نسبياً فقط لطاقة التشتت، ولا لإطار إسناد معين، ولا لسلسلة نماذج تشتت نقطى. وبالإضافة إلى ذلك، يصبح غامضاً إذا تم تجاوز صحة تقريب "بورن". على أي حال، فقضايا تفسير معاملات الشكل لجسيمات ما دون الذرة تظهر فقط فى نطاق نظرية المجال الكمى النسبوية. فى نطاق ميكانيكا الكم غير النسبوية لتشتت وفى نطاق تقريب الكتلة اللا نهائية، يكون الوصول إلى تشييد بنية تحتية نرية بدلالة معاملات الشكل الكهرومغناطيسية، ما زال ممكناً. وفى كلا

(1) تعرف معاملات الشكل الاضطرابية للكهروديناميكا الكمية، على سبيل المثال فى المرجع:

Itzykson and Zuber 1980, 30 . ويرتبط التعريف ببرنامج إعادة التسوية.

الحالين يظلّ في الإمكان اعتبار الجسيمات المشتتة كيانات منفصلة بوضوح وإعطاء وصف شبه كلاسيكي لمركز التشتيت. وفي نطاق نظرية المجال الكمي النسبوية ينخرط الفرد منهما في قضية الدلالات اللفظية التي تم إهمالها في هذا السلوك المثالي.

٤-٥ التناظر مع الميكروسكوب الضوئي

في الحالة غير النسبوية، يمكن وصف مركز التشتيت على أنه تركيب مكاني بلا أي حرج. والسبب هو الوصف شبه الكلاسيكي لمراكز التشتيت بدلالة معاملات الشكل في ميكانيكا الكم للتشتت. في عملية تشتت كمّ ميكانيكية، يتم مسح التركيب الكهرومغناطيسي لمركز التشتيت بواسطة وابل من الجسيمات المشحونة كموجات الضوء في الميكروسكوب؛ حيث يقاس التأثير الكلي لمركز التشتيت على وابل الجسيمات. وهنا، يتم وصف وابل الجسيمات بدالة موجية لميكانيكا الكم. وينتج المقطع الفعلي المقاس من عملية حيود. ويؤثر مركز التشتيت على الموجة الحائدة (وبالتالي على وابل الجسيمات) ككل، بمعنى، كتركيب مكاني تكاملي. وعلى ذلك، فالتشتت الكمي لوابل جسيمات عند تركيب لا نقطي يشبه أخذ العينات ضوئياً في ميكروسكوب.

هذا أكثر من مجرد تشبيه كسفي لا يعمل عند أخذ اعتبار أكثر قرباً. وبموجة كهرومغناطيسية عالية الطاقة؛ (أي بميكروسكوب أشعة إكس)، يملك الفرد تجريبياً مستقلاً للولوج إلى البنية الذرية. وبالإضافة، فعلى مستوى معادلات المجال يوجد تشابه رسمي بين ميكانيكا الكم للتشتت في تقريب

"بورن" وحيود الموجات الكهرومغناطيسية عند شحنة نقطية أو توزيع شحني مكاني. فإذا كان هناك شحنات بكثافة شحنية ρ ، فمعادلة الموجة في الكهروديناميكا التقليدية للجهد القياسي ϕ تكون⁽¹⁾:

$$\Delta\phi - \frac{1}{c^2} \frac{\delta^2 \phi}{\delta t^2} = 4\pi\rho \quad (4.16)$$

وتحل معادلة الموجة (4.16) بالجهد المعاق. ويمكن كتابة الجهد القياسي وكثافة الشحنة في المعادلة (4.16) كما يلي:

$$\varphi_0(r) e^{-i\omega t} \quad (4.17) \quad (r,t) = \phi$$

$$\rho_0(r) e^{-i\omega t} \quad (4.18) \quad (r,t) = \rho$$

وبالتعويض عن ϕ و ρ عند لحظة اختيارية t في المعادلة (4.16)

نحصل على المعادلة الآتية لكل من ϕ و ρ :

$$\Delta\phi_0 + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 \phi_0 = \rho_0 \quad (4.19)$$

هذه المعادلة لها نفس شكل معادلة "شرودنجر"، إذا تحققت شروط تقريب "بورن"؛ أي إذا كانت الموجة الكرية المشتتة ψ^{sc} صغيرة مقارنة بالموجة القادمة المستوية ψ^{in} ، وإذا كان $V(r)$ يتضاءل سريعاً، وإذا كانت الحدود في $\psi^{in} V(r)$ مهمل⁽²⁾:

(1) التشابه الصوري منصوص عليه في المرجع Pinsky 1953.

(2) انظر Ibid 144.

$$\Delta\Psi^{sc} + k^2\Psi^{sc} = \left(\frac{4\pi m}{h}\right) \quad (4.2.)$$

وبالتناظر الشكلى للمعادلتين (4.19) و (4.2.)، نحصل على الحل:

$$\varphi = \varphi^{in} + \varphi^{sc}$$

لمعادلة "شروينجر" فى تقريب "بورن" ، إذا تم التعويض عن k بالقيمة ω/c وعن $V(r)$ بالقيمة $(4\pi m/h)^{in} \Psi^2$ فى حل المعادلة (4.19). وبالجهد (4.4) لتوزيع شحنى قطرى نحصل على الحد (4.8) لمعامل الشكل الذى يصوغ انحراف تشتت "رنر فوررد". وبالتالى يمكن وصف التشتت الكهرومغناطيسى عند توزيع شحنى من ناحية وتشتت جسيمات مشحونة عند جهد $V(r)$ من ناحية أخرى، بنفس معادلات الجهد الصورية. وتكون الحلول الصورية للجهد القياسى φ_0 والموجة المشتتة Ψ^{sc} فى تقريب "بورن" هما الشئ نفسه. وعلى هذا فهناك تشابه محدد بين نوعى عملية التشتت.

هذا التشابه صعب المنال. وبالتحديد، فمعامل شكل $F(k)$ يمكن أيضاً تحديده لشدة $I(\theta)$ لموجة كهرومغناطيسية تم تشتتها (أو حادت) عند توزيع شحنى $\rho(r)$.

$F(k)$ تمثل انحراف الشدة $I(\theta)_T$ فى تشتت "طومسون" للموجات الكهرومغناطيسية عند شحنة نقطية (المشابهة لتشتت "رنر فوررد" لوابل من الإلكترونات).^(١)

$$I(\theta) = I(\theta)_T |F(k)|^2, \quad (4.21)$$

(١) المرجع. Compton and Allison 1935, 116 & 134.

مع

$$I(\theta)_T = I_0 \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 \frac{1}{2} (1 + \cos^2 \theta), \quad (4.22)$$

و

$$F(k) = \frac{4\pi}{k} \int \rho(r) \sin(kr) r dr \quad (4.23)$$

$$k = \frac{4\pi}{\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \quad \text{وهنا:}$$

هي طبقاً لعلاقة "دي برولييه" $|p| = \hbar k$ ، تشبه كمية الحركة المنتقلة:

$$\sin \frac{\theta}{2} q = 2|p|$$

لجسيمات مشحونة مسبارة. I_0 هي شدة الموجة الكهرومغناطيسية القادمة. m, e هما شحنة وكتلة الشحنة النقطية، على الترتيب. والمعادلة (4.21) تصف فقط الإسهام المتسق في التشتت، بمعنى الإسهام دون انتقال طاقة. وبالمثل، تصف المعادلة (4.9) التشتت المرين لجسيم مشحون. وتنتج المعادلتان (4.21)، (4.22) أيضاً من ميكانيكا الكم للتشتت. وبالنسبة إلى تشتت "طومسون" وتعميماته للتوزيع الشحني اللا نقطي، تعطى الحسابات الكلاسيكية والميكانيكا الكمية النتائج نفسها (كما في حالة تشتت "رنر فوررد"). في كلتا الحالتين هناك تناظر دقيق بين معادلتى التشتت الكلاسيكية والكم ميكانيكية.

فمعامل الشكل (4.8)، (4.23) متشابهان شكلياً. وتحوّل "فورير" للكميتين $F(q)$ و $F(k)$ تنتج التوزيع الشحني نفسه $\rho(r)$. وهكذا، فالمقارنة الشكلية بين ميكانيكا الكم للتشتت وتشتت الموجات الكهرومغناطيسية عند توزيع شحني يكشف أكثر من مجرد تشابه شكلي. فالموجات الكهرومغناطيسية الكلاسيكية والكميات الضوئية أو الفوتونات أو وابل الإلكترونات تفحص بدقة تركيب البنية الذرية التحتية لمراكز التشتت ليس فقط بطريقة التشابه ولكن بالأسلوب نفسه (تحت الظروف نفسها وبقدر صحة تقريب "بورن"). فالديناميكا الكهربائية الكلاسيكية وميكانيكا الكم تتنبآن بأن الموجات الكهرومغناطيسية والجسيمات المشحونة تعطيان التصور نفسه لتركيبات ما دون الذرة. وقد تم تأكيد هذا التنبؤ لوقت طويل. وعلى وجه التحديد، فقد أعطت القياسات التي تمت بأشعة "أكس" أو وابل الإلكترونات التركيب القشري نفسه للذرات. وتؤكد هذه النتائج العملية أيضاً تنبؤات الدالة الموجية متعددة الأجسام Ψ لميكانيكا الكم (في ضوء التفسير الاحتمالي المعتاد)؛ بمعنى، التنبؤ بأن $|\Psi|^2$ تناظر التوزيع الشحني المكاني داخل الذرة. هذا التناظر التام بين الكهروديناميكا الكلاسيكية وميكانيكا الكم يكمن في التصوير الراجح لبنية ما دون الذرة؛ أي في الكتب الأصلية للتدريس، وكاستخدام الميكروسكوب الإلكتروني.

إن التشابه بين الكهروديناميكا في الحيوذ، وميكانيكا الكم في التشتت له تداعيات مهمة متصلة بالموجه المُساعد. فالتشابه مع الميكروسكوب الإلكتروني يجعل من الممكن تعريف التحليل المكاني لتجربة تشتت مع جسيمات مشحونة؛ إذ إنه طبقاً لميكانيكا الكم، يكون التحليل المكاني لتجربة

تشتت محدودًا بالطول الموجي "لدى برولى" للجسيمات المسبارة. فالقيم أقل من الطول الموجي "لدى برولى"، لا تعدّ التركيبات المكانية قابلة للقياس. وهنا، يناظر التركيب المكاني غير القابل للقياس معامل شكل $F(q) \equiv 1$ ؛ أى، لمعادلة "رذرفورد" للتشتت. إن التمييز المكاني ΔR للميكروسكوب الضوئي يتناسب مع الطول الموجي للضوء λ :

$$\Delta R = A\lambda \quad (4.24)$$

والثابت A هنا يحتوى كميات خاصة بجهاز القياس مثل فتحة الميكروسكوب. والتمييز الفراغى يتناسب مع العدد الموجى $2\pi/\lambda$ للضوء. وبسبب التناظر التام بين حيود الموجات الكهرومغناطيسية والتشتت الكمى عند توزيع شحنى فراغى، فالتمييز الفراغى لإلكترون ميكروسكوب أو تجربة تشتت يكون بالتشابه مع المعادلة (4.24)، متناسبًا مع الطول الموجي "لدى برولى" λ . كما يتناسب مع كمية الحركة $hk/2\pi$ للجسيمات المشحونة وفى نطاق النسبوية، مع طاقة حركتها $E = pc$:

$$\Delta R \sim \frac{1}{p} \quad (4.25)$$

$$\Delta R \sim \frac{1}{E} \quad (4.26)$$

المعادلتان (4.25) و(4.26) توضحان العلاقة الرائدة بين زيادة طاقة الوابل وتحسن التمييز الفراغى المشار إليه آنفًا. على أن العلاقة النسبية (4.26) تكون صحيحة فقط فى محاور الإسناد الذى يختلفى فيه انتقال الطاقة بين الجسيمات المسبارة ومركز التشتيت؛ أى فى نظام

"برابيت"^(١). ففي محاور الإسناد هذه فقط يمكن تعميم التفسير الفراغى لمعاملات الشكل. فبرفع كمية الحركة وما يتبعها من طاقة لوابل الجسيمات فى تجربة تشتت عالية الطاقة، تصغر التركيبات الفراغية التى يمكن قياسها. هذا التعميم يودى إلى إمكانية النظر أعمق فأعمق داخل الذرة عند الطاقات العالية فالأعلى. وتتمشى هذه الإمكانية مع حقيقة أن "لا متغيرة" المقياس الذى يبين التركيبات النقطية أو تكوينات الكواركات داخل البروتون والنيوترون تم قياسها فقط عند طاقة تشتيت أعلى بكثير من الطاقة المتاحة "لهوفشتادر" فى قياساته لمعاملات الشكل فى الخمسينيات من القرن العشرين.

على أى حال، فالعلاقة اللانسبوية (4.25) بين التمييز الفراغى وكمية حركة الوابل لا علاقة لها بمبدأ عدم اليقين لـهايزنبرج. وبالمثل، فالعلاقة النسبوية (4.26) بين التمييز الفراغى وطاقة الوابل لا علاقة لها بنقطة التحول الكلاسيكية لتشتت "زرفورد"^(٢).

(١) المرجع Breit and Wheeler 1934 الفقرتان (٣-٤) و (٤-٤).

(٢) الشرطان $E=(1/2)mv^2$ and $C/r=E$ يعرفان نقطة التحول ($R=C/E$) للجسيمات المشحونة فى تشتت "زرفورد" الكلاسيكى. فى الصورة الكلاسيكية للجسيم من الممكن اعتبار نقطة التحول هذه الحجم المؤثر لمركز تشتت شبيه نقطى الذى تم تفسيره بجهد "كولومب" ($V=C/r$)؛ حيث إنها تعرف مقدار التوزيع الشحنى اللا شبيه النقطية والمؤدى إلى حيودات قابلة للقياس من معادلة "زرفورد" للتشتت. فإذا كان حجم التوزيع الشحنى الممتد أصغر كثيراً من الحجم المؤثر ($R=C/E$)، فإن مسارات الجسيمات المسبارة لا تقترب بدرجة كافية من مراكز التشتت؛ كى تودى إلى مثل هذه الحيودات. وفى بحثه عام ١٩١١، استنتج "زرفورد" الحدود القصوى لحجم النواة من هذه الاعتبارات. وفى هذا التوجه تعطى الكمية ($R=C/E$) التمييز الفراغى =

فى النهاية، ما الذى يجب أن نعتقه من هذا التشابه بين الحيود التقليدى وميكانيكا الكم للتشتت؟ فالتوزيع القطرى (ρ) الناتج من معاملات الشكل التى تم قياسها تقابل التوزيع الشحنى المقاسة باستخدام الميكروسكوب الإلكترونى، والأخير بالتالى يعمل تماماً كميكروسكوب ضوئى. وهذا التناظر يؤيد الاعتقاد التالى: إن التوزيع الشحنى: $\rho(r) = |\psi^V(r)|^2$ داخل ذرة مستدل عليه من معاملات شكل مقاسة فى تجربة تشتت لجسيمات مشحونة ليست أقل واقعية من التركيب الفراغى المشاهد من خلال ميكروسكوب. إنه ينتمى إلى الواقعية التجريبية، من حيث تركيب فراغى داخل الذرة.

هل هناك أى قطع فى تواصل المشاهدة فى استخدام أجهزة بصرية مثل العين المجردة أو العدسة المكبرة أو الميكروسكوب نزولاً إلى الميكروسكوب الإلكترونى وتجارب التشتت المستخدم فيها أشعة جاما أو جسيمات فيزياء الطاقة العالية؟ من وجهة نظر طبيعية يمكن أن يجادل الفرد كما يلى: فالمشاهدة بالعين المجردة تتبع قوانين هندسة البصريات. وبالتالى، إذا حدث قطع فى المشاهد، فلا بد أن يحدث عند حدود نهاية قوانين هندسة

=تشتت "ذر فوررد" الكلاسيكى. وعلى أى الأحوال فالاتفاق مع المعادلة (٢٦-٤) محض صدف. والعلاقة (٢٥-٤) كانت تسمى علاقة اللا تحديد لطاقة التشتت والتمييز الفراغى. وقد تم اشتقاقها من علاقة اللا تحديد للموضع وكمية الحركة. هذا المنطق الرائد للمعادلة (٢٥-٤) مزل على أى الأحوال. فلا توجد تجربة تشتت تؤدى إلى قياس موضع لمركز تشتت بالمفهوم المعتاد، بالإضافة إلى أن المعادلة (٢٥-٤) لا تتبع من ميكانيكا الكم. إنها تسوق من البصريات الموجية وتشابها مع ميكانيكا الكم للتشتت الذى يؤدى إلى صلابة المعادلة (٢٥-٤) مقابل تغيرات بين النماذج المتباينة للتشتت.

البصريات وعندما تكون صورة تركيب فراغى معين قد أتت نتيجة التأثيرات المعقدة للحيود. وفي هذه الحالة، يجب الفصل بين العدسة المكبرة والميكروسكوب الضوئى. ولكن هذا سوف يعنى أن الميكروبات وغيرها مما يشاهد فى قطرة ماء خلال ميكروسكوب لا ينتمى إلى الواقعية التجريبية^(١). وبذلك، فإذا لم يرغب الفرد فى عمل هذا الفصل، فعليه أن يقرّ بأن بنية ما دون الذرة التى تم فحصها بوابل الجسيمات فى ميكروسكوبات إلكترونية أو معجلات الجسيمات هى واقع كالأجسام المرئية والأفراد فى صورة فوتوغرافية. وبالتماثل، فالأخير لا يؤدي إلى إدراك فورى؛ بل إلى أمثلة حقيقية على مقياس آخر (من خلال بعدين ومنظور).

٤-٦ النظر داخل الذرة

دعنا نستعيد نتائج الباب الثانى فى هذه النقطة. فمن خلال وجهة نظر معتق للمذهب التجريبى (مثل ذلك الذى تبناه "فان فراسن")^(٢). تكون المشاهدة مقيدة بالإدراك الحسى. وحيث إن وجهة النظر هذه مخالفة لطرق العلم الحديثة، فيجب توظيف نظرة عامة حتى نأخذ فى الاعتبار ما الذى يحسب كمشاهدة فى الفيزياء. إن المفهوم العمومى الذى ظهر فى الجزء (5-2)، لا يؤيد الخلاصة التى تم الوصول إليها آنفاً. ولقد اقترحنا شرطين واجبيين لمشاهدة جسم فيزيائى أو نظام x : أ- كميات فيزيائية مميزة للنظام x ممكن قياسها و ب- إنهما يمكن نسبتهما للنظام x على أساس واقعة عليّة فردية.

(١) انظر المناقشة التعليمية للرؤية خلال الميكروسكوب فى المرجع. Pais 1986, 73-74.

(٢) مرجع Van Fraassen 1980.

وفى الحقيقة، فإن قياس التركيب النقطى واللا نقطى فى تجربة تشتت لا يمكن حسابه كمشاهدة لمراكز تشتت أو تركيباتها الفراغية فى هذا التوجّه. أما الشرط الثانى فمنتك. فلا يمكن تقصى أثر مقطع مقياس حتى سببه الفردى. فلا واقعة عليّة تربط معامل شكل مقياس أو دالة تركيب بالسبب ورائها. فمحاولة إخبار واقعة عليّة فردية عن مركز تشتت، مصيرها الفشل. والسبب فى ذلك ليس فى أن التشتت يتبع قوانين ميكانيكا الكم وأن ميكانيكا الكم ذات معنى احتمالى. فهناك تشابه تام بين حيود وابل الأجسام وحيود الضوء. فالضوء الذى يحيد فى الميكروسكوب يجعل الجسم المفرد مرئياً. وبالطريقة نفسها تماماً، يفحص وابل الجسيمات فى الميكروسكوب الإلكتروني شيئاً فردياً. وبهذه الطريقة، تم جعل التركيب الشحنى لنرة مفردة مرئياً على مقياس "النانو". فى تجربة تشتت، على أي حال، لا يحيد وابل الجسيمات عند مركز تشتت مفرد؛ بل عند كتلة مادية. فمقطع "زرفورد" لم يتم قياسه بتشتت جسيمات ألفا عند نرة ذهب؛ بل عند رقيقة ذهب. وفى قياس "هوفشتر" لمعاملات الشكل للبروتون والنيوترون، قد تم قياسها من تشتت وابل إلكترونات عند هدف كبير. والواقعة العلية التى يمكن أن تذكر حول مقطع مقياس هى مجرد تأثير كلى لهدف ماكروسكوبى على وابل الجسيمات.

وحول تأثير الذرات الفردية أو تركيب ما دون النرة على الوابل، فلا توجد وقائع عليّة فردية يمكن أن تذكر. وكل ما يمكن ذكره هو آثار مسارات الجسيمات ووقائع التشتت التى تسهم فى قياس مقطع. تلك الوقائع العلية تم ذكرها فى الحقيقة بدلالة قوانين الحفظ ومجموع قواعد الكميات الديناميكية؛

مثل الكتلة والشحنة والمغزلية... إلخ. إنها لا تدعم علياً ولكن تدعم تعليل (الجزء - كل) لمراكز تشتيت ما دون الذرة^(١). ومن هنا، فالتشابه بين حيود الضوء وحيود وابل الإلكترونات لا يعمل عند مستوى أمثلة تركيبات فردية لما دون الذرة. في تجربة تشتت عالية الطاقة، فإن التركيبات لما دون الذرة لا تلاحظ بوجه عام. ويستدل عليها من المقاطع المقاسة على أسس نظرية يتم شرحها في هذا الباب. وبوابل الجسيمات المتولدة في المعجلات لا يمكن للفرد أن ينظر إلى الذرة، ولا يمكن أن يرى تركيبات ما دون الذرة ولا يلاحظ التركيبات النقطية داخل النويد. فهذا الحديث هو درب من المجاز^(٢) والشيء الوحيد الذي يجعل وابل الجسيمات مرئياً هو تركيب الهدف الماكروسكوبي. (وفي الحقيقة ومنذ عشرين عاماً مضت استعمل بعض أعضاء شراكة CDHS وابل النيوتريونات لتجربة التشتت CDHS لأخذ صورة لذرة الهيدروجين. وكان متوقفاً؛ حيث جعل وابل النيوتريونات جدران الخزان أحسن رؤية من الغاز في داخله وقد عرضت هذه الصورة على سبيل الدعابة في إحدى المقابلات. وقد خدمت بشكل قاطع ببيان أن التجربة كانت ذات كفاءة كافية لقياس أى مقطع لنيوترينو على الهيدروجين). وعلى كل حال، فالصورة نصف الكلاسيكية لواقعية ما دون الذرة التي تم الحصول عليها من معاملات الشكل ودوال التركيب هي بنائية أو إنشائية (وتظل كذلك). ويرتكز هذا الإنشاء لواقعية ما دون الذرة على الأوتاد النظرية الأربعة الآتية:

(١) انظر الباب السابع.

(٢) لقد جذب انتباه "فوكس" عام ٢٠٠٦ إلى هذه النقطة. وفي تباين واضح مع "فولكنبرج" ١٩٩٥، لم أعد أزعم أن تجارب التشتت هي مشاهدات في رؤية "شابر".

أ) "لا متغيرة" الأبعاد:

إن فرض ما وراء النظرية بأن قوانين الطبيعة ثابتة بعددًا هو مبدأ "لا متغيرة" عام في الفيزياء. وكباقي المبادئ المتماثلة العديدة فهو يعمل كأداة للتوحيد أن "اللا متغير" البعدى هو شرط ضروري لإسناد الكميات مثل الكتلة وكمية الحركة والشحنة إلى كيانات على المقياس الميكروسكوبى^(١).

ب) التناظر:

إن التناظر بين التشتت التقليدى ونماذج ميكانيكا الكم للتشتت مبنى على العلاقات النظرية البنينة السابقة. وفي الحقيقة، هذا التناظر له وجهان وميكانيكا كم للتشتت عند جهد تقليدى هو تشابه سابق تام مع حيود الموجة الضوئية الكلاسيكية. وجهد "كولوم"، هو تناظر تام مع معادلة "رذرفورد" للجسيمات المشحونة التقليدية.

ج) النقطة:

إن مفهوم النقطة يرتكز على استدلال من "لا متغيرة" المقياس لمقطع فعلى للتركيب شبيه النقطة لمركز تشتيت لا تركيبى. وطبقاً لذلك فالوابل ذو الطاقة الأعلى يؤدي إلى تحسن في التمييز الفراغى. و"اللا متغير" البعدى يؤدي إلى التحليل البعدى. وطبقاً لذلك، فاستقلال الطاقة لمقطع لا بعدى يدل على مركز تشتيت نقطى.

(١) انظر المرجع Krantz et. al. 1971. الباب العاشر وملحوظاتي فى الفقرتين (٥-٤)

و(٥-٥).

د) معاملات الشكل:

إن تعريف معامل الشكل هو نصف تقليدي فمعاملات الشكل تصف انحرافات المقاطع المقاسة من تشتت "ذرפורد" أو تعميماتها النسبية؛ وهي يمكن تفسيرها بدلالة توزيعات شحنية لمراكز تشتت لا نقطى. وفي الحالة النسبوية، بأي حال، يكون التفسير صحيحاً فقط لمحاور إسناد "برايت" التى يختفى فيها انتقال طاقة التشتت.

إن إنشائية واقعية ما دون الذرة تصاغ بدلالة معاملات الشكل ودوال التركيب. (التركيب نقطى، فمعامل الشكل = 1). وكما رأينا في الأجزاء السابقة، فإن تعريف تركيبات ما دون الذرة بهذه الاصطلاحات هي نسبية لعدة اعتبارات؛ إذ إن تركيبات ما دون الذرة قد تم تعريفها نسبةً إلى طاقة التشتت أولاً، ثم محاور نسبية ثانياً، ثم نموذج تشتت نقطى ثالثاً، ثم درجة الاضطراب رابعاً.

والتفسير الفراغى لمعاملات الشكل مقيد بميكانيكا الكم النسبوية في تقريب الكتلة اللانهائية ولتقريب "بورن". ولأسباب واضحة، فالجسيمات المسبارة لقياس معامل شكل يجب أيضاً اختيارها بحيث لا تحدث تأثيرات كمية بحتة (لا تأثيرات متبادلة ولا تشتت لجسيمات متماثلة ولا تأثيرات مغزلية). وهكذا، فالإنشاء الفراغى نصف التقليدي لتركيبات ما دون الذرة يصلح فقط إذا كان للتشتت تناظراً تقليدياً. وفيما وراء التناظر لحالة كلاسيكية، فإن مفهوم التركيب الفراغى يجب أن يستبدل بمفهوم تصورى للتركيبات الكهرومغناطيسية. هذا المفهوم يمكن تعميمه ليشمل تفاعلات أخرى؛ أى، تركيبات ديناميكية بوجه عام. على أي حال؛ أى تفسير لكتلتنا

التركيبات يجب أن يأخذ في الاعتبار أنها كيانات علائقية. إنها تسلك تركيبات ثابتة فقط في مدى معين من الطاقة. وبزيادة طاقة التشتت للجسيمات المسبارة، تتغير التركيبات المسبورة. فهي ليست "ديكارتية" كما يجب أن تكون؛ حيث نتواجد مستقلة عن أية تفاعلات. هي بالأحرى تشبه هدفًا زجاجيًا رقيقًا يتم سبره بكرات بلياردو. وفي طاقة التشتت المنخفضة، يصح الزجاج. وفي طاقة التشتت العالية فإنه ينكسر مبدئيًا سلوك تشتت مختلف تمامًا.

لقد صار الجدل في الفقرات السابقة على أن الحديث الشائع عن "النظر داخل الذرة" بمساعدة وابل جسيمات ذات طاقة عالية، هو مجرد مجاز. فمن باب المجاز يمكن أن نقول: بواسطة معجل الجسيمات، يرى الفرد بنية تركيبات ديناميكية لما دون الذرة داخل أهداف تجارب تشتت. وباستخدام تعبير التشابه، يمكن رؤيتهم كما يرون بميكروسكوب. وكلما ارتفعت طاقة التشتت صغرت التركيبات التي يمكن مشاهدتها. فالمشاهدة هي كل ما هنالك وزيادة المصدقية يقابلها تحسن في الشروط شبه التقليدية التي تقنع تشتت "ذر فوررد"؛ أي تحسن في التناظر مع الحالة التقليدية. ومن بعد ذلك التناظر، تصبح المشاهدة الوثيقة أسوأ فأسوأ. وفي نطاق نظرية المجال الكمي النسبوية يعطى إنشاؤنا بالضرورة الواقعية الفيزيائية صورة مشوهة لبنية ما دون الذرة. إنها ببساطة تجعلنا ننظر إلى الذرة من خلال نظارات خاطئة. ولسوء الحظ، فليس لنا من الأدوات أفضل من ذلك.

القياس ووحدة الفيزياء

لقد أوضحت الأبواب السابقة أن نظرية القياس للجسيمات الحالية قد فرضت ملمحين من الملامح؛ أولهما؛ أنها غير متجانسة. وبتعبير "تانسي كارترت"، هي لها تركيب تدرّجى^(١). إنها تجمع القوانين النسبوية وغير النسبوية من الفيزياء الكلاسيكية والعديد من نظريات الكم. ثانيهما؛ أنها قد بنيت على مبادئ موحدة قوية. فإنشاء مقاييس الطول والزمن والكتلة يعطي على الأقل دلالة لفظية للوحدة في الفيزياء. واستخدام مثل هذه النظرية لقياس غير متجانس ليس طحيماً في طاحونة "تانسي كارترت". وقد تأسست على الثقة في وحدة مخفية في الفيزياء. في هذا الباب سوف أبحث في الفروض الإرشادية والمبادئ الموحدة خلف هذا الوثوق.

إن التركيب المتفكك لنظريات الكم الجارية ونظرياتها للقياس ترجع إلى مشكلة القياس الكمي. وحتى هذا اليوم لا توجد نظرية كمية للقياس تصل الفجوة المبررة بين دالة موجية الكم الميكانيكي Ψ ونتائج القياس الفردية^(٢).

(١) انظر 1999 Cartwright.

(٢) في نظرية الكم للقياس، تسمى هذه الفجوة التفسيرية "مشكلة إضفاء الموضوعية" Objectification Problem، انظر بوش وآخرين 1991، ص 75-83، ص 99-137، ومينلتشيت 1998، ص 65-102.

وفي المرحلة الراهنة لميكانيكا الكم فإن هذه الفجوة المبررة تبدو غير قابلة للاختزال. وأية محاولات لإغلاقها تواجه عقبات كبيرة أقصاها هي علاقة اختزال الدالة الموجية إلى "لا متغيرة" "لورنس". وفي الحقيقة فالتفسيرات الفلسفية الجارية لنظرية الكم التي تهدف إلى إغلاق الفجوة لا تستطيع أن تتماشى مع نظرية مجال الكم النسبوية. وبالإضافة إلى ذلك، فهي تنتهك مبدأ الأنطولوجيا. ومن أجل إعادة تأسيس نوع من الواقعية غير النقدية، فعليهم ابتكار بُنى غير تجريبية غير اعتيادية^(١).

وطالما أنه ليس ثمة مخرج من هذا الشقاق، فمن المفيد تطويع بعض الأفكار الصارمة لـ"نيلز بور" في فلسفة الكم وخاصة نظريته للغة في الفيزياء. فادعاء "بور" هو أن اللغة التقليدية لا غنى عنها. ولقد استمر ذلك صحيحًا حتى يومنا هذا. وعلى المستوى الفردي للنقرات في كشافات الجسيمات ومسارات الجسيمات في الصور الفوتوغرافية، فكل نتائج القياسات يجب أن تصاغ باصطلاحات كلاسيكية.

وفي الحقيقة، فإن استخدام الكميات الفيزيائية الشائعة: الطول والزمن والكتلة وكمية الحركة والطاقة، لمقياس ما دون الذرة، يرجع إلى امتداد اللغة

(١) في هذا الصدد ينتقد "بنتام" ١٩٩٠، ١٠-١٤، نظرية "بوهم" في المتغيرات الخفية وتفسير العوالم المتعددة لـ"إيفرت" كمحاولات لإنقاذ الواقعية الميتافيزيقية الكلاسيكية. ابتكر الأخير حشدًا من العوالم المتوازية التي تتولد بقياسات في عالم الكم المتشعب. ويعيد الأسبق تأسيس مسارات الجسيمات ويفترض جهدًا غير موضعي يؤدي إلى الفعل عن بعد. وهذا يخالف مبدأ اللا تغير لـ"لورنتز". ومع ذلك يتعرض هذا المبدأ للانتهاك من قبل نظريات الانهيار التي تفتقر إلى مثل هذه البنية الميتافيزيقية الزائدة.

في الفيزياء الكلاسيكية إلى النطاق غير التقليدي. ولكن نظرية الكم أيضًا لا غنى عنها. فدونها لن يكون من الممكن وجود قياسات بالغة التحديد لفيزياء الجسيمات. ونظرية الكم تنطبق على مستوى النظرة الشاملة لقياس المقاطع والتوافقيات ومعاملات الشكل.... إلى آخره.

وأمام هذا الشقاق النظري تصبح هناك مشكلة فرض دلالات لفظية على مقياس كبير وعلى مقياس صغير. وعلى أية حال، فنظرية القياس لفيزياء الجسيمات الحالية تفعل ذلك تمامًا. وهكذا تحتوي مشكلات عدم التناسب في توجه "توماس س. كون" إنها تجمع عدم التناسب في القوانين الكمية والتقليدية^(١). كيف يعمل ذلك؟ من الواضح أن عدم التناسب هو قضية فلسفية، إنها لم تعتمد استخدام قوانين القياس في الفيزياء العملية. وفي كثير من المجالات في الفيزياء الراهنة يجمع الفيزيائيون التوصيفات الكلاسيكية والكمية ويسمون النماذج الناتجة شبه تقليدية. وعلى ذلك، فعدم التناسب هو مجرد قضية فلسفية؟ إن الإجابة الظاهرية هي بالنفي. إنها تصعد السؤال ما إذا كان ولماذا يكون التجريب المعتاد لتمديد الكميات التقليدية المعروفة إلى نطاق ما دون الذرة، أمرًا منطقيًا؟ وأي إجابة يجب أن تعطي بدلالة مفاهيم فيزيائية.

وفي النطاق الكمي، يكمن مفتاح حل مشكلة اللا مقياسية في فهم أن الجوانب الإجرائية والبدئية والمرجعية للمفاهيم الفيزيائية مآلها الفشل. ومع ذلك، فمن وجهه النظر البدئية نجد ما تنتمي إلى بعضها البعض. وبعد الإشارة إلى ذلك على سبيل المبدأ في الفقرة (٥-١)، سوف أقوم بتحليل

(١) المرجعان Kuhn 1962 و Kuhn 1970.

نظرية القياسات غير المتجانسة لفيزياء الجسيمات. إنها تعكس التركيب الطبقي للظواهر التي تم عرضها في الفصل الثالث. إن الطبقات تتصل ببعضها من خلال مقاييس الطول والزمن والكتلة. لقد تهمت شرعنة هذه الروابط منطقية من خلال مبدأ تعميمي للتناظر يُضفي ترابطاً وتكراراً على نظرية القياس غير المتجانس في فيزياء الجسيمات فقرة (٥-٢). على أية حال، لا يزال الغموض يكتنف مسألة ما إذا كان التناظر بين التوصيفات الكلاسيكية والكمية يبقى على مستوى مسارات الجسيم الفردية. إن تحليل بيانات تجارب تشتت الطاقة العالية تجمع قوانين كلاسيكية وكمية بطريقة بالغة التميز. لقد أضيفت تصحيحات كمية احتمالية لقوانين تقليدية وهي بدورها قد طبقت على آثار مسارات فردية. كيف يعمل هذا؟ سوف نرى كما رأينا في حالة معاملات الشكل سلسلة من النماذج تبنى تناظراً بين حسابات كمية وصوراً كلاسيكية فقرة (٥-٣).

وفي الحقيقة، إن العديد من المبادئ الموحدة تدعم نظريات القياس لفيزياء الجسيمات وتطبيق نظريات الكم على آثار مسارات الجسيمات ووقائع التشتت. ويتخللهم مبدأ تناظر عمومي اقترحه "هايزنبرج" عام ١٩٣٠، وهو "تماثلات وما يقابلها من قوانين حفظ" ومبدأ أن قوانين الفيزياء ثابتة بعدياً. والمبدأ الأخير مبدأ قوى؛ إذ يعود إليه إنشاء المقاييس للكميات الفيزيائية والطريقة الإرشادية في التحليل البعدى. كل هذه المبادئ الموحدة تعمل من رأسها حتى قدمها في تعارض واضح مع منهج اللاتماثل الذي يعطي شرحاً من أخمص القدمين حتى الرأس، على الرغم من أنها فقط على المستوى الاحتمالي فقرة (٥-٤). وعلى كل، فهذه المبادئ تجعل من الممكن أن ننشئ

مقاييس للكميات الفيزيائية. عندئذ، نواجه للمرة الثانية جدلية مبدأ الإنشائية. إن وحدة مقاييس الطول والزمن والكتلة هي بناء النظرية. ولكن هل هي مجرد بناء (فقرة ٥-٥)؟ هنا تكثرث الأسئلة الصارمة بالمدلولات اللفظية. فعلى المستوى الاحتمالي تتسق المدلولات اللفظية على نحو صارم مع نظرية الكم. وعلى مستوى آثار مسارات جسيمات فردية وأحداث التشنت فشرط المدلولات اللفظية الأضعف هي التي تم استيفاؤها، وفي الحقيقة، هناك حاجة للتناظر كجسر مبدئي يجعل من الممكن تطبيق نظرية الكم على النظم الفردية.

١-٥ اللامقاييسية والقياس

كيف يمكن أن ننشئ لغة فيزيائية موحدة تتغلب على الشقاق اللفظي للنظريات غير المتوافقة؟ طبقاً لوجهة نظر "توماس كون" في الثورات العلمية، فالنظريات الداخلة في قياس جسيمات ما دون الذرة تتميز باللامقاييسية. إن قياس جسيمات ما دون الذرة الذي بدأ مع قياس النسبة التقليدية (الشحنة إلى الكتلة) بواسطة "طومسون"؛ أى قبل أن تلوح في الأفق ثورة الكم. فطرق القياس التقليدية ونتائجها أدت إلى ثورة الكم. ولكن العديد من قوانين من طرق القياس التقليدية أبقت على ثورة الكم وأضيفت إليها قوانين كمية جديدة بدلاً من استبدالها. وعلى مستوى الممارسة الفيزيائية فإن النظريات المنافسة للامقاييسية كون لا تمثل في واقع الأمر منافسة تُذكر. وعلى العكس تماماً، لقد ظلت حية في تعايش سلمى على مر عقود من الزمان.

بُنيت فرضية كون في اللا مقياسية على التماثل بين الرياضيات والعلم التجريبي. فهو يزعم أن النظريات المتنافسة التي تختلف في التركيب ليس لها قياس مشترك. وهم في لا مقياسيتهم كالزاوية القائمة والوتر في المثلث القائم الزاوية. وإذا أخذنا المصطلح "قياس" على جانب الفيزياء لهذا التماثل حرفياً، فمن الممكن أن نربطه بمعنى الكميات الفيزيائية المعرفة ضمناً بواسطة قوانين نظريات بديهية متنافسة. ومن وجهة نظر بديهية، فإن الممارسة التجريبية لدمج قوانين تُستمد من نظريات لا مقياسية أمر بعيد عن الوضوح.

وطبقاً لكون، فاللا مقياسية لها ثلاثة أوجه: تغير في القضايا التي يحاول العلماء حلها، وتغير في معنى المفاهيم النظرية البالغة الأهمية وتغير في العالم الذي يتم فيه تجريب العلم. وهنا سوف نهتم بتغير المعنى وما يرتبط به من قضايا انتقالية ركز عليها كتاب "كون" عام ١٩٦٩^(١). إن النظريات المتنافسة ترتبط بنظم تختلف في تصنيفاتها في اعتبارها للظواهر. وفي الحقيقة، فقد رأينا في الباب الثاني أن كل ظواهر الفيزياء الحديثة هي بالفعل قد تأسست بنظرية ما. ولنرجع إلى مناقشة مسارات الجسيمات. ففي الميكانيكا التقليدية تحسب على أنها تجريبية. (تمثل مسارات الأجسام السماوية أفضل تجسيد لها) وفي ميكانيكا الكم لا تحسب كذلك: إن آثار مسار جسيم ليس إلا تتابع قياسات مواضع. إن "كون" محق تماماً في الزعم أنه من الممكن جزئياً فقط التواصل بلغة متعادلة حول دليل مشاهد أو تجريبي.

(١) المرجع Kuhn 1970. ص (١٩٨-٢٠٤) مقارنة بالصفحات (١٤٨-١٥٠) وانظر

أيضاً ص (٢٠٦-٢٢٢) من المرجع. Hoyoingen - Huene 1993.

وباتباع عمل "كوبن" عن النسبوية الأنطولوجية، فهو يجادل في أنه نتيجة للمفهوم المعتاد (التارسكي) للحقيقة كمقابل لما هو "موجود بالفعل" أمر لا يمكن الاستمرار في الدفاع عنه^(١). وفي الحقيقة، فإن أى تغير جوهرى فى الأسس المفهومة لفرع من فروع المعرفة يثير قضايا مهمة للواقعية العلمية وأهم ما فى هذه القضايا هو ما نحن بصدد تناوله هنا، فقضايا علم الوجود قد ظهرت بثورة الكم. إن اللا مقياسية تحاجّ الواقعية العلمية عامة بإنكار إمكانية وجود لغة علمية فريدة. فإذا لم يكن هناك لغة يمكن بها عبور الفجوة بين النظريات المتنافسة، يكون "كون" محقاً فى زعمه أنه ليس ثمة إمكانية لتفسير أى النظريات تشير إلى الحقيقة ولا تفسير لماذا تكون إحداها أقرب من غيرها للحقيقة.

إن قوانين الفيزياء التقليدية ونظرية الكم يختلفان اختلافاً بيناً فى المدلولات اللفظية الفيزيائية. فالمدلولات اللفظية للفيزياء التقليدية مرتبطة بالمقاييس المعروفة للطول والزمن والكتلة. والمدلولات اللفظية لنظرية الكم مرتبطة بالتفسير الاحتمالى الأدنى غير المثير للجدل، والذى طبقاً له يكون المعنى الفيزيائى فقط لدالة الموجة فى ميكانيكا الكم (أو المحتوى التجريبيى للنظرية) يقع فى القيم المتوقعة لمشاهدات ميكانيكا الكم. هذا الخلاف فى المدلولات اللفظية له نتائج وجودية مهمة. ولإيضاح الأمور فالمدلولات اللفظية وعلم الوجود يجب أن تتباين كما يلى.

(١) انظر كوبن ١٩٧٠، ص ٢٠٦: "أعتقد أنه ما من سبيل مستقل عن النظرية يؤدي إلى إنشاء عبارات من قبيل "واقعياً هناك"؛ ففكرة الانسجام بين أنطولوجيا النظرية ونظيرها "الواقعي" فى الطبيعة يبدو لي الآن مضللاً من حيث المبدأ".

إن المدلولات اللفظية لنظرية فيزيائية هي المعنى الفيزيائي غير المثير للجدل لكمياتها. وهنا فالمصطلح "غير مثير للجدل" يتعلق بالمجتمع العلمي للفيزياء وبالتجريب الفيزيائي بالإضافة إلى الممارسة التقنية. (المعنى المتفق عليه للكميات الفيزيائية مُدرج في النظام الدولي للوحدات الفيزيائية). إن المدلولات اللفظية تشمل المزاعم الميتافيزيقية الأضعف من الأنطولوجية.

إن علم الوجود لنظرية فيزيائية هو النطاق الذي يقترحه وأنواع الكيانات التي يرجع إليها^(١). وعلم الوجود في الفيزياء الكلاسيكية يتكون من جسيمات وموجات في الفراغ والزمان. وعلم الوجود في فيزياء الكمّ غير واضح. وطبقاً للتفسير الاحتمالي الأدنى فعلم الوجود لنظرية الكم ليس إلا دوال موجية احتمالية وقيم نظرية توقعية كمية تعبر عن احتمالات مشروطة. ومقارنة بجسيمات كلاسيكية أو موجات فهذا وجود ضعيف. ولذلك ويتجاوز التفسير الأدنى غير المثير للجدل، فعلم الوجود لنظرية الكم عرضة لجدل غير منته في تفسير دالة الموجة لميكانيكا الكم ولتنوع مذهل في تكوين وجودى مخترع^(٢). وهناك اختلاف شكلي حاد يقابل اختلافات مدلولات الألفاظ في النظريات الكلاسيكية والكمية. إن كميات الفيزياء الكلاسيكية يتم تمثيلها بدوال حقيقية القيمة ولكن الكميات في ميكانيكا الكم يتم تمثيلها بمعامل قيم مقاسة^(٣). وتجريبياً، ترجع الكميات الكلاسيكية لنظريات فردية ولكن

(١) يقابل هذا تفسير "كواين" للأنطولوجيا. وفقاً لكواين أن توجد هو أن تكون قيمة لمتغير مُتعين؛ انظر كواين ١٩٥٣، ص ١٥.

(٢) انظر الملحوظة ١ عاليه.

(٣) انظر على سبيل المثال: بوش وآخرون، ١٩٩١، ص ١٠-١١.

مشاهدات ميكانيكا الكم ترجع إلى تجميعات احتمالية؛ أى إلى نتائج قياس عديدة تم الحصول عليها تحت الشروط العملية نفسها وبالطبع فإن هذا الخلاف فى المدلول بين النظريات يتحول إلى قوانين القياس للنظريتين. وبالطبع فهذا الخلاف فى المدلول هو حالة قوية من اللا مقياسية فى رؤية "كون"^(١). وفى الحقيقة، سوف نرى فيما يلى أن هذا هو العائق الأساسى لوحودية المدلول فى الفيزياء.

هل اللا مقياسية بهذه التداعيات الدرامية حقيقية؟ يتفق معظم الفيزيائيين على أن تغييراً فى أسس المفاهيم فى العلم يغير نظرة عالمنا تغييراً درامياً. ولكن معظمهم لن يتفق أبداً على أن الثورات النظرية تستبعد وجود مصطلحات بها يمكن صياغة التغيير فى المفاهيم الفيزيائية وبها يمكن مقارنة التداعيات التجريبية للنظريات. ولقد كتب "ريتشارد ب. فينمان" (الذى لا يشك فرد فى أنه تأثر كثيراً بفلسفة العلم الاحترافية) عن التغيير فى معنى الكتلة عند التحول إلى الميكانيكا النسبوية:

"[...]" نحن مخطئون تماماً من وجهة النظر الفلسفية فيما يتعلق بالقانون التجريبي. ويتعين أن تتغير صورتنا عن العالم بأسرها حتى إن كان تغير الكتلة طفيفاً [...] فحتى الأثر الصغير أحياناً ما يتطلب تغيرات عميقة فى أفكارنا"^(٢).

تؤكد هذه الكلمات فرضية "كون" فى اللا مقياسية جزئياً فحسب.

(١) انظر شايبه ١٩٩٩، ص ١٧٤.

(٢) فينمان وآخرون، ١٩٦٣-١٩٦٥، المجلد الأول، ص ١-٢.

ويُفرّق "فينمان" بين المضمون الفلسفي لقانون ما ولغة الفيزياء التي يتم استخدامها للتعبير عنه. وعلى غرار "كون"، يؤكد فينمان أن منظورات العالم المرتبطة بالميكانيكا اللانسبوية والنسبية الخاصة مختلفة تمامًا، حتى إن كانت القوانين المتكافئة تُستمد من كلتا النظريتين بشكل تقريبي. ومن جهة أخرى، فهو يتحدث عن الكتلة التي تتعرض إلى تغير صغير في المقدار عندما نعبر من الوصف اللانسبوي إلى الوصف النسبوي للحركة. ويخبرنا تفسير "كون" للثورة العلمية أن هذه الأوصاف تستند إلى مفاهيم لا مقياسية. فالكتلة اللانسبوية ثابتة في حين أن الكتلة النسبية تعتمد على سرعتها في إطار محكوم بالقصور الذاتي. وبالتالي فقد يرتاب المرء في أن "فينمان" حين الحديث عن الكتلة يستخدم المفهوم استخدامًا مبهمًا.

وفي الممارسة العلمية، على أي حال، يبدو المفهوم أنهما يعملان بتوافق سابق التجهيز. لقد دأب الفيزيائيون على استخدام المفاهيم اللانسبوية والمفاهيم النسبوية للكتلة على مرّ عقود دون اصطدام بارتباك أو بخلطٍ وغالبًا ما يستخدمون المفهومين في آن واحد. وحتى في إطار الثورة الكمية، تتغلب الممارسة العلمية بشكل ما على قضايا المدلول التي تأتي باللا مقياسية في أن نظرية القياسات الجارية في فيزياء الجسيمات تربط القوانين اللانسبوية والنسبوية والكلاسيكية والكمية. إن مقياس الكتلة يغطي كل قيم الكتلة لأي جسم في البنية الذرية التحتية أو الميكروسكوبية أو في النطاق الكوني. يفترض الفيزيائيون أن المقياس يمثل طبقة من الخواص الفيزيائية لأشياء مادية وأجزائها. إنهم يعطون قيمًا لكتلة الإلكترونات وكرات البلياردو والنقوب السوداء. وهم إذ يفعلون ذلك يفترضون أن هذه الأرقام تمثل كميات فيزيائية قابلة للقياس.

وليس بالضرورة على أي حال أن نفسّر هذه الممارسة العلمية على أنها قضية في مواجهة رسالة "كون" في اللا مقياسية. وقد يستشهد الفرد ببحثه عام ١٩٦١ "وظيفة القياس في علم الفيزياء الحديث". فبمجرد أن تكون الظواهر قابلة للقياس، وجب أن يكون للنظريات المتنافسة محتوى تجريبيًا متشابهًا على وجه التقريب. فتنبؤاتها الكمية يجب أن تتفق على وجه التقريب في العديد من الظواهر المشاهدة. إنها تتنافس فقط حول ما هو شاذ في النظريات المتنافسة. وهكذا طبقًا لوجهات نظر "كون" فقد وضعت القياسات قيودًا شديدة القوة على تطور النظرية. فنتائج القياسات ترغم التنبؤات الكمية للنظريات التي تتميز باللا مقياسية على الاقتراب من بعضها البعض قدر الإمكان. وبالتأكيد هو لن يقول: إن على النظريات أن تقترب من الحقيقة.

لقد أصاب "كون" في اللا مقياسية وعلى أغلب الاحتمال في خداع الحقيقة بالنظريات التي اكتمل نضجها. ولكنه على أي حال يقلل في تقديره للقدرة الموحدة للغة التي تصاغ بها القياسات. وهناك من وراء القياس ما هو أكثر من النظم البديهية وعدم اكتمالها المنطقي وأعدادها الكمية المتوافقة. إن للقياسات جوانب إجرائية وبديهية ومرجعية لا يمكن فصلها عن بعضها البعض كما أوضحت نظرية القياس التجريبية^(١):

(١) انظر كراننس وآخرون ١٩٧١. إن نظرية القياس التجريبي بوصفها كذلك محايدة من الناحية الميتافيزيقية؛ انظر فالكينبورج ١٩٩٧، والملحق (أ). إنها نظرية بديهية تتعامل مع البنية الصورية التجميعية للعمليات التجريبية. وفي المقابل إنها تؤدي الى ظهور نظرية القياس المُجرد التي تمثل الآن فرعًا من الرياضيات التطبيقية؛ انظر نارينز ١٩٨٥.

١- إن لها أساساً عملياً يؤدي إلى ترتيب تجريبي واضح المعالم للظواهر.

٢- إنها تعتمد على البديهيات التي لها من القوة ما يكفي لتحديد التمثيل العددي لهذا الترتيب.

٣- إنها تعطي انطباعاً عن الزعم المرجعي؛ لأن البديهيات وتمثيلها العددي يعبران عن الأسس الإجرائية بطريقة تجريبية مقبولة.

لقد جنحت وجهات النظر التقليدية حول معنى الكميات الفيزيائية إلى المبالغة في التأكيد أو التقليل من قدر هذه الجوانب للقياس. وبهذه الطريقة فقد خطت بخطوات ثابتة نحو نظرات ميتافيزيقية أحادية الجانب حول الكميات الفيزيائية. وهذا هو السبب وراء تفرقها بشكل جوهرى. إن تعاريف نيوتن للكتلة من حيث المبادئ كان مرجعياً، فقد عرف الكتلة على أنها حاصل ضرب الحجم فى الكثافة، ويعقل هذا الأمر فقط إذا كانت الكثافة معرفة بدلالة عدد الجسيمات الكتليّة فى وحدة الحجم. ومن الواضح أن هذا البيان يتجاوز أكثر المزامم المرجعية تواضعاً فى النظرية الحديثة للقياس التجريبي. إنها ترجع إلى الكيانات غير المشاهدة مثل الذرات. وعلى وجه الخصوص، فإن تعريف نيوتن للكتلة يستخدم ضمناً مبدأ لا تجريبياً وصولاً إلى أفضل البيان وهو المسمى بقانونه الثالث (قاعدة التعقل)^(١). وتقضى القاعدة رقم ٣ بأن الكميات الضخمة الموجودة فى كل الأجسام التى يمكن الوصول إليها تجريبياً ممكن أن تُعزى إلى كل الأجسام وكذلك إلى الأجزاء الصغيرة فى الأجسام وصولاً للذرات. وعلى النقيض، وطبقاً لتعليق "نيوتن" على المبدأ رقم ٣

(١) نيوتن ١٦٨٧، ص ٧٩٥-٧٩٦.

فالحجم والكتلة للأجسام الماكروسكوبية هما مجموع الحجم والكتلة للذرات التي تكون هذا الجسم. وهكذا في التحليل الأخير كان "نيوتن" يقترح أن تعرف الكتلة بدلالة وحدات ذرية وبرابطة حديثة وأن تعرف كتلة الأجسام بدلالة كتلة البروتون. إن تعريف الكتلة بدائرة المبادئ هو دائري فقط إذا كان مفهوم الكثافة الذي أسس عليه مستمداً من مرجع لعدد الذرات في حجم معين.

لقد كان "ماخ" على وعى بهذا عندما انتقد مفهوم "نيوتن" للكتلة^(١). فقد انتقد مبدأ "نيوتن" للذرة من وجهة نظر عالم تجريبي. فخلال عام ١٨٨٣ لم تكن الذرات محل مشاهدة بشكل دقيق ولا بشكل عام. لقد كان ذلك يتطلب تعريفات إجرائية واقترح أن تعرف الكتلة بدلالة العجلة المتبادلة الناتجة من الأجسام في نظام جاذبية.

وبينما يكون تعريف الكتلة مطلقاً إذا تم فهمه بدلالة الوحدات الذرية، فإن تعريف "ماخ" لها نسبي. إنه يعطى تعريفاً نسبياً للكتل فقط. لقد كان تعريف "ماخ" الإجرائي للكتلة نموذجاً لتعريف "أينشتين" الإجرائي "للتزامن" في بحثه الشهير عام ١٩٠٥ عن النسبية الخاصة. لقد تأثر بدوره، كل من "باولي" و"هايزنبرج" و"بور" في نظرتهم حول ميكانيكا الكم، بتعريفات "ماخ" و"أينشتين" الإجرائية؛ لقد صيغت ميكانيكا المصفوفات في مجرد اصطلاحات إجرائية؛ مثل الطاقة واستقطاب الضوء الذي تصدره الذرة. إن محاضرات "كومو" التي ألقاها "بور" هي التي وضعت أسس تفسير "كوبنهاجن" لميكانيكا

(١) انظر ماخ ١٨٨٣، ص ٢١٠-٢١١.

الكم كما يتضح فيها بجلاء، التوازي مع النسبية الخاصة لـ "أينشتين"^(١). وعلى أى حال، فكل من التعريفات الإجرائية قد تمت صياغتها بناء على قانون قياس ذات أسس بديهية، وإلا انتهى بنا المطاف إلى المبدأ الراديكالي (المتطرف) للإجرائية الذى طبقاً له يعرف كل قانون قياس مختلف كمية مختلفة^(٢). وسوف يؤدي هذا إلى شقاق كامل فى الفيزياء، ولن يكون من الممكن تعريف مقاييس لكميات فيزيائية. ولم يدافع "أينشتين" عن الإجرائية الصارمة. إنه لم يكن سعيداً بالأسس الإجرائية لميكانيكا الكم ولا بتفسير "كوبنهاجن". وبالمخالفة لميكانيكا المصفوفات لـ "هايزنبرج"، فقد زعم أنها يجب أن تكون النظرية هى التى تخبرنا بما يجب قياسه وليس بطريق آخر^(٣). لقد اعتقد أن النظرة البديهية لمفاهيم فيزيائية بدائية والتعريفات الإجرائية يجب أن تبنى عليها. ففى بحثه عام ١٩٠٥، عن النسبية الخاصة، قام ببناء تعريفه الإجرائي "للتزامن" على أساس المبدأ الرائد الذى كان يطلب المزيد من المناهج العامة من أجل توحيد الميكانيكا التقليدية والكهروديناميكا. لقد عمل متطلب التوحيد كقيد نظري يخبر الفرد بما يمكن قياسه من وجهة نظر أكثر عمومية، هى انتشار الضوء بدلاً من الحركات الميكانيكية للساعات. على أي حال، فالمنهاج البدهي الذى طوره "هلبرت" قد اقترح أن

(١) بور ١٩٢٨. يجب التنويه هنا أن تفسير "كوبنهاجن" يتكون من وجهات نظر فلسفية غير صورية قام كل من "بور" و"هايزنبرج" و"باولي" وغيرهم بربطها بميكانيكا الكم فى التفسير الاحتمالي المعتاد لبورن - فون نيومان. والأنسب تسمية الأخير بالنظرة الأرثوذكسية. علاوة على ذلك يجدر بنا أن نذكر أن ما يدعى تفسير كوبنهاجن يدين فى وجوده إلى هايزنبرج بأكثر مما يدين لبور نفسه؛ انظر هوارد ٢٠٠٢.

(2) Bridgman 1928.

(٣) انظر Heisenberg 1969, P. 91-92.

المفاهيم الخاصة لا يمكن تعريفها بالصراحة التي تم بها تعريف مبادئ "نيوتن"؛ بل تم تعريفها فقط بدلالة البديهيات⁽¹⁾. وطبقاً لذلك، فالمفاهيم الحركية للكتلة والقوة والسرعة والعجلة قد تم تعريفها ضمناً بواسطة بديهيات الميكانيكا التقليدية (قانوني "نيوتن" الثاني والثالث، وتوابعهما، ومعادلات "لاجرانج"، أو معادلات "هاملتون" للميكانيكا التحليلية)⁽²⁾. وأخذاً بكل ما سبق، فإن وجهات النظر هذه، مرة أخرى، توضح أن النظرة المرجعية أو البديهية مأخوذة، كل على حدة، هي متحيزة، وتربطها الممارسة الفيزيائية. إن القضية هي أنه حتى يومنا هذا، لا تزال الملامح المرجعية أو البديهية للمفاهيم الكمية متباعدة. بدا ذلك أولاً من خلال الأسس الإجرائية لميكانيكا المصفوفة لـ"هايزنبرج" وعدم اتفاق "أينشتين" معها. ولم تحل القضية منذ ذلك الوقت. وبالتحديد، فقد بقيت لمفاهيم فيزياء الجسيمات. إن أثر الخواص الفيزيائية في جسيمات ما دون الذرة لم تؤسس على نظرية موحدة؛ بل على العديد من النظريات غير الإجرائية. إن المفاهيم الحالية لجسيمات ما دون الذرة لها مظاهر بديهية تتحدر من نظرية مجال الكم، ومظاهر إجرائية تستند إلى قوانين قياس تقليدية وإلى جوانب مرجعية غير واضحة.

٥-٢ نظرية القياس غير المتجانسة

في حين تكون مشاهدة آثار مسارات الجسيمات على لوح فوتوغرافي ممكن أيضاً لـ"ليمان"، فإن تحليل بيناتها تستخدم نظرية قياس بالغة التعقيد. ونظرية القياس هذه اليوم هي تركيب غير متجانس لقوانين تنتمي إلى

(1) Hilbert 1918, Bernays 1922.

(2) انظر Schmidt 1993.

نظريات مختلفة فى بنائها وهى ذات لبّ تقليدى. إنها تتكون من قوانين ميكانيكا تقليدية نقطية ومتعلقات علم الحركة المجرّدة النسبوية التى تعمل على وصف مسارات الجسيمات. وعلى مستوى آثار مسارات الجسيمات الفردية، يضاف إلى اللبّ التقليدى لهذه الفروض، حول مسارات الجسيمات الفردية، تصحيحات كهروديناميكية كمية جاءت من احتمالات انتقالية لعمليات تشتت دون ذرية. ولقد تم تنقية نظرية القياس بقوانين الحفظ للمقادير الكمية مثل المغزلية و"النديّة" ونظير المغزلية، وعلى مستوى نظام تجميى، تندرج كل هذه القوانين فى نظرية تشتت لميكانيكا الكمّ وتستكمل بصياغات شبه تقليدية لمعاملات شكل متضامنة مع قوانين كمية لانحلالات الرنائى. بهذه الطريقة، ترتبط نظرية القياس التقليدية لجسيم نقطى بعدة قوانين تنحدر من نظرية تشتت لميكانيكا الكمّ وترتبط الأخيرة بفروض شبه تقليدية حول التوزيع الشحنى الذى يصف التركيب الكهروديناميكي لمركز تشتيت. إن نظرية القياس لفيزياء الجسيمات هى شبه تقليدية، حتى يومنا هذا إذ إن تركيباتها الأساسية ما يلى:

١- قانون قوة "لورنس" التقليدي:

$$F = (q/c)(E + v \times B)$$

ويربط هذا الكتلة m والشحنة Q لجسيم تقليدى بسرته v وعجلته F/m

فى مجالين كهربي ومغناطيسى E و B .

٢- متعلقات علم الحركة المجرّدة النسبوية. وتصف هذه الانتشار

"الزمانى-المكانى" لجسيم على الطاقة ويتطلب أن تتبع تفاعلاته

قوانين حفظ الطاقة وكمية الحركة.

٣- عدد كبير من القوانين الظاهرية. والعديد من هذه (مثل قانون المدى-الطاقة التجريبي) قد جاء من تجارب على أساس نموذج جسيم تقليدي. ويطلق الفيزيائيون على مثل هذه القوانين اسم "شبه تجريبية"^(١).

٤- قوانين الحفظ الميكانيكية الكمية للمقادير الكمية مثل المغزلية و"النديّة" ونظير المغزلية. وترتبط هذه الكميات، طبقاً لنظرية "تويزر" بتمائلات الديناميكا الكمية لجسيمات ما دون الذرة.

٥- قوانين استنفاد الطاقة وانعطاف الجسيمات المشحونة في المادة. وتستند هذه إلى نظرية تشتت كم ميكانيكية وعلى وصف كهروديناميكي كمي للتأين والكبح وخلق الأزواج والتشتت المتعدد^(٢).

٦- القوانين الإحصائية لحساب الترددات النسبية لوقائع التشتت ذات طابع ديناميكي معين والمقطع المؤثر لتفاعلات جسيماتها^(٣).

٧- مقاطع التشتت الكم ميكانيكية لجسيمات نقطية أو غير مركبة. وقد وصفت سلسلة المعادلات الخاصة بالتماذج في الفقرة (٤-٤) مقاطع تشتت "رنرפורد" وتشتت "موت" وتشتت "ديراك" على البروتون... إلخ.

٨- معادلة "برايت-فجنر" للطاقة المتوسطة وسمك الرنين. وينبع هذا من نظرية الانحلال الكمية وترتبط الطاقة وسمك الرنين بالكتلة وفترة العمر لحالة ميكانيكا كم غير مستقرة^(٤).

(١) انظر رنرפורد وآخرون ١٩٣٠، ص ٢٩٤، وأيضاً الفقرة (٣-٤).

(2) Perkins 2000. و Rossi 1952. و "Particle Data Group" 2004.

(3) Cowan & "Particle Data Group" 2004.

(٤) انظر بريكينز ٢٠٠٠، ص ٥٥-٥٨، مقارنة بـ"جولدبرجر" و"واطسون" ١٩٧٥،

الفصل الثامن، والفقرة (٣-٣-٤).

الفرض الإحصائي رقم (٦) يأتي من نظرية احتمالات. أما باقى نظرية القياس فهي تجميعة من تعدد قوانين معينة مبنية على الميكانيكا النقطية التقليدية ومتعلقات علم الحركة المجردة النسبية وميكانيكا الكم غير النسبوية والكهروديناميكا الكمية ونظريات مجال الكم الأكثر حداثة. ونظرية القياس غير المتجانسة هذه، تعكس بوضوح البناء الطبقي للظواهر التى تم وصفها فى الفقرة (٣-٣). وبالإضافة الى ذلك، فهى تعكس أيضاً نمو المعرفة الأساسى الموثوق عبر التطور التاريخى لفيزياء الجسيمات. بادئ ذى بدء، لقد كانت هناك القوانين الكلاسيكية (١) و(٢) التى تصف مسارات الجسيمات المنفردة وعمليات التشتت. فهى ترجع إلى المرحلة الأولى للصياغة النظرية للمشاهدات الأساسية لفيزياء الجسيمات؛ بمعنى أنه كانت قوانين القياس الوحيدة المتاحة فى الأيام الأولى من تأسيس علم الكهروديناميكا الكمى. ثم أتت بعد ذلك القوانين الظواهرية أو نصف التجريبية (٣). وفى الوقت الذى اختلطت الأمور فيها حول آثار مسارات الأشعة الكونية وكشف هوية الجسيمات فى الثلاثينيات والأربعينيات من القرن العشرين، فقد أنتجت أساساً تجريبياً مستقلاً لعلم الكهروديناميكا الكمى (الفقرتان ٤-٤ و ٤-٥). ثم تم تقديم المزيد والمزيد من قوانين الحفظ الميكانيكية (٤)؛ حيث ساعد تطبيقها على عمليات التشتت فى إفراز نظام فى مجال الجسيمات فى الخمسينيات والستينيات من القرن العشرين. وبعد الستينيات أوردت تجارب التشتت ذات الطاقة العالية عدداً كبيراً من المسارات التى تم تحليلها بطرق إحصائية. ومن أجل الحصول على قياسات عالية التحديد للمقاطع المؤثرة، أخذنا فى الاعتبار الطاقة المفقودة والتشتت

المتعدد للجسيمات المشحونة داخل المادة (٥) واستعنا بطرق التحليل الإحصائية الراقية (٦). ولقد أصبح ذلك فى الإمكان بعد قبول الكهروديناميكا الكمية كعلم ونظرية تم الإقرار بها. ثم أضيفت أخيراً المعادلتان (٧) و(٨). وقد أسسوا على نظرية التثنت الكم ميكانيكية ونظرية المجال الكمى ومثلها كمثل القانونين (٥) و(٦) تطبق فقط على المستوى الاحتمالى.

ولعل من المفيد أن نرى أيًا من هذه المفاهيم والقوانين تنتمى إلى المستوى الفردى وأيها ينتمى إلى المستوى الاحتمالى. إن كل الكميات الناتجة من آثار مسارات الجسيمات وعمليات التثنت تنتمى إلى الوقائع الفردية، وهذا مستوى تقليدى فى الأساس. والكميات القابلة للقياس لمسار جسيم هى الكتلة وكمية الحركة الرباعية والشحنات. وبالإضافة إلى ذلك، فالاعتبارات التقليدية تفترض أن طول المسار يقابل الطول المستغرق لجسيم مستقرّ أو فترة العمر لجسيم غير مستقر. والكميات الممكن قياسها لعمليات تثنت هى الكميات المحددة لمسارات الجسيم المنفرد بالإضافة إلى كميات عديدة مستمدة منها باستخدام قانونى الحفظ (٢) و(٤)، المسمّاة "تظير المغزلية" و"الشحنة المفرطة" وكميات ديناميكية أخرى؛ مثل "الغرابية" و"الفنتة"... إلخ، وهى المتعلقة بالتمائلات الداخلية للجسيم ونظريات المجال الكمى ذات المعيار الثابت، على التوالى. هذه الكميات الديناميكية هى شحنات عمومية. وهى ترتبط فى النموذج القياسى الحالى لفيزياء الجسيمات بقوة الاقتران للتفاعلات الكهربائية الضعيفة والقوية.

وبالتالى فكل الكميات التى تنتمى إلى نظرية الكم تعتبر احتمالية. فهى من الممكن أن تعزى إلى المستوى التجميعى؛ بمعنى الترددات النسبية

المقاسة لمسارات الجسيمات وعمليات التشتت الناتجة من وابل الجسيمات المعدة من مستوى كمّي جيد التحديد. ولعلّ أهم كمية ممكن قياسها هي المقطع المؤثر. وباعتبارها كمية تجريبية، فالحصول عليها يكون بإحصاء التردد النسبي لعمليات تشتت ذات طابع ديناميكي معين. وباعتبارها كمية نظرية، فيتم حسابها بنظرية المجال الكمي من خلال عنصر مصفوفة S المقابلة لتفاعل الجسيم. وهكذا، في التنبؤ بالمقطع المؤثر لتفاعل جسيم أو ما يقابله من التردد النسبي لوقائع تشتت، تلقى كل من نظرية المجال الكمي ونظرية الكم أسسهما التجريبية^(١). ويكمن قياس مقطع وراء قياس معامل شكل وكذلك قياس رنين. وفي الصورة التقليدية فمعامل شكل هو قياس احتمالي لحجم مركز التشتت. والرنانين ليس لها ترابط تقليدي واضح (ومع ذلك فالمصطلح له أصل تقليدي أيضاً). إن متوسط الطاقة وسمك الرنين هما قياسان احتماليان للكثلة وفترة العمر لحالة كمّية غير مستقرة.

كيف تتناسب القوانين التقليدية والكمية، على التوالي، المستويات الاحتمالية؟ إن نظرية الكم لا تتوافق مع مسارات الجسيمات التقليدية. إن انتشار الجسيمات التقليدية أمر يحتمه الفرضان (١) و(٢)، وتتبع نظرية الكم للتشتت من الفروض (٥) و(٧) و(٨). وفي القانونين (٣) و(٥) يتشابه المستويان، الفردي والاحتمالي. وهناك روابط بين القوانين الكلاسيكية والكمية، فهي تجعل من الممكن تطبيق نظرية الكم للتشتت، تحت شروط معينة، على مسارات الجسيمات الفردية. فمن ناحية، هناك قوانين كمية تناظر تماماً القوانين الكلاسيكية. ومن ناحية أخرى، هناك قواعد اختيار راقية

(١) الملحق C.

للكميات المحفوظة مثل "المغزلية" و"الندية" وخلافه. والتناظر وقواعد الاختيار الراقية تصلح لمسارات الجسيمات في النطاق غير النسبوي؛ أى فى الطاقة المنخفضة للتشتت.

إن الاتفاق الدقيق لمعادلات "رذرفورد" التقليدية والكمية تصل بسلاسة نظرية ميكانيكا الكم للتشتت بنظرية القياس التقليدى المعروفة للجسيمات. هذا الاتصال السلس قائم بوضوح على المستوى الاحتمالى. ويصلح التناظر التام للترددات النسبية لانحرافات الجسيمات. وعلى المستوى الاحتمالى فإن الصياغة التقليدية لقوة "لورنس" يتم الحصول عليها بتقريب من ميكانيكا كم أيضاً طالما كان المجالان الكهربى والمغناطيسى ضعيفين بالمقارنة بمجالات ما دون الذرة^(١). لقد بدا فى الأيام الأولى لميكانيكا الكم ما يبرر تمديد هذا التناظر للميكانيكا الكلاسيكية، وتمديد الميكانيكا الكمية من المستوى الاحتمالى إلى مستوى مسارات الجسيمات الفردية. وفى كتابه عام ١٩٣٠ صاغ "هايزنبرج" نصاً عاماً لمبدأ التناظر لـ"بور" يقترّب من المعتقد التالى:

إن مبدأ التناظر لـ"بور" يطرح تشابهاً تفصيلياً بين نظرية الكم والنظرية التقليدية تناسب الصورة الذهنية العاملة. هذا التشابه لا يخدم فقط كدليل فى اكتشاف القوانين الشكلية؛ بل إن قيمته المتميزة هى أنه يؤسس تفسير القوانين التى وجدت بدلالة الصورة الذهنية المستخدمة^(٢).

(1) Mott & Massey 1965.

(٢) هايزنبرج ١٩٣٠ب، ص١٠٥. تم عرض المبدأ بشكل مختلف فى النسخة الألمانية؛ انظر ترجمتي لهذه الجزئية فى الفقرة (٥-٤-٢).

وسوف يتم تحليل المبدأ وما يتضمنه بالتفصيل لاحقاً^(١). ويجب فقط أن نذكر هنا أنها تدعم الثقة في وحدة الفيزياء المبنية على تطبيقات نظرية الكم والنظريات التقليدية. وهذه الثقة تجعل الفيزيائيين يعتقدون أن الاحتمالات الانتقالية الناتجة من نظرية ميكانيكا الكم للتشتت تنطبق أيضاً على عمليات التشتت على طول مسار جسيم منفرد.

وفي المدى غير النسبوي فإن هذه الثقة تكون منطقية ولا تسبب أي إشكالية. بينما في المدى النسبوي فالأمر مختلف على أي حال. فتحليل البيانات لمسارات الجسيمات توضح مرة أخرى ما تمت ملاحظته بالفعل. ولا تنهار الصورة التقليدية في جملة واحدة، إنها تنهار بالتدريج^(٢). وتعتمد الممارسة التجريبية في تحليل مسارات الجسيمات على هذا الاعتقاد. وفي الحقيقة، هو يستند تجريبياً إلى علاقة المدى والطاقة التي تنتمي إلى قوانين نصف تجريبية^(٣). فمن الممكن قياس مدى الجسيمات ذات طاقة معينة في معجل جسيمات بمساعدة كشاف يعمل كهدف ثابت. والقياس يبحث في كيفية ارتباط متوسط طاقة جسيم بمدى هذا الجسيم وطول أثر مساره داخل المادة. ومثل هذا القياس يجعل من الممكن اختبار تنبؤات الكهروديناميكا الكمية حول الطاقة المفقودة مباشرة؛ بمعنى أن قياس متوسط مسافة مدى الجسيم يمكن أن يقارن بالقيمة المتوقعة بحسابات ميكانيكا الكم للمدى الذي تنتبأ به الكهروديناميكا الكمية^(٣).

(١) انظر الفقرة (٥-٥).

(٢) انظر الفقرة (٤-٤) و(٥-٣).

(٣) انظر الفقرة (٥-٣-٣) والهامشين ٢٠ و٢١.

من هنا كان لنظرية قياس الجسيمات الفيزيائية ملامح مميزة. إنها ليست فقط غير متجانسة، ولكنها أيضاً زائدة؛ أي أن قوانين الكهروديناميكا الكمية التي تدخل القياسات تدعمها قوانين شبه تجريبية. وتتيح هذه القوانين شبه التجريبية الاختبار المنفصل للصيغات الكهروديناميكية الكمية. وكما هو موضح بالفقرة (٣-٤) و (٣-٥)؛ فخلال مرحلة تدعيم تجارب الكهروديناميكا الكمية كالتى قام بها أندرسون، فقد بُذلت جهود حقيقية لتحديد كتلة الجسيمات وشحنها عن طريق تحسينات إجراءات قياس شبه تجريبية مستقلة من هذا القبيل. وبعد عبور مرحلة تدعيم الكهروديناميكا الكمية، بقيت المناهج شبه التجريبية في نظرية القياس. وحتى يومنا هذا فإنها تُتيح إمكانية أداء فحوصات اتساق متعددة على القياسات. وكل ما أُجري من قياسات حتى الآن أكد أن نظرية القياس المعروضة عاليه متسقة. إن تجميعة القوانين الكلاسيكية وقوانين الكم تُعطي نتائج قياسات كمية متسقة، حتى إن كانت القوانين الكمية على النطاق النسبوي لم تعد مستمرة على مستوى المسارات الفردية ولكن فقط على المستوى الاحتمالي للكثير من مسارات الجسيمات.

وبذلك تكون نظرية القياس لفيزياء الجسيمات بنية غير متجانسة لقوانين القياس التي تحتوي على زوائد وتعطي نتائج كمية متسقة على المستوى الاحتمالي. إنها تستحق المقارنة بخيال إيان هاكينج عن فيزياء يكون كل قانون فيها محددًا قدر الإمكان، ولا قوانين مكررة، وأي قانونين يكونان غير متسقين مع بعضهما البعض:

إن الله لم يكتب كتاب الطبيعة على النحو الذي تصوره الأوربيون القدماء. لقد كتب ... كل كتاب فيها مُختصر قدر الإمكان، وإن كان كل كتاب منها غير متسق مع غيره من الكتب. فليس ثمة كتاب مُكرر. ثمة مدخل للبشر إلى الطبيعة مع كل كتاب، يُتيح على سبيل الحصر فهم ما يجرى^(١).

إن قوانين القياس لفيزياء الجسيمات متميزة بعناية عن ذلك البناء المتشقق تمامًا. إنها تكوّن نظرية. ونظرية القياس هذه باللغة الإسهاب. وأجزاؤها الغزيرة متناسقة كميًا على الرغم من عدم القابلية للتطبيق. وعلى عكس جموح "هاكنج" البرجوازي، فهي تشير إلى أن محتويات كتاب طبيعة من الممكن صياغته بلغة متناسقة إذا استطعنا أن نتحدث بها.

٥-٣ مسارات الجسيمات

لقد وضعت أسس هذه القياسات المتنوعة الوفيرة المتناسقة في الثلاثينيات والأربعينيات من القرن العشرين. وفي خلال تحليل مسارات أشعة كونية أضيف القانونان (٣) و(٥) إلى القانونين (١) و(٢). وقد قام كل من "بيث" و"بلوخ" و"هايتلر" في أوائل الثلاثينيات بحساب القانون (٥) الذي يتناول الطاقة المستنفذة على طول مسار الجسيم على أساس نظرية تشتت الكم ميكانيكية لـ"بورن" وبحث "موللر" حول التشتت والكهروديناميكا^(٢). وبسبب

(1) Hacking 1983.

(٢) المراجع:

Born 1926. و Bethe 1930.Moller 1931.Bethe 1932. Bloch 1933.

Heitler and Sauter 1933. Bethe and Heitler 1934.

العديد من الأسباب، لم يثق أحد في كهروديناميكا الكم في الثلاثينيات، ولم تستعمل المعادلات (٥) في التحاليل التي أجريت لمسارات الأشعة الكونية في ذلك الوقت. وقد دخلت نظرية القياس لفيزياء الجسيمات أخيراً بعد أن تم تأكيد صلاحيتها من خلال قياسات تمت بطرق مستقلة قائمة عن القوانين نصف التجريبية التي أجريت في الأربعينيات من القرن العشرين^(١). وتعتبر معادلات استنفاد الطاقة احتمالية حقاً. ومع ذلك فقد أصبحت ممارسة عملية لتتطبق على المسارات الفردية للجسيمات. وفي الحقيقة، كل الحسابات التي تمت الإشارة إليها أنفاً مبنية على الثقة في مبدأ "بور" للتناظر أو في نسخته المعدلة. وفي الحقيقة أيضاً، فقد أوضح "موت" وهايزنبرج" في عام ١٩٣٠، أن ميكانيكا الكم للثبتت لـ"بورن" قد تنبأت بمسارات جسيمات ذات شكل تقليدي. وهكذا، فقد تمت حسابات الطاقة المفقودة من الجسيمات المشحونة في المادة على أساس بدائي نصف تقليدي وبصورة صادقة لواقعية ما دون الذرة. إن الفروض التي تقوم عليها تعطى بصيرة نافذة لثقة الفيزيائي في وحدوية مستترة في الطبيعة، وأسباب مبرراتها وحدود هذه الثقة. وكحالة معامل الشكل، هناك سلسلة من النماذج التي تثبت تناظر الحالة التقليدية والحسابات الكمية^(٢). وللمرة الثانية، توضح هذه السلسلة من النماذج أن في نطاق ما دون الذرة فإن الصورة التقليدية للواقعية لا تتهار فوراً ولكن تتهار فقط خطوة بعد خطوة. على أي حال، فالدراسة اللاحقة أكثر هشاشة؛ إذ إنها تتناول المسارات الفردية للجسيمات في حين التفسيرات الاحتمالية لنظرية

(١) الفقرتان (٣-٤) و (٣-٥).

(٢) انظر الفقرتين (٣-٤) و (٤-٤).

الكم تعمل على المستوى التجميعی. ومن وجهة نظر فلسفية، فالسؤال الحاسم حول الطاقة المفقودة هو: ما الكم التجميعی الذى تطبق عليه نظرية الكم للتشتت؟^(١).

٥-٣-١ تنبؤات "موت" حول المسارات التقليدية

بعد تطوير ميكانيكا الكم بفترة قصيرة، اتضح أن تولد مسارات الجسيمات فى غرفة "ويلسون" متفقة تماماً مع نظرية ميكانيكا الكم للتشتت. وكما أكد "هايزنبرج" فى كتابه عام ١٩٣٠ عن ميكانيكا الكم، أن احتمال انحراف جسيمات "ألفا" نتيجة التأين المتعدد فى الضباب ليس صفراً، فقط إذا كان الخط الواصل بين جزئين يسير موازياً لاتجاه سرعة جسيمات "ألفا"^(٢).

وقد أجرى "موت" الحسابات المناظرة للمرة الأولى فى عام ١٩٢٩^(٣)؛ حيث قامت على أساس ميكانيكا الكم للتشتت بواسطة "بورن" عام ١٩٢٦ وهى الإطار النظرى لتفسير "بورن الاحتمالى لنظرية الكم"^(٤). وطبقاً لنظرية

(١) الأجزاء المتعاقبة مبنية على المرجع. Falkenburg 1996. فى التالى أرجو أن أقدم تحليلاً أكثر وضوحاً لهذه القضية محل الدراسة وأن أصحح بعضاً من أخطائى السابقة.

(٢) هايزنبرج ١٩٣٠، ص ٥٣ (بترجمتى)؛ انظر هايزنبرج ١٩٣٠، ص ٧٠.

(3) Mott 1929.

(٤) Born 1926a&b. لقد تم تعميم التفسير الاحتمالى فيما بعد وتم وضعه بصيغة أكثر وضوحاً بواسطة "فون نيومان" انظر Von Neuman 1932. وفى المناقشة الحالية قلما يؤخذ بحث "بورن" الثانى عام ١٩٢٦ فى الاعتبار. (ومن ثم تهمل أهمية نظرية التشتت لميكانيكا الكم فى تفسير ميكانيكا الكم). وقد تمت مناقشة أجزائها الصورية فى المرجع Jammer 1966، وهو يحوى - إضافة إلى ذلك - أفكاراً تخمينية غير =

ميكانيكا الكم للتشتت فالتشتت ليس نتيجة تصادم ولكن نتيجة حيود. وعلى وجه التحديد فالوصف الكم ميكانيكى للتشتت يفتقر إلى المسار التقليدى للجسم المنحرف وما يقابله من متغير التصادم التقليدى. أما مربع دالة الموجة فهي تتنبأ فقط باحتمال (وبالتالى، التردد النسبى) لاكتشاف الجسيم عند زاوية تشتت معينة، كما أوضح "بورن" فى بحثه ١٩٢٦. وقد قام "موت" بحساب احتمال تصادمين متتاليين لجسيم "ألفا" وذرة هيدروجين بتأثير تأين كل من الذرتين؛ إذ إن الذرتين المتأينتين تنتجان نقاطاً يمكن مشاهدتها. فهم قلب القطرات التى تتكاثف فى غرفة "ويلسون" السحابية. ومشاهدة قطرة يعتبر قياس موضع. بينما يعتبر رصد انحراف الجسيم الذى تعطيه الخطوط المرسومة بين القطرات المتجاورة قياس كمية حركة. وقد أوضح "هايزنبرج" فى كتابه عام ١٩٣٠، باعتبار غير مسبوق أن علاقة اللا تحديد للموضع وكمية الحركة تسرى على أى تأين يحدث على طول مسار الجسيم. وبسبب الحجم المحدود لجزيئات القطرات فى غرفة "ويلسون" فلا يمكن للموضع وكمية الحركة أن يكونا قاطعين^(١). وعلى ذلك، فتفسير ميكانيكا الكم لقياس

صورية حول تفسير الدالة الموجية وهو ما تم نقده فى: Jammer 1974. انظر أيضاً: Beller 1999.

(١) انظر هايزنبرج ١٩٣٠، ص١٨؛ ١٩٣٠، ص٢٤. يستخدم هذا الموجه المساعد على الكشف (انظر هامش الفصل السابع - المترجم) مبدأ التناظر. وهو - مع ذلك - مدعوم بالميكانيكا الموجية التى توظف مبدأ "هيجنز". وتبلغ عدم الدقة فى قياس الموضع لنقاط قياس منفرد لمسار جسيم ونسبة الخطأ فى قياس كمية حركة تم الحصول عليها من مسار منحني لجسيم ما باستخدام صيغة قوة "لورنتس" قدر اثنتي عشرة رتبة (أى مرفوعة للأس ١٢) لقيمة علاقة عدم التحديد لـ"هايزنبرج".

نقطة واحدة على مسار جسيم يناظر تمامًا الصورة التقليدية للجسيم. وهو يختلف فقط عن المسار التقليدي فيما لا يمكن مشاهدته، وهو المسار التقليدي لقياس موضعين. وهكذا، لكل الأغراض الإجرائية هو يقرّ بمسار تقليدي لجسيم. وبهذه الطريقة، فهو يؤكد تطبيق نظرية ميكانيكا الكم للتشتت على مسارات الجسيم المنفرد.

إن حسابات "موت" احتمالية، لم تأخذ في الاعتبار نتائج القياسات المنفردة؛ بمعنى التغير المتقطع لدالة الموجة التي تقابل المشاهدة لنقطة في الرذاذ. إنها تتفدّ في ميكانيكا الكم دون قياس. وطبقاً لذلك، تشتت دالة الموجة عند ذرتين على مسافة R . وتقرّ نظرية "بورن" في ميكانيكا الكم للتشتت بوجود حيود دالة الموجة. وتعطى الدرجتان، الأولى والثانية لنظرية الاضطراب نوعين مختلفين من الإسهام للموجة المشتتة. وكلاهما نتيجة تشتت غير مرّن عند كل من الذرتين. ويعنى التعبير "غير مرّن" هنا "طاقة مفقودة". وتساوى الطاقة المفقودة طاقة التأين. ولا يؤدي التصادم المرّن إلى تأين. وهكذا لا تؤدي إلى قطرات يمكن مشاهدتها في غرفة "ويلسون". وطبقاً للدرجة الأولى من نظرية الاضطراب، تؤين ذرة واحدة بعد التشتت، والتشتت الثنائي يجب أن يتكون من عمليتيّ تشتت منفردتين غير مترابطتين تعطيان إسهامين مستقلين غير متداخلين للموجة المشتتة. وبذلك، يشمل إسهام الدرجة الأولى إضافة ضعف احتمال التشتت عند مجرد ذرة واحدة. ومن خلال حد الدرجة الثانية تتأين كل من الذرتين فوراً في التشتت المترابط. ونتيجة "موت" الرئيسية هي أن كلا النوعين من الإسهام يقرّ مساراً تقليدياً. فلدرجة الأولى، تتركز الموجة الخارجة في شكل مخروطي، زاوية رأسه

صغيرة، خلف الذرة المتأينة، في اتجاه الموجة القادمة. ودرجة ثانية، للإسهام غير منعدم فقط إذا وقعت الذرتان في داخل هذه الزاوية في الإتجاه نفسه^(١).

وبالتعميم إلى عدد N من الذرات فننتج "بورن" توحى بالآتى: لدرجة أولى، فاحتمال التشتت يكافئ N من المرات قدر احتمال تشتت غير مترابط عند ذرة واحدة. أما التشتت المترابط عند أكثر من ذرة فهو يسهم في الدرجة الثانية والثالثة و..... والدرجة N . وعلى كل حال، ولأى درجة، فالموجة المشتتة تنتشر على طول المسار التقليدى.

إن نتائج "موت" مستوحاة كلية من مبدأ "بور" للتناظر ونصه المعدل بواسطة "هايزنبرج" المدرج سابقاً في الفقرة (١-٥). إن ميكانيكا الكم لمسار جسيم يناظر مساراً تقليدياً. ولكن أكثر تحديداً، فميكانيكا الكم للتشتت تقر بوجود تجميعية للمسارات الممكنة التي تكون متشابهة الأغراض الإجرائية والتي تناظر مساراً تقليدياً. وهذا الإقرار يرسخ تناظراً بين الميكانيكا التقليدية وميكانيكا الكم على مستوى المسارات الفردية. إن احتمال انحرافين متتابعين لجسيم على طول خط مستقيم يختلف عن ١ بقيمة بالغة الصغر يمكن إهمالها لكل الاعتبارات الإجرائية. ولذلك، فمن الممكن التغاضي عن أى تأثير فى القياس المؤدى إلى مشاهدة قطرة فى الضباب.

(١) انظر المراجع موت ١٩٢٩؛ وهايزنبرج ١٩٣٠، ص٥٦، و١٩٣٠، ص٧٥-٧٦. إن عرض "هايزنبرج" لنتائج "موت" أكثر وضوحاً من رواية المراجع الدراسية لها. انظر على سبيل المثال ميسيا ١٩٦٤، الفقرة (١٩-٣-١٠ و١١). والشكل الكلاسيكى لمسار الجسيم يتم شرحه من إسهام من الرتبة الثانية بفصله بشكل مضلل من المناقشة السابقة عن التشتت غير المترابط من الرتبة الأولى، وهو الإسهام السائد لأسباب واضحة.

وما يجب أن يذكر هنا أن حسابات "موت" ١٩٢٩ قد بنيت على مثالية بعيدة عن الواقعية. فلم تؤخذ الطاقة المفقودة نتيجة التآين في الاعتبار. لقد تم وصف الجسيم كما لو لم ينقل أى طاقة لذرة الهيدروجين عند تأينها. وعلى الرغم من أن الحسابات تتناول ساعات لتصادمات غير مرنة، فإنها قد أجريت كما لو كانت حالة كمية الحركة ظلت غير متأثرة بالطاقة المنقولة لذرة الهيدروجين، وهى الطاقة التى نتج عنها التآين؛ ومعنى هذا أن جسيم "ألفا" الذى قام بعمليات تآين متتابعة، وقطرات مرئية فى الضباب، قد تم التعامل معه كما لو كانت التصادمات مع ذرات الهيدروجين تصادمات مرنة. ومن المسلم به فهذه المثالية غير الواقعية (والتي ما هى إلا إهمال لكمية الحركة المنقولة) تبدو معقولة إذا لاحظنا أن الطاقة التى يفقدها جسيم ألفا بسبب تآين ذرات هيدروجين يمكن إهمالها. فطاقة التآين للهيدروجين صغيرة جداً بالمقارنة بطاقة الحركة لجسيم ألفا. وعلى ذلك تبقى كمية الحركة دون تغير عملياً على طول مسارها فى غرفة "ويلسون".

على أى الأحوال، ففيما يتعلق بالعلاقة المستورة بين الميكانيكا التقليدية وميكانيكا الكم فالمقدار المهمل يعتبر مصيرياً. ويتذكر رأى "فينمان" الموضوع فى الفقرة (٥-١): فنظرية ميكانيكا الكم للتشتت تقرأ كما يلي: "إن صورتنا الكاملة للعالم عليها أن تتغير على الرغم من أن كمية الحركة تتغير بكميات صغيرة". إن عملية التآين التى تنتج قطرة مرئية هى قياس. إنها تتبع لا يقين "هايزنبرج" فى أن كمية الحركة لجسيمات ألفا بعد التآين غير حاسمة. وبالإضافة إلى ذلك، فهى غير قابلة للسير فى عكس الاتجاه مرتبطة بطاقة مستنفذة. وإذا أهملنا هذا فقد فى الطاقة، فسنعتبر أن كمية الحركة ثابتة على طول المسار. ويمكن وضع هذه الحقيقة بشكل آخر، فمن المفترض أن حالة

الجسيم بعد قياس أى موضع ما زالت تنتمى إلى تجميع معين للحالة الابتدائية لكمية الحركة، أو أن إعداد جسيم "ألفا" لا يتغير على طول المسار أو أن القياسات قابلة للإعادة. وهذا الفرض ينافى بوضوح حقيقة أن المسار المرئى هو نتيجة لانتقالات متتابعة مرتبطة بقياسات غير قابلة للإعادة وبطاقة مستنفذة على طول المسار. وهذه مسألة مبدأ، على الرغم من أن نتائج حسابات "موت" تظهر أن المثالية لها من الصلاحية ما يكفى كل أغراض الممارسة.

على أى حال، فقد تم مد مظلة هذه الشروط المثالية، يبدو أن الوصف التقليدى والكمى لمسار ينفقان لأى تتابع لقياس نقاط، وأن النموذج التقليدى والكمى لمسار يبدوان فى انسجام سابق التجهيز ولا يهم عدم تطبيقتهما. وهذا التناظر بين الحالة التقليدية والكمية لا يصلح فقط للمسارات المستقيمة للجسيم التى قام "موت" و"هايزنبرج" بحسابها؛ بل تصلح أيضاً للمسارات المنحنية فى مجال مغناطيسى. وتقرّر معادلة "شروندجر" لوابل الجسيمات غير المتغير فى مجال خارجى ضعيف، انحراف الوابل التقليدى الذى وصفته قوة "لورنس"⁽¹⁾.

٥-٣-٢ حساب "بيث" للطاقة المفقودة

فى حالة حساب كمية الطاقة المفقودة بجسم على طول مساره، يتلاشى الاتفاق بين الوصفين التقليدى والكمى. ومع ذلك، فقد حفظت الصورة نصف التقليدية النقية لعملية التشتت على طول مسار مرئى، فى المعالجات النظرية التى تلت بعد ذلك، والتى تناولت الطاقة المفقودة من الجسيم المشحون داخل المادة. وطبقاً للصورة الحدسية التقليدية التى تكمن وراء هذه الحسابات حتى

(1) Mott & Massey 1965.

يومنا هذا، فإن الجسيم المشحون يفقد طاقته على طول مسار مقاس طبقاً لما يلي: يوالى الجسيم تباطؤ حركته بالتصادمات غير المرنة التي تحدث له مع ذرات الكشاف، ويزداد تحذب مسار الجسيم فى مجال مغناطيسى خارجى وينتهى مسار الجسيم عندما تنتقل طاقته وكمية حركته بالكامل إلى ذرات مادة الكشاف. وقد تم اكتشاف البوزيترون بناء على الأثر. ولتحديد نوع شحنة الجسيمات القادمة من الأشعة الكونية، قام "أندرسون" بقياس اتجاه تحليق الجسيم بوضع لوح من الرصاص فى غرفة "ويلسون". ويتسبب لوح الرصاص فى فقدان محسوس فى الطاقة ويؤدى إلى زيادة فى انحناء مسارات الجسيمات فى مجال مغناطيسى^(١).

وقد تمت أولى الحسابات الجديرة بالثقة لهذه الطاقة المفقودة غير المهملة على يد "بيث" عام ١٩٣٠^(٢). وقبل عام ١٩٣٠، كان هناك حساب واحد يسمى نظرية "بور" التقليدية للتأين بين الفترة ١٩١٣ حتى ١٩١٥. وكان من المعروف أن هذه الحسابات تعطى نتائج خاطئة للجسيمات السريعة^(٣). إن متناظرة "بور" تفشل، بصفة عامة، فى معالجة الطاقة المفقودة على طول مسار الجسيم. إن حسابات "بيث"، ١٩٣٠، للطاقة المفقودة نتيجة إثارة وتأيين ذرات مادة الكشاف تعطى صياغة تتفق مع نتائج "بور" التقليدية فقط فى مدى السرعة والطاقة المفقودة اللتين توشكان على الانتهاء^(٤). تلك

(١) انظر الفقرة (٣-٤).

(2) Bethe 1930.

(3) Bohr 1913a&1915

(٤) تختلف النتيجةتان فى أحد الحدود باعتماد لوغاريتمى على السرعة. فتحتوى معادلة "بيث" على الحد $(\ln v_2)$ فى حين تحتوى معادلة "بور" على $(\ln v_3)$ ، انظر المرجع Bethe 1930 الملحوظة الخامسة. وهكذا يحدث التقابل فقط عندما تتوول السرعة إلى =

السرعة والطاقة المفقودة اللتان تؤولان إلى الصفر هما بالضبط الحالة المثالية التي أُجريت "موت" حساباته بمقتضاها.

في عام ١٩٣٠ قام "بيث" بنشر ورقة بحث حول الطاقة المفقودة بالجسيم المشحون في المادة. وأجريت هذه الحسابات في إطار نموذج نصف تقليدي. وقد أضاف هذا النموذج بعض الفروض التقليدية حول عمليات التشتت الفردية على طول مسار الجسيم وذلك إلى ميكانيكا "بورن" الكمية للتشتت. وسنطو المعالات هنا في تدوين عصري، وقد أُجريت الحسابات في إطار نظرية الاضطراب-مستقلة الزمن: فقبل التشتت يمكن وصف الجسيم المشحون بحالة الكمية:

$$\varphi_k(r, t) = e^{i(kr - \omega t)} \quad (5.1)$$

وهي عبارة عن موجة مستوية كمية حركتها P وعددها الموجي $k = \frac{2\pi p}{h}$ وترددها الزاوي $\omega = \frac{\hbar k^2}{2\pi m}$. وتشتت عند ذرة من مادة الكشاف بحالة كمية:

$$\varphi_0(r, t) = \Psi_0 e^{-i\left(\frac{2\pi i}{h}\right) E_0 t} \quad (5.2)$$

حيث يرمز إلى الحالة الدنيا للذرة. وقبل التشتت (الذي يبدأ عند زمن صفر)، لا يكون الجسيم المشحون وذرة مادة الكشاف في حالة ارتباط. وللزمن $t \ll t_0$ ، تتفكك دالة الموجة للنظام المتحد (الجسيم والذرة) إلى:

=الصفر. وبالتأكيد تعطى معادلة "بور" الكلاسيكية نتائج صحيحة تقريبًا في حالة الجسيمات الثقيلة البطيئة، انظر المرجع Jackson 1975 الفقرة (١٣-٣).

$$u(r, t) = a_0(k) \varphi_k \otimes \varphi_0(r, t) \quad (5.3)$$

وتقول الكتب المرجعية بتعبير أخذ عن بداية عملية مقارنة، إن التفاعل "يدار مفتاح تشغيله" عند الزمن $t = t_0$. ويكون عند ذلك الجسم الساقط وذرة الكشاف نظامًا مركبًا. ولزمن $t_0 >$ ، تنمو دالة الموجة للنظام المركب طبقاً لمعادلة "شروينجر" المعتمدة على الزمن كما يلي:

$$u(r, t) = \sum_{n, k} a_n(k, t) \varphi_k(r, t) \otimes \varphi_n(r, t) \quad (5.4)$$

وتعطى السعات المعتمدة على الزمن $a_n(k, t)$ للنظام المرتبط بنظرية الاضطراب المعتمدة على الزمن. حتى ذلك الحين لم يكن "بيت" قادراً على استخدام هذه النظرية بصوت مسموع؛ لأنه لم يكن لديه توزيع δ حينئذ. بعد التفاعل؛ أي عندما $t \gg t_0$ ، من المفترض أن يصبح الجسم حرًا. وعند البحث عن الجسم عند زمن t_1 ، تختزل دالة الموجة إلى مركبة فردية الجسم $\varphi_q(r, t) \otimes \varphi_n(r, t)$ حيث $q = \frac{h}{2\pi}(k)$ هو كمية الحركة المنتقلة بين الجسم والذرة وأن n تميز حالة الإثارة للذرة خلال التصادم غير المرن. وعند زمن $t_1 \gg$ تأخذ الموجة المختزلة أو الحالة الكمية المختصرة إلى الشكل:

$$u_{n,q}(r, t) = a_n(q, t_2) \varphi_q(r, t) \otimes \varphi_n(r, t) \quad (5.5)$$

وتعتمد دالة الموجة هذه فقط على الحالة n للذرة وكمية الحركة المنتقلة q ولم تعد معتمدة بعد على كمية حركة الجسم الساقط p . ومعنى هذا أن الاحتمال الانتقالي لكمية معينة من الطاقة المفقودة لا تعتمد على كمية حركة

الجسيم المشحون الساقط. وهذا أمر فاصل، إنه يجعل الوضع مشابهاً لحسابات "موت" مبرراً بالإدراك المتأخر المثالية التي أسس بها "موت" نموذج. ففي نموذج "موت"، قد تم إهمال كمية الحركة المنقولة. ويتضح هنا أنه لا يؤدي دوراً في حسابات الطاقة المفقودة. وبذلك يتضح أنه لا توجد هناك مشكلة في تجاهل تأثير القياس ولتطبيق النتائج على حسابات مسارات الجسيم المنفرد. وتُعطى سعة التثنت للموجة الحادثة بالسعة $a_{\pm}(q, t_{\pm})$ الخاصة بالحالة المختزلة $u_{\pm}(r, t)$ عند الزمن، t_{\pm} ، الذي يتم الكشف فيه عن الجسيم:

$$a_{\pm}(q, t_{\pm}) = c(q, k) |V_{0\pm}|^2 \delta(\omega - \omega_0) \quad (5.6)$$

و $V_{0\pm}$ هنا هو عنصر مصفوفة انتقال الذرة من المستوى الأرضي φ_0 إلى مستوى الإثارة $\varphi_n(t)$ ويضمن الحد $\delta(\omega - \omega_0)$ حفظ الطاقات الكلية ω_0 أو ω' للجسيم ونظام الذرة قبل التثنت وبعده، على التوالي.

ويرتبط معدل الانتقال لكل جسيم ساقط في وحدة الزمن، T ، أو بمعنى آخر، $\frac{d\sigma}{dq}$ ، ارتباطاً مباشراً بسعة التثنت. ويصبح هذا المقدار، بعمل التسوية المناسبة وبصيغته كدالة في كمية الحركة المنقولة، كما يلي:

$$\frac{d\sigma(q)}{dq} = |a_{\pm}(q, t_{\pm})|^2 \quad (5.7)$$

ويستبدل الحد σ الحالى للمقطع بدالة "بورن" $\varphi_n(q)$ وهي دالة كمية الحركة المنقولة وحالة الإثارة n للذرة. وهذه الصياغة المأخوذة من الورقة البحثية لـ"بورن" عام ١٩٢٦ عن ميكانيكا الكم للتثنت قد استخدمها "بيث" أيضاً.

ومن هذه النتيجة، قام "بيث" باستنتاج المعادلة الحاسمة للطاقة المفقودة من جسيم مشحون داخل المادة كما يلي^(١). مع اعتبار المعادلة احتمالية، فهي تعطي صياغة للقيمة المتوقعة الكم ميكانيكية:

$$\langle E_n - E_0 \rangle = \langle u_{n,q}(t) E_n - E_0 u_{n,q}(t) \rangle \quad (5.8)$$

للطاقة المنقولة من الجسيم المشتت إلى ذرة مادة الكشف نتيجة إثارة الذرة من الحالة الدنيا φ إلى الحالة رقم n وهي φ_n :

$$\langle E_n - E_0 \rangle = (E_n - E_0) \int \frac{d\varphi_n(q)}{dq} dq \quad (5.9)$$

وللحصول على القيمة المتوقعة للطاقة المفقودة نتيجة انتقال الذرة إلى أي من مستويات الإثارة، فعلينا إضافة احتمالات كل الانتقالات من المستوى الأدنى إلى أي حالة إثارة متفردة E_0 أو إلى التواصل. ويمكن كتابة المجموع كما يلي^(٢):

$$\langle E \rangle = \left(\sum + \int du \right) (E_0 - E_0) \int d\varphi_n(q) \quad (5.10)$$

وطبقاً للتفسير الاحتمالي المعتاد في ميكانيكا الكم، فالمعنى الفيزيائي للمعادلة يكون كالتالي: $\langle E \rangle$ هي متوسط الطاقة المفقودة لكل ذرة واحدة ولكل جسيم من الجسيمات الساقطة (في حدود الواابل اللانهائي من الجسيمات القادمة أي $N_{in} \rightarrow \infty$). وهذا التفسير ينطبق على المستوى

(١) بيث ١٩٣٠، ص ٣٥١-٣٦٠.

(٢) انظر المعادلتين ٥٥ و ٥٥ب في: بيث ١٩٣٠، ص ٣٥٩.

التجميعی، بمعنى على الجسيمات المعدّة بالحالة الكمية نفسها. وحيث إن كلا من القيمة المتوقعة وكذلك معدلات الانتقال التي تؤثر فيه لا تعتمد على كمية حركة الجسيم، فيبدو أن كمية الحركة غير ذات أهمية. وعلى ذلك، فبالنسبة إلى الطاقة المفقودة، فالجسيم ينتمى إلى التجميع نفسه على طول مسار الجسيم.

وفي الحقيقة، فقد اعتقد "بيث" بما لا يدع مجالاً للشك أن المعادلة (5.10) تنطبق على كل تشتت على طول مسار الجسيم، سواء في وجود أو عدم وجود تأثير مرئي. وقد جعل هناك خطوتين إضافيتين لتطبيق معادلته (5.10) على مسارات الجسيمات المنفردة. وبهاتين الخطوتين، يدخل الجزء التقليدي إلى تصميمه نصف التقليدي. فبدأ أولاً بحساب عدد التصادمات غير المرنة المرئية وغير المرئية على طول مسار $N\phi$ ؛ حيث ϕ المعدل الكلي للانتقال و N هو عدد الذرات في مادة في وحدة الحجم Δx^3 ⁽¹⁾. وبعد ذلك أعطى صياغة بسيطة لمتوسط الطاقة المفقودة ΔE لكل طول Δx داخل المادة كما يلي⁽²⁾:

$$\frac{\Delta E}{\Delta x} = N\langle E \rangle \quad (5.11)$$

حيث $\langle E \rangle$ هي الكمية المعطاة بالمعادلة (5.10) و N هو عدد الذرات في مادة في وحدة الحجم Δx^3 . وبإعطائه المعادلة (5.11) يزعم "بيث" أن القيمة المتوقعة $\langle E \rangle$ تحمل معنى متوسط الطاقة المفقودة بالجسيم المشحون بالتشتتات المتتالية عند العديد من ذرات مادة الكشاف على طول

(1) بيث 1930، ص 358.

(2) بيث 1930، ص 360، المعادلة (56).

مسار منفرد، مطوّعة لعدد الذرات للمسار الواحد Δx . بمعنى أن المسار المنفرد يعتبر نابغاً من العديد من عمليات التشتت لجسيم في حالة كمية تعود إلى التجميع الإحصائي نفسه.

وبالطبع لم يناقش "بيث" التفسيرات الفيزيائية لنتائجه ولا مبرراتها الفلسفية. لقد افترض ببساطة أن $\langle E \rangle$ تنطبق على التحولات الكمية اللاحقة المنفردة على طول مسار بغض النظر عما إذا كانت مرئية أم غير مرئية. ويندرج هذا تماماً تحت نتائج "موت" شبه الكلاسيكية. فقد أوضحت بدرجة أولى أن احتمال التشتت للتأينات اللاحقة هي ببساطة مجموع التشتت المترابط عند ذرات عديدة، كل على حدة وأن حدود التشتت المترابطة ذات الدرجات الأعلى هي حدود مهمة. ومن الجدير بالذكر هنا أن حسابات "بيث" عام ١٩٣٠ قد أجريت بالدرجة الأولى لنظرة الاضطراب. وفي حسابات "موت"، ولأسباب واضحة، سادت إسهامات الدرجة الأولى غير المترابطة لسعة التشتت. واتفاقاً مع هذا، حافظ "بيث" على صورة بديهية نصف تقليدية واقعية لعمليات التشتت فيما دون الذرة. وقد بنى استنتاجه للمعادلة (5.11) على الفروض الضمنية الآتية:

- (أ) خلال مرور الجسيم في المادة، يقوم بإثارة وتأيين العديد من الذرات.
- (ب) النقاط المقاسة المرئية على المسار هي نتيجة تأينات، ولكن هناك أيضاً طاقة مفقودة غير مرئية نتيجة الإثارة.
- (ج) كل الإثارات والتأينات لذرات مادة الكشاف مستقلة عن بعضها البعض، كما أن لها احتمالاً يوصف بالكمية $\langle E \rangle$ طبقاً للمعادلة (5.10).

الفرضان الثانى والثالث حاسمان، فالفرض (ب) مبنى على إهمال تأثير القياس، بينما الفرض الثالث فهو مبرر بحقيقة أن إسهامات الدرجات العلى للترابط على التشتت صغيرة إلى درجة يكمن إهمالها.

وفى الحقيقة، قد كان من نتائج "بيث" المقدارية، النسبة بين التصادمات المرئية وغير المرئية. فالهيدروجين، يؤدى حوالى 28.5% من التصادمات غير المرنة إلى تأين مسبباً قطرات مرئية فى ضباب غرفة "ويلسون"^(١). وتوضح الحسابات أن المقدار الأساسى من الطاقة المفقودة على طول مسار الجسيم فى غرفة "ويلسون" تقاس حقيقة، على النقيض من نموذج "موت" المثالى الذى فيه تهمل الطاقة المفقودة على طول المسار. وعلى أى الأحوال، فقد أنتجت حسابات "بيث" عام ١٩٣٠ أيضاً بشكل مستتر، اعتماد $\langle E \rangle$ على كمية الحركة وهو ما يخالف مثالية "موت" وهو المهمل فقط فى للجسيمات السريعة. وهو ما يبدو الحد الأعلى q_{max} للتكامل الحاسم فى المعادلة (5.10):

$$\int d\dot{\phi}_n(q) = \int^{q_{max}} d\dot{\phi}_n(q) \quad (5.12)$$

ولا يمكن أن يفقد الجسيم من الطاقة أكثر مما فقد. وهكذا، بزيادة مقدار الطاقة المفقودة على طول المسار، تتغير القيمة المتوقعة بالشكل (lin) E_{kin}/E_{kin} مع مقدار الطاقة المتبقية E_{kin} ^(٢).

(١) المرجع ٤٥ ص ٣٦٠.

(٢) انظر نتائج "بيث" عن الهيدروجين؛ بيث ١٩٣٠، ص ٣٦٠. وكذلك فالكينبورج

١٩٩٦، ص ٣٤٩-٣٥٠.

وبهذا يصبح الوضع غير قابل للمقارنة مع نموذج "موت" المثالي الذي لا يتغير فيه نتائج إعداد الجسم والقيمة المتوقعة على طول المسار. إن حالات الجسم بعد قياس النقاط لا تصبح بعد ذلك تابعة للتجميع الكمي بالنسبة إلى المقدار $\langle E \rangle$ حينما تتغير هذه الكمية على طول المسار مع تناقص كمية حركة الجسم.

ولهذا السبب، يصبح من الواضح أن نموذج "بيت" نصف التقليدي للطاقة المفقودة في المادة غير مترابط. فتعارض القيمة المتوقعة الكم ميكانيكية $\langle E \rangle$ التي تم حسابها طبقاً للمعادلة (5.10) غير موافقة للتطبيق على القياس الفردي للنقاط على طول مسار طبقاً للمعادلة (5.11) في ضوء التفسير الاحتمالي المعتاد (التجمعي) لميكانيكا الكم. وبفرض أن المعادلة (5.11) تعطى متوسط قيمة الطاقة المفقودة على طول مسار منفرد، اعتمد "بيت" على نتائج "موت" في الحالة التي تتوافق مع الشروط المثالية لنموذج "موت". وفي إطار ميكانيكا كم دون قياس، هو يقوم بحساب معادلة تصلح للطاقة المستنفذة نتيجة قياس مواضع على طول مسار. وفي الحقيقة، وللجسيمات السريعة التي هي موضوع حسابات "بيت"، فذلك، وللمرة الثانية، هي مجرد مسألة مبدأ (على الأقل طالما كانت الجسيمات غير بالغة السرعة؛ أي ليس لها سرعات نسبية). وحيث إن اعتماد المقدار $\langle E \rangle$ على كمية الحركة ضعيف جداً، فهذا النموذج غير المترابط يعمل بإتقان لكل الأغراض الإجرائية. وعلى ذلك حالات الجسيمات بعد قياس النقاط لمسار جسيم منفرد، تنتمي تقريباً إلى التجميع الكمي نفسه بالنسبة إلى $\langle E \rangle$. وما يبدو غريباً من وجهة نظر فلسفية يشبه تقريباً جيداً من وجهة نظر واقعية، بمعنى لطلب تجريب فيزيائي.

٥-٣-٣ كيف تنهار الصورة التقليدية

إن الحسابات التي قام بها كل من "بيث" و"موت" سابقاً صالحة فقط في النطاق غير النسبي. وفقاً لحسابات "بيث" عام ١٩٣٠، فالطاقة المفقودة نتيجة التأين صغيرة وشكل مسار الجسيم سلس ومنتظم. وتنهار الصورة شبه التقليدية للجسيمات النسبية. وتقرّ ميكانيكا الكم الكهروديناميكية أن الجسيم لا يفقد طاقته بشكل منتظم. فبسبب التآرجح الكمي، فالطاقة المفقودة على طول مسار الجسيم تصبح غير منتظمة تماماً وقد تحدث انحرافات بعيدة جداً عن المسار التقليدي. فالعديد من العمليات المتنوعة قد تؤدي إلى تأرجحات كبيرة في الطاقة المفقودة. وبالإضافة إلى الطاقة المفقودة بالتأين، تقرّ ميكانيكا الكم الكهروديناميكية بوجود عمليات تولد أشعة الكبح وخلق الأزواج؛ أي انبعاث فوتون أو تولد إلكترون وبوزيترون، على التوالي. هذه العمليات مرتبطة بتأرجحات كبيرة في الطاقة المفقودة على طول مسار الجسيم. تلك العمليات تحدث انعطافات غير منتظمة تخالف الشكل التقليدي للمسار الذي تنبأ به موت" في ١٩٢٩ والذي افترضه "بيث" مسبقاً عام ١٩٣٠ في حسابه للطاقة المفقودة.

إن الطاقة المفقودة بالتأين هي كمية صغيرة، بصفة عامة، إذا ما قورنت بطاقة الجسيم. وحسابات "بيث" ١٩٣٠ لا تتناولها على قدم المساواة مع طاقة الإثارة لذرات مادة الكشاف، في إطار ميكانيكا كم التشتت لـ"بورن". فطاقة التأين هي طاقة إثارة إلكترون إلى حالة التواصل؛ أي إلى الحالة غير المقيدة للإلكترون الحر خارج الذرة. وطبقاً لنتائج "بيث"، فالتأين لا يؤثر بعد في الشكل شبه التقليدي المنتظم للسلس لمسار جسيم (على الرغم

من أنه يجب أن يؤثر في الثقة في التفسير التجميعي السليم لنظرية ميكانيكا الكم للتشتت). إن الطاقة المفقودة نتيجة أشعة الكبح أو خلق الأزواج هي مقدار جوهرى بالمقارنة بطاقة الجسيم. فهي تؤدي إلى فقدان فجائي لقدر كبير من طاقة حركة الجسيم المشحون عند نقطة من مسار. والمسارات الناتجة غير منتظمة. فهي ذات انعطاف ملحوظ. وبعد أن أوضح "مولر" كيف يمكن أن تندمج نظرية "ديراك" للإلكترون مع ميكانيكا الكم للتشتت عام ١٩٣١، مدد "بيث" و"بلوخ" و"هتلر" حسابات "بيث" إلى تلك العمليات النسي تطيح كلية بالصورة التقليدية لمسار الجسيم. وتعتمد القيم المتوقعة الكم كهرومغناطيسية لعمليات التشتت هذه على طاقة الجسيم المشحون المار خلال المادة. وفي مدى طاقة الجسيم غير النسبوية تغلب عملية التأين بينما تهمل الترددات النسبوية لأشعة الكبح أو خلق الأزواج. وفي النطاق النسبوي، يزداد تردد العمليات الأخيرة سريعاً بتزايد طاقة الجسيم^(١). وفي التحول من النطاق غير النسبي إلى النطاق النسبي، يضيع الشكل شبه التقليدي المنتظم السلس للعدد المتزايد لمسارات الجسيم الذي تنبأ به كل من "موت" و"بيث" عامي ١٩٢٩-١٩٣٠.

ولذلك، فمع ازدياد طاقة الجسيم ينهار التناظر بين أشكال مسارات الجسيم الفردى والحالة التقليدية خطوة وراء خطوة. وعند الطاقات المنخفضة جداً للجسيم، فإن عمليات التشتت التي تحدث قطرات في غرفة "ويلسون" قد تعتبر شبه مرنة؛ بمعنى أنه من الممكن إهمال كمية الحركة المنتقلة والطاقة المفقودة نتيجة التأين. وفي هذه الحالة، تتوقع ميكانيكا الكم لتشتت مسارات

(١) انظر روسي ١٩٥٢، ص ٢٢-٢٧.

ذات أشكال تقليدية تامة للجسيم كما توضحها حسابات "موت" عام ١٩٢٩. إن حسابات "بيث" عام ١٩٣٠ تبين أنه في الحدود $v \rightarrow c$ ؛ أى الحدود التى تتلاشى فيها السرعة v ، يوجد تناظر متبادل مع حسابات "بور" التقليدية للطاقة المفقودة. وللجسيمات السريعة التى لا تصل إلى السرعات النسبوية، تنهار نظرية "بور" الكلاسيكية للتأين ولكن حسابات "بيث" شبه الكلاسيكية عام ١٩٣٠ للطاقة المفقودة بالتأين توضح أن شكل مسار الجسيم فى النطاق غير النسبوى لا يزال يتوافق مع الصورة الكلاسيكية لكل الأغراض الإجرائية.

وفى النطاق النسبوى، من الممكن أن تتسبب التأرجحات الكمية فى طاقة مفقودة كبيرة نسبياً غير متوقعة وفجائية. وبسبب هذا يخالف المزيد والمزيد من مسارات الجسيمات الصورة الكلاسيكية. ومع زيادة طاقة الجسيم، تزداد تكرارات المسارات المارقة ذات الانعطاف. ولذلك كانت المعادلات المستنتجة بواسطة "بيث" و"بلوخ" و"هنلر" فى الفترة بين عامى ١٩٣٢-١٩٣٤ للطاقة المفقودة للإلكترونات النسبوية نتيجة التأين وأشعة الكبح والأزواج المخلفة، غير جديرة بالثقة بالنسبة إلى المسارات المنفردة. فهى تنطبق فقط على المستوى الاحتمالى للمسارات العديدة للجسيمات. فعلى المستوى الاحتمالى ينهار بالتدريج التناظر مع الوصف التقليدى لمسارات الجسيمات؛ إذ إنه بزيادة طاقة الجسيم يزداد عدد المسارات الحائدة غير المنتظمة غير السلسة التى تنخفض دون معدل السلوك. وتلك تخالف التوقعات شبه الكلاسيكية للمسارات المنتظمة السلسة المتتابعة لقياس النقاط المرئية التى تقابل الحالة الكلاسيكية عند الحدود التى تقترب سرعة الجسيم فيها من التلاشى. وبالتالي فلطاقة المتناقصة للجسيم، يستعيد التناظر وجوده

أو لا عند المستوى الاحتمالي بدلالة عدد متناقص من مسارات الجسيمات التي تتدنى تحت المعدل المتوقع من الطاقة المفقودة.

وعلى أي الأحوال، فلا تزال معادلات الكهروديناميكا الكمية مرتبطة بالمفهوم شبه الكلاسيكي لـ"بيث" عن الطاقة المفقودة التي يرجع سببها إلى عمليات التشتت المتكررة على طول مسار فردي. وعلى وجه الخصوص، فهي ببساطة قد أدرجت في صياغة "بيث" في المعادلة (5.11) لمتوسط الطاقة المفقودة ΔE على طول Δx من المادة. وللمرة الثانية، هذا الإجراء له ما يبرره بإسهامات الدرجة الأولى غير المترابطة لميكانيكا الكم للتشتت. وحقيقة أنها تفرض ذاتها، ولا تجعل هناك أي بأس في تطبيق مناهج تقليدية عند تحليل مسارات الجسيمات. لقد أدت حسابات "بيث" و"بلوخ" عامي ١٩٣٢ و١٩٣٣ إلى معادلات "بيث" و"بلوخ" لحساب متوسط الطاقة المفقودة للجسيم المشحون لكل طول مسار في المادة التي تتكون من ذرات ثقيلة^(١). إن معادلات "بيث" و"بلوخ" تجعل من الممكن حساب قيمة نظرية لمتوسط مدى الجسيمات المشحونة خلال نوع ما من مادة الكشاف^(٢).

٥-٣-٤ تحليل البيانات في تجارب التشتت

بعد تماسك مفاهيم الكهروديناميكا الكمية، تم استخدام المعادلات شبه التقليدية التي نوقشت فيما سبق، في تحليل مسارات الجسيمات. وعلى الرغم من انهيار الصورة التقليدية للطاقة المفقودة في النطاق النسبي، فإنه قد أصبح

(١) المرجع Bloch 1933 وللحسابات نصف الكلاسيكية انظر المرجع ٥١.

(٢) المرجع ٥١.

من الممارسة التجريبية تطبيقها في مسارات الجسيمات الفردية بروح حسابات "بيت" شبه التقليدية. وقد استخدمت المعادلات شبه التقليدية الناتجة في حسابات $\Delta E/\Delta x$ على مدار عقود. فهي تنتمي إلى خلفية المعلومات القياسية لفيزياء الجسيمات. ومن هنا وحتى يومنا هذا من الممكن إيجادها في أحدث إصدارات "كتيب فيزياء الجسيمات"^(١). وعلى المستوى الفردى يمكن أن يعطى هذا الإجراء نتائج خاطئة؛ لأن الطاقة المفقودة ΔE لكل طول Δx هو قيمة متوسطة احتمالية بينما تتسبب مسارات الجسيم المنفرد عن تأثيرات تشتتات عشوائية. وبالإضافة، يكون توزيع فقدان الطاقة الحقيقي لكل طول من الكشاف حول القيمة المتوسطة جد بعيد عن توزيع "جاوس" بسبب عمليات أشعة الكبح وخلق الأزواج اللذين يعطيان تراوحية كبيرة. ومعنى هذا أن فى أى تجربة تشتت عالية الطاقة، تكون هناك نسبة صغيرة لطول بالغ القصر من مسارات الجسيمات ترجع إلى جسيمات ذات طاقة عالية جداً وتتافى بشدة علاقة المدى بالطاقة شبه التقليدية التى استنتجت من معادلة "بيت" و"بلوخ". وفى قياس أعلى الدقة لمقطع تفاضلى يجب تصحيح الترددات النسبية لكميات الحركة المختلفة للجسيمات والتي تحرف بسبب هذه المسارات ذات الطاقة المفقودة العالية وتأثيراتها، عند المستوى الاحتمالي وذلك بأخذ تنبؤات كهروديناميكا الكم فى الاعتبار.

وهذا أمر ممكن؛ حيث إن تنبؤات كهروديناميكا الكم للتأين وأشعة الكبح وخلق الأزواج معروفة وتم اختبارها جيداً. وبالإضافة إلى ذلك، فإن انحراف الجسيمات المشحونة نتيجة عمليات التشتت المرنة المتعددة داخل

(١) انظر معادلات تناقص الطاقة فى الصفحات من ٢٣٨ إلى ٢٥٥، من المرجع PDG

المادة، قد تم حسابها بكهروديناميكا الكم. ولأن معجلات الجسيمات اليوم تولد وابل جسيمات بشدة وطاقة بالغتا الدقة فى التحديد، فتوقعات كهروديناميكا الكم قد تم اختبارها، ليس فقط من حيث متوسط الطاقة المفقودة ولكن أيضاً من حيث التراوح حول القيمة المتوسطة وكذلك دقة الشكل "اللاجوسى" للتراوحات الكمية.

وفى ممارسة تحليل بيانات تجارب تشتت عالية الطاقة، على مدى العقود القليلة الفائتة، فقد توائمت كهروديناميكا الكم والمعادلات شبه التقليدية للطاقة المفقودة من الجسيمات المشحونة داخل المادة كما يلى: لقد استخدمت معادلات "بيذ- بلوخ" ومعادلات "بيذ - هتلىر" لحساب الطاقة المفقودة $\Delta E/\Delta x$ لنوع معين من الجسيمات المشحونة داخل نوع معين من المادة للاستدلال على كمية الحركة الابتدائية فى بداية مسار جسيم وذلك من الشكل الحقيقى للمسار.

وما الطريقة التى تم عمل هذا الأمر بها إلا نموذج لتفريق قِصاصات من النظريات غير المتوافقة معاً طبقاً لواقعية حدسية. وهذا ما أطلقت عليه "نانسى كارتررايت" الفيزياء التدريجية. ومتوسط الطاقة المفقودة ΔE لطول محدد من الكشاف Δx قد تم تفهمها بسعة أفق على أنها الطاقة التفاضلية المفقودة على طول مسار معين، $\Delta E/\Delta x$. وهذه الكمية قد أدخلت على الصيغة التقليدية، $F = \left(\frac{q}{c}\right) v \times B$ ، لقوة "لورنس" بالأسلوب الآتى:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{q}{m} p \times B + \frac{|p|}{m} \left(\frac{dp}{dx}\right) \quad (5.13)$$

وهنا، نحصل على السرعة ($v=p/m$) من (dx/dt)، حيث p و m هما كمية الحركة والكتلة وتحسب dE/dx من معادلة "بيث" (5.11) للطاقة المفقودة داخل المادة. وتصف المعادلة التفاضلية (5.13) متوسط التناقص في كمية الحركة لجسيم مشحون داخل مادة نتيجة استنفاد الطاقة على طول مسار الجسيم. وقد تم تنفيذها في كل برنامج كمبيوتر يقوم بحساب كمية الحركة الابتدائية في بداية مسار جسيم وله صلة بقياس المقطع التفاضلي لتشتت معين. ومن هنا، تكون طريقة القياس المبينة هنا وراء كل قياس عالي الدقة والتحديد لمقطع تفاضلي أو كلي، شاملة القياسات التي تم وصفها في الفقرتين (3-4) و (4-4). على أي حال، هذه الحسابات تجرى على متوسط القيمة الإحصائية لعملية عشوائية غير منتظمة. ولذلك ففي كل برنامج كمبيوتر للتحليل الإحصائي لمسارات الجسيمات في تجربة تشتت عالية الدقة والتحديد يدخل عليها التصحيح الإحصائي. وهي تأخذ في الاعتبار الفرق بين متوسط القيمة الإحصائية والتراوحية أو الفرق بين القيمة المتوقعة الكم ميكانيكية (E) والتوزيع "اللاجواسي" للطاقة المفقودة حول القيمة المتوسطة (E) للتراوح الكمي الذي يتسبب عن عمليات أشعة الكبح وخلق الأزواج. وعلى المستوى الاحتمالي لتحليل البيانات، يؤخذ في الاعتبار المسارات المنحرفة التي بلا شكل متوسط (غير الكلاسيكية) وذلك لعمل تصحيح التكرارات النسبية المقاسة للجسيمات ذات كمية حركة معينة لتأثيرات الكهروديناميكا الكمية على المستوى الاحتمالي⁽¹⁾. وقد بنى هذا الإجراء في تحليل البيانات على الترتيب المنطقي الآتي:

(١) المرجع. Falkenburg 1996 بالمقارنة مع المرجع Cowan. 1998

(أ) يتم تحليل مسارات الجسيمات المنفردة طبقاً لمعادلات شبه تقليدية فيما يتعلق بالطاقة المفقودة على طول المسار. وبحل المعادلة التفاضلية (5.13) للعوامل المتغيرة لمسار معين ينتج عنه قياس قيمة كمية الحركة الابتدائية للجسيم في بداية هذا المسار.

(ب) للجسيمات عالية الطاقة أو ذات كمية حركة ابتدائية نسبوية ينهار التناظر مع الصورة التقليدية؛ ومعنى هذا أن بزيادة طاقة الجسيم لعدد متزايد من مسارات الجسيمات فعن تحليل البيانات الذي يتم طبقاً للفرض (أ) يعطى نتائج خاطئة وتصبح التكرارات النسبية المقاسة للجسيمات منحازة بهذا الخطأ في القياس. وفي المقابل تعطى التكرارات النسبية المقاسة للجسيمات قياساً محرفاً للمقطع التفاضلي.

(ج) على أي الأحوال، تنتبأ الكهروديناميكا الكمية بعدد مسارات الجسيمات التي من المتوقع أن يفشل عندها نتائج البيانات شبه التقليدية كما جاء في (أ)، ومثلها التوزيع العشوائي للانحرافات حول المعدل. وهكذا، تعطى التراوحية الإحصائية تنبؤاً احتمالياً لمسارات الجسيمات المنحرفة عن المعدل شبه التقليدي للتحريفي قياس المقطع التفاضلي. وهذا الخطأ في القياس على أي حال من الممكن تصحيحه على المستوى الاحتمالي بوسائل إحصائية بسيطة.

وفي الحقيقة، يؤدي هذا النوع من المنطقية وما يقابله من مناهج إحصائية في تحليل البيانات الخاصة بالقياسات عالية الدقة والتحديد للمقاطع، إلى نتائج قياسات مترابطة جداً لما تمت مناقشته في الفقرة (٤-٣-٢) حول المقطع التفاضلي. وهنا لا يمكن شرح طريقة تحليل البيانات بالتفصيل. ويكفي أن نقول: إنه في مقابل التقنيات البالغة التعقيد والخلفية المعرفية

النظرية لهذه القياسات، دائماً ما يقوم الفيزيائيون بتطبيق المزيد من مناهج القياس التكرارية كلما أمكن ذلك، ومراجعة الاتساق الداخلي لمعطياتهم. وفي فيزياء الجسيمات الحالية تدخل هذه الوفرة في صميم أى تجربة. فهناك قياسات مستقلة لخواص الكشّاف (شاملة معايرة مقياس الطاقة التي يوفرها الكشّاف) وهناك أيضاً اختبارات الاتساق الداخلي للبيانات قدر المستطاع. علاوة على ذلك، لا تؤخذ نتائج أى تجربة مأخذ الثقة إلا إذا تم تأكيدها بتجربة أخرى تأسيساً على مناهج تجريبية مستقلة. وعند هذه النقطة يصبح السعي خلف التكرار في مناهج القياس المعقدة مقابلاً للبحث عن القدرة على توليد النتائج التجريبية نفسها.

٥-٤؛ بناء الجسور: توحيد المبادئ

يتميز المنهج الناتج عن تحليل المُعطيات ببنية غير متجانسة، وتكرارية، و متماسكة على نحو ما تم عرضه في الفقرة (٥-٢). وله أسس شبه كلاسيكية: إنه يربط طرفاً تقليدياً لتحليل مسارات الجسيمات الفردية بالتصحّحات والتنبؤات الكمية الاحتمالية. وهي مسهبة: فهي تجعل من الممكن مقارنة توقعات الكهروديناميكية الكمية بمعادلات شبه تجريبية مبنية على نتائج قياسات تفصيلية ليست قائمة على الكهروديناميكية الكمية. إنها تعطى نتائج متناسقة: فالاتفاق بين التجارب المستقلة التي تقيس الكميات نفسها ومقارنة قوانين القياس للقياسات المستقلة وكذلك وفرة الأساليب التي تصمم لتحليل أى بيانات لفيزياء الجسيمات كلها تدعّم بعضها البعض^(١).

(١) فكرة أن التجربة (مثلها مثل أى عمل إنسانى) ليست محصنة ضد الانحياز والخطأ والخداع والتلفيق؛ لا تُمثل حُجة في مواجهة هذا الزعم.

هناك نقطة يجب أن تكون واضحة من المناقشات التي تمت في الفقرات السابقة. إن البناء غير المتجانس لنظرية القياس لفيزياء الجسيمات الحالية لا يعود إلى التطور التاريخي في المقام الأول؛ بل يعود إلى حقيقة أنه ما من نظرية موحدة حتى الآن للنطاق التقليدي والكمي يمكن أن تتكامل فيها أجزاءهما.

وبالتالي، فتتأسق هذه النظرية مبنى على حقيقة أن فتاتها ترتبط بنجاح من خلال مبادئ موحدة. وعلى وجه التحديد فمبدأ التناظر لـ"بور" له وظيفة بناء جسور الدلالات اللفظية بين النظريات غير القابلة للقياس عندما تفشل القواعد الموحدة الأخرى. ومن الممكن أن تسمى مثل هذه المبادئ الموحدة "جسر المبادئ". عندما تنشئ روابط نظرية مشتركة بين النظريات المتجاافية. وبأى حال، لا يجب خلط معنى هذه المبادئ مع فلسفة التجريبيين للعلم المدعوة "جسر المبادئ"؛ أى قواعد التناظر التي تربط لغة النظريات في الفيزياء واللغة الشواهدية للتجربة والقياس. وفي كتاب "تاجل" الشهير "بنية العلم" تم شرح هذا التفهم التجريبي لجسر المبادئ باستخدام نموذج "بور" للذرة لكل الأشياء محدثاً خلطاً مع مبدأ التناظر لـ"بور"⁽¹⁾. وقد كان المبدأ الأخير مبدأ رائداً جعل من الممكن بناء قوالب وبيدهيات نظرية الكم القديمة قبل ميكانيكا الكم عام ١٩٢٥. وفيما يلي يستخدم المصطلح "جسر المبادئ" فقط في هذا المغزى الرائد. و"جسر المبادئ" العامل في فيزياء الكم يقيم الترابط بين الفيزياء الكلاسيكية والكمية، بمعنى، الروابط بين النظريات. وهذه يجب ألا تتداخل مع قواعد التناظر التجريبية. وفي الفيزياء الحديثة، في

(1) Nagel 1961.

الحقيقة، ليس لقواعد التناظر التجريبية تلك الأهمية التي نسبها التجريب المنطقي إليها. والسبب في هذا هو أن ظواهر الفيزياء بعيدة عن كونها تجريبية في توجّه دقيق، فهي تركيبة شواهدية^(١).

٥-٤-١ مبدأ التناظر لـ "بور"

لقد رجع الإصدار الأصلي لمبدأ "بور" للتناظر إلى ترددات الانتقالات المشعة للذرة^(٢). وطبقاً لنظرية "بور" للذرة عام ١٩١٣، أقامت مبدأ الكم بإدخال مفاهيم كان الغرض منها أن الإلكترونات في المدار الذري لا يمكن أن يفقد طاقة بالإشعاع مثل الشحنات التقليدية، وإلا هرعت إلى النواة في فترة زمنية قصيرة. طبقاً لفرضية "بور"، فإن الذرة تشع فقط حينما تنتقل الإلكترونات من مستوى طاقة كمي إلى مستوى آخر أقل طاقة. وتخالف الانتقالات الكمية المشعة النظرية التقليدية للإشعاع. وتهيئ الآن مبدأ التناظر تشابهاً بين الإشعاع التقليدي والكمي.

ويرجع هذا التشابه إلى ترددات الضوء المنبعث. وينص المبدأ على أنه لمستويات الطاقة العالية وترددات الضوء المنخفضة، فترددات الضوء الانتقالات المشعة في ذرة ما تقابل ترددات انبعاثات شحنة تقليدية تدور حول شحنة مركزية. وقد صاغ "بور" مبدأ التناظر في عام ١٩٢٠ على النحو التالي: "لقد وجد تناظراً بعيد المدى بين أنواع الانتقالات المتنوعة الممكنة

(١) انظر الفقرة (٢-٤).

(٢) لما سيأتى انظر الجزء ب من المرجع. Darrigol 1992 وكذلك المرجع Falkenburg 1998.

بين الحالات الثابتة من ناحية وعناصر المتنوعة الانتقالية المتألّفة من ناحية أخرى. ولهذا التناظر طبيعة أن النظرية الحالية للأطياف فى وجهة معينة ينظر إليها على أنها تعميم منطقى لنظرية الإشعاع المألوفة⁽¹⁾.

ويؤكد التناظر أن نظرية الكم للإشعاع، من وجهة معينة، ممكن أن تلحق بسلاسة بالكهروديناميكا الكلاسيكية. إنه يسمح بتطبيق مفاهيم نظرية الانبعاث الكلاسيكية بالأطياف الذرية من خلال التشابه. وقد أطلق "بور" على هذا التطبيق المشابه "التعميم المنطقى" للنظرية الكلاسيكية للإشعاع، لاعتبار نظرية الكم للأطياف الذرية فى هذا التوجّه كصيغة للنظرية الكلاسيكية لها مظهر نوعى وشكلى. فالمظهر الشكلى يتناول التناظر العددى للصياغات الشكلية. فشكلاً، يتكون التشابه فى علاقة مقدارية من تقريب القوانين التقليدية والكمية للإشعاع الكهروديناميكى. إنه يقرر تحت أى ظروف ($n \rightarrow \infty$ and $\Delta v \rightarrow 0$) تتجاوز الترددات الكمية لإشعاع حدود التقريب إلى الترددات التقليدية. ويهتم الجانب النوعى بالتفسير الفيزيائى لهذه الصياغات بدلالة الكميات الفيزيائية نفسها. فنوعياً، يغطى التشابه مفهومًا كميًا بمعنى فيزيائى تقليدى (الصيغ الشكلية للترددات المنبعثة لذرة ما $(\Delta E = h\nu)$). إنه يقرر أن الترددات المنفصلة للإشعاع الطيف الخطى لذرة ما تمثل النوع نفسه من الخاصة الفيزيائية كتواصل لترددات الأشعة الصادرة من شحنات تقليدية متذبذبة.

وتتصل ترددات نظرية الكم والكهروديناميكا التقليدية بفئة متجانسة من الخواص الفيزيائية فقط عند أخذ الجانبين معًا. والعكس بالعكس فأخذهما معًا

(1) Bohr 1920

فهما يسمحان باعتبار الطيف اللاضوئي لموجات الميكرويف والموجات الطويلة الكهروضوئية كامتداد للطيف البصرى للضوء المنبعث من الذرة. ومن الواضح أن مبدأ "بور" للتناظر ليس مبدأً تجريبيًا للتناظر. إنها لا تعزى المفهوم التجريبي لخط فى الطيف للقانون العرفى للإشعاع ($\Delta E = h\nu$) والذى يحدد ضمنياً الأطوال الموجية للخطوط كما وضعها "نيجل" فى كتابه عام ١٩٦١^(١). هى لا تربط، بصفة مبدئية، مفاهيم اللغة النظرية واللغة الشواهدية معاً. ولكنها ترسى تشابهاً عددياً وفيزيائياً بين نظرية الإشعاع التقليدى ونظرية الكم؛ بمعنى، علاقة نظرية داخلية. وهذا التشابه المزدوج يسمح بالاستخدام المستمر للمفاهيم الكلاسيكية للتردد والطول الموجى فى نموذج "بور" و"سمرفيدل" للذرة.

لإن إصدار "بور" الأول لمبدأ التناظر الذى تم ذكره سابقاً، يرجع إلى نظرية الكم. وقد دعمت تطور نماذج الذرة قبيل ظهور ميكانيكا الكم. لقد كانت مبدأً رائداً جعلت من الممكن ربط المدارات الكلاسيكية فى ذرة "بور" و"سمرفيدل" بمبادئ الكمّ فى ثلاثية "بور" ١٩١٣. وهكذا، على الرغم من أن مبدأ التناظر فى نظرية الكم القديمة كان له وضع المبدأ الداخلى، فإنها تعبّر عن مجرد علاقة نظرية داخلية. فهو مبدأ جسري له مهمة رائدة فى تشكيل النظرية من ناحية، فيما تسمح بالتفسير الفيزيائى لنماذج نظرية الكم القديمة من ناحية أخرى.

(1) Nagel 1961, P. 95.

فى تعميم "هايزنبرج" الأخير أعاد تفسير مبدأ التناظر على أنه مبدأ يتناول صراحة علاقات نظرية داخلية. وفى عام ١٩٣٠، عمم "هايزنبرج" مبدأ التناظر بحيث يكون من الممكن أن يمتد شكل ونوع وجه التشابه بين الترددات التقليدية والكمية لتشمل كل الكميات الفيزيائية: "فى إصداره الأكثر تعميمًا، يعلن مبدأ "بور" للتناظر عن تشابه نوعى (يمكن أن ينفذ بالتفصيل) بين نظرية الكم والنظرية التقليدية ينتمى إلى الصورة التى نحن بصددها. وهذا التشابه لا يخدم كمرشد لإيجاد القوانين الشكلية، ولكن القيمة الحقيقية الخاصة له هى فى أنه يقدم، فى الوقت نفسه، التفسير الفيزيائى للقوانين التى توجد"^(١).

وطبقًا لذلك، تقف مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية فى تناظر دقيق مع مفاهيم ميكانيكا الكم. فمن ناحية يكون لهذا التناظر مهمة رائدة فى البحث عن تشكيل النظرية الجديدة. وباستخدام قواعد التناظر، يصبح الفرد قادرًا على إنشاء نظرية كم من نظرية تقليدية؛ حيث تقف نصوص النظرية التقليدية والنظرية الكمية ضمن علاقات جيدة التحديد الكمية للتقريب. ومن ناحية أخرى، فلتعميم مبدأ التناظر مهمة لفظية فى إمدادنا بـ"التفسير الفيزيائى" بنظرية الكم المجردة ونماذجها. ينص المبدأ على أنه من المسموح به تفسير الصورية

(١) المرجع Heisenberg 1930a&b (الترجمة الخاصة بى). لقد أهملت النسخة الإنجليزية الواردة عليه ثلاث نقاط: (أ) تعميم مبدأ "بور" الأصلي، (ب) الملامح الكيفية للتشابه و(ج) المصطلح "فيزيائى" فيما يتعلق بالتفسير: "هايزنبرج يستشهد بـ"بور" المرجع Bohr 1923.

المجردة لنظرية كم يتم الحصول عليها من خلال تعميم النظرية الكلاسيكية جزئياً على الأقل بدلالة المفاهيم الكلاسيكية المألوفة. ويؤكد التشابه النوعي بين الوصفين التقليدي والكمي على أن نظرية الكم بديهية من جهة يباها "هايزنبرج"؛ بمعنى، أن لنا تفهّماً نوعياً لعواقبه التجريبية على أساس عملي⁽¹⁾. وهكذا يكون لتعميم مبدأ التناظر أساس دلالات ألفاظ الاستمرار التي تضمن أن مسندات الخواص الفيزيائية مثل الموضع وكمية الحركة والكتلة والطاقة...إلخ، يمكن أن تعرّف في نطاق ميكانيكا الكم وأن الفرد يمكن أن يفسرها عملياً تمثيلاً مع طرق القياس التقليدية. إنها تعطي الكثير من العلاقات النظرية الداخلية من خلال ما يمكن أن تزوده المفاهيم السابقة ونماذج ميكانيكا الكم من مغزى فيزيائي. ولهذا المغزى الفيزيائي وجهان، أحدهما صوري والآخر غير صوري.

وكما ورد في النص الأصلي لـ"بور"، يقبع الوجه الصوري في علاقات التقريب بين القوانين التقليدية والكمية. هذه القوانين تحدد بذاتها المفاهيم الفيزيائية المتتالية بداهة أو ضمناً، من خلال البديهيات الخاصة بالديناميكا. والمعنى الصوري الذي يرد إلى مفهوم كمي من خلال تناظر شكلي مختلف، بأي حال. وطبقاً لنص "بور" لمبدأ التناظر عام ١٩٢٠، فهو يقبع في الشروط الصورية التي بموجبها يقوم عليها قانون الكم، تخلص تقريباً إلى قانون تقليدي. وفي منهاج صوري لاخترال نظرية يمكن أن تندمج المفاهيم التقليدية والكمية، جزئياً، من خلال معيار يوثق التناظر لتمييز المشاهدات⁽²⁾.

(1) Heisenberg 1927

(2) Scheibe 1999, P. 224-225.

إن الجانب غير الصوري لمعنى مفاهيم الكم عملي أكثر منه بسديهي. وبمعنى أكثر تحديداً، إنه يقبع في المقاييس التقليدية المعروفة للكميات الفيزيائية وأسسها العملية. فطبقاً لـ"بور" و"هايزنبرج" فالمعنى الفيزيائي لمفاهيم الكم الواردة من مبدأ التناظر، قابل للعمل^(١). إنه يكمن بطريقة يمكن معها أن تقاس قيم الكميات المناظرة بأسلوب قياس تقليدي (أو شبه تقليدي). بمعنى، أسلوب يكون فيه تعاضم المفهوم راسخاً عملياً، طبقاً لـ"كارناب"^(٢). ولقد أطلق "بور" و"هايزنبرج"، كل بطريقة مختلفة كلية، على هذا المعنى الفيزيائي لفظ "البديهي"^(٣). وباستعمال لفظ "بديهي" من كل من "بوهر" و"هايزنبرج" يعنى أنهما يعنيان "غير الصوري" وعلى التوالي أوجه المفاهيم الفيزيائية النوعية (تذكر أن رأيهما في المعنى الفيزيائي عن المفاهيم الكمية تتعارض بشدة مع الرأي البديهي لـ "أينشتين" في الجوانب العملية لمفاهيم الفيزياء)^(٤). وعلى أي حال، فالجوانب غير الصورية أو اللا بديهية لمفاهيم الفيزياء لم تستفد بعد بواسطة معانيها الفيزيائية. وبالإضافة إلى ذلك، فهناك السؤال حول ما إذا كانت وكيف تعزى هذه المفاهيم. تلك نقطة لم يركز عليها "هايزنبرج" وهي ما سأعود إليها لاحقاً. وعلى العكس، فمن المعروف جيداً

(١) يجب التنويه هنا مسبقاً أن هذا ليس كافياً بالنسبة إلى "بور"؛ إذ يُمثل مبدأ التناظر أيضاً دعامة لفسفته التمامية التي تهدف إلى إعطاء مرجع لمفاهيم الكم بدلالة ظواهر

كمية ونظائرها الكلاسيكية. انظر الفقرة (٧-٢-٢)، والمرجع. Pringe 2006.

(٢) المرجع. Carnap 1947.

(٣) المراجع. Bohr; 1928. و Heisenberg 1927. و Falkenburg 2005.

(٤) انظر الفقرة (١-٥).

فى الوقت الحالى أن مبدأ التناظر لا يستغرق نطاق نظرية الكم كلياً. فهناك العديد من الظواهر الكمية وليس لها تناظر تقليدى^(١).

ولقد عزا "هايزنبرج" لمبدأ التناظر التعميمي مهمة إعطاء التفسير الفيزيائى لمخلص تشكيل نظرية كم. ويعنى هذا أن على وجه الخصوص أن التشكيل قد تم تفسيره بطريقة يمكن معها أن تطبق فى مقابل خلفية الفيزياء الكلاسيكية وعلى شروط نصف تقليدية. (وفى الحقيقة، كل تجارب الذرة والنواة وفيزياء الجسيمات خاضعة لشروط نصف تقليدية طالما استخدمت أجهزة القياس المجهرية وصاغت تشتت جسيمات ما دون الذرة داخل الذرة فى هذه الأجهزة. والفرض التقليدى الحازم هو موضعية ذرات مادة الكشاف داخل الحجم المجهرى للمادة). ولقد سبق أن تناولنا بالفعل كيف يعمل هذا الأمر فى حالتين من الدراسة. فى الحالة الأولى يكون لمبدأ التناظر وارد مرجعى لم يتم ملاحظته بواسطة "هايزنبرج". وفى الحالة التزامنية يُنشئ مبدأ التناظر مرجعاً للوصف الكمى لمسار جسيم للمسار التقليدى لكل الأعراض العملية. وفى كلتا الحالتين ينهار مبدأ التناظر فى نطاق نظرية الكم النسبية.

١- فى تعريف معاملات الشكل فيما دون الذرة، اشترك تطبيقان لمبدأ التناظر التعميمي. الأول منهما هو سلسلة النماذج التى تم وصفها فى الفقرة (٤-٤). تلك النماذج لنظرية ميكانيكا الكم لتشتت تقابل

(١) على سبيل المثال الترابط "EPR" (المرجعان: Einstein et al 1935 و Aspect et al. 1982) وتأثير "بور" - "أهارانوف" ومحكوم "بوز-أينشتين" والشق المزدوج للفوتونات والإلكترونات المنفردة و تجارب "أى-طريق" للكم الضوئى. انظر الفقرات (٧-٣) إلى (٧-٥).

بالتقريب تشتت "رذرفورد" التقليدي تحت شروط واضحة المعالم. والتناظر التام بين المقطع التفاضلي التقليدي والكم ميكانيكى معطى فى معادلة "رذرفورد"؛ بمعنى، لجهد "كولوم" وللجسيمات المسبارة اللانسيبية وفى غياب المغزلية الكم ميكانيكية أو التأثيرات التبادلية. والثانى هو الممارسة الفيزيائية فى وصف التوزيع الشحنى داخل الذرة بمعامل شكل تقليدى، كما سبق شرحه فى الفقرة (٣-٤). فهو مبنى على التناظر بين ميكانيكا الكم لدالة الموجة للأجسام العديدة $|\Psi(r)|^2$ للجسيمات المشحونة فيما دون الذرة وتوزيع شحنى تقليدى $\rho(r)$ هو بمثابة تحويل "فورير" لمعامل شكل تقليدى $F(q)$. وهنا أخذ بمبدأ التناظر الذى يخدم التمثيل التقليدى $\rho(r)$ للكثافة الاحتمالية اللاتقليدية ولم يؤخذ بما ليس له معنى تطبيقى طالما لم تؤخذ الشحنات المقيدة فى الاعتبار. وطبقاً للتفسير التشغيلى المعتاد من ميكانيكا الكم، فإن $|\Psi(r)|^2$ تعنى احتمال قياس الموضع. على أى الأحوال، فالقياسات غير البناءة لشحنة منفردة داخل الذرة غير ممكنة. وهكذا، لتحديد $|\Psi(r)|^2$ بمبدأ التناظر بتوزيع شحنى نصف تقليدى داخل الذرة هو أمر يتجاوز تفسير "بورن-فون نويمان" الاحتمالى المعتاد لميكانيكا الكم.

٢- يقوم تحليل مسارات الجسيمات على سلسلة مشابهة للنماذج التى تربط ميكانيكا الكم للتشتت بالحالة التقليدية المقابلة. وهنا نذكر أن النموذج الذى يقابل الحالة التقليدية وهى حسابات "بورن" للطاقة المفقودة بالتأين عام ١٩١٣ بعيدة جداً عن الواقعية كما سبق بيانه فى

الفقرتين (٥-٣-٣) و (٥-٣-١). وبالإضافة، فقد اتضح أن حسابات "موت" يؤكد مبدأ التناظر التعميم، بينما نتق فيها حسابات "بور" حتى فى النطاق الذى لا تعد صالحة للعمل فيه.

ونرى من كلتا الحالتين أن التناظر مبدأ قوي. ويقدر ما تعد صالحة، يمكن للصورة التقليدية أن تصان لكل الأغراض العملية. وفى الحقيقة، فمبدأ التناظر يمنع الواقعية التقليدية من الانهيار فوراً فى النطاق الكمي^(١). وفى كل من الحالتين اللتين تمت مناقشتهما آنفاً هناك سلسلة من النماذج قائمة على نموذج ذى تناظر تقليدى. وعلى طول هذه السلسلة من النماذج تنهار الصورة التقليدية للواقعية ولكن بالتدرج فقط. ويزعم مبدأ التناظر أن التوزيع الشحنى لما دون الذرة ومراكز التشبث ومسارات الجسيمات نصف التقليدية لها تواجد، على الأقل، فى النطاق اللانسبى، كما لو كانت جسيمات تقليدية.

وهنا يجب إضافة ملاحظة، وهى أن التفسير التطبيقي لميكانيكا الكم طبقاً لـ"بورن" و"فون نيومان" ليس كافياً للتفسير الفيزيائى لتجارب عديدة للفيزياء الذرية والنوية وفيزياء الجسيمات. وبالإضافة، هناك حاجة لمبدأ التناظر المعممة وقواعد توحيد أخرى.

وعلى وجه الخصوص، فتفسير "بورن- فون نيومان" لا يفرز مرجعاً للتوزيع الشحنى فيما دون الذرة. إنه لواقع أن نفس مربع السعة $|\Psi(r)|^2$ لدالة الموجة لعديد الأجسام Ψ للإلكترونات أو النويدات داخل الذرة كتوزيع

(١) كما هو مبين فى الفقرة (٥-١)؛ بمعنى الفروض التقليدية حول المقاصد الفيزيائية كأسباب للظواهر.

شحنى فراغى. وهذا يعنى افتراض أن التوزيع الشحنى يتفاعل كما لو كان العديد من قياسات الموضع للإلكترونات المؤدية إلى تأين قد أجريت. وما يقابل ذلك من التفسير للبروتونات والنيوترونات هي أمور يغلب عليها الاصطناع. والرابط النووي لقياس موضع إلكترون بالتأين هو انشطار نووى. وفي حال التوزيع الكواركى داخل النويدات، نتيجة احتواء الكوارك فليس هناك رابط لقياس الموضع هذا على الإطلاق. وفي الحقيقة، هناك فجوة إضافية حاسمة من التفسير. ففي تجارب التشتت عالية الطاقة التى يقاس فيها معاملات الشكل والدوال البنائية لا يمكن تفسيرها من خلال دالة الموجة للأجسام العديدة للبروتون أو النيوترون. فدوال النويد البنائية يعبر عنها بدلالة توزيع كمية الحركة للكوارك الحر؛ أى، بدلالة الموجة المستوية الكمية. هذه التوزيعات لكمية الحركة للكوارك مستخلصة من المقطع التفاضلى المقاس نسبة إلى نموذج التشتت النقطى الذى بدوره ثابت المقياس؛ أى قائم على منهاج صارم للتحليل البعدى^(١).

إن الفيزياء العملية، كما يبدو، لا تلقى بالألوان لوقائع القضية الفلسفية. إنها قائمة على الاستخدام الضمنى للقواعد الجسرية من ناحية وواقعية ضمنية من ناحية أخرى. وفي عديد من الحالات فالوارد المرجعى لمبدأ التناظر المعممة كاف لأغراض العملية. أما أين ينهار التناظر عند الحالات التقليدية فعلى أى حال الواقعية الضمنية لا تعد تقليدية؛ بل واقعية حول موجات الكم التى بنيت على ازدواجية الجسيم والموجة^(٢).

(١) الفقرتان (٤-٣) و (٤-٤) والملحقان (ب) و(د).

(٢) انظر الباب السابع وخاصة الفقرة (٧-٣-١).

وهكذا، فقد أقام مبدأ التناظر جسورًا لبعض الفجوات اللفظية الحاسمة بين نظرية الكم والنظريات التقليدية. وعلى عكس مبدأ التناظر لفلسفة التجريبي للعلوم، فهي لا تتسب مفاهيم شواهدية لمفاهيم نظرية. هي بالأحرى تخلق تشابهات نوعية ومقدارية بين نظريتين أو نماذجهما. إنها ترسي روابط داخل النظريات بين تعبيرات ونماذج نظرية تقليدية ونظرية كمية. وبها العمل يتم التلاحم بين لغة الفيزياء الكلاسيكية ولغة نظرية الكم. وفي الحقيقة، فالتفسيرات الواقعية لميكانيكا الكم فيما وراء تفسير "بورن" و"قون نيومان" هي الأفضل بلا جدال. فليس لها مزيد من واردة مرجعي بعد مبدأ التناظر المعمم. وبالنسبة إلى التفسير الفيزيائي لبناء ما دون الذرة، فمبدأ التناظر هو القوى. وبالإضافة، فتناظر نماذج نظرية ميكانيكا الكم للتشتت حتى مراكز التشتت التقليدية ومسارات الجسيمات التقليدية تنهار فقط عندما تنهار التفسيرات الواقعية؛ أي في نطاق نظرية المجال الكمي النسبية. وعلى وجه الخصوص يسرى على مسارات "بورن" أو عوالم أخرى.

٥-٤-٣ مبادئ توحيد أخرى

لنقم الآن بنظرة قريبة في العلاقة بين مبدأ التناظر وقواعد أخرى للتوحيد في الفيزياء. لقد رأينا بالفعل كيف ينهار التناظر بين نظرية الكم للتشتت بالصورة التقليدية لمراكز التشتت ومسارات الجسيمات تدريجيًا في النطاق النسبي. وعلى ذلك فمبدأ التناظر التعميمي ضروري ولكنه ليس كافيًا لتدعيم الوحدة اللفظية للفيزياء. فهناك الحاجة إلى المزيد من قواعد التوحيد لتعريف الطول والزمن والكتلة من أفق الواقع الكوني نزولاً إلى الكوارك

بدلاً من الحديث عن حجم الكون ومقياس بلانك. والمبادئ الآتية تساهم فى إرساء وحدة لفظية معينة فى الفيزياء. ولكنها بأى حال ليست من القوة الكافية لتدعيم المزاعم المرجعية لمنهج القياسات التى نوقشت سابقاً:

١- مُبرهنة(*) "إيرنست": وهذه مستنتجة من مبدأ التناظر؛ فهى تنص على أن القيمة الميكانيكية الكمية المتوقعة لمشاهدة تقع تحت قانون الحركة نفسه لما يناظرها من كمية فيزيائية تقليدية. ولا تصلح لعمليات التشتت فيما دون الذرة التى نوقشت فى هذا الكتاب. فقوى ما دون الذرة بالغة الشدة. وعلى وجه الخصوص، هى لا تصلح للدخول فى حسابات "بيث" فى عام ١٩٣٠. لمتوسط الطاقة المفقودة من جسيم مشحون داخل المادة (E) والتى استخدمت فى تحليل مسارات الجسيمات حتى يومنا هذا.

٢- فرضية إرجوديك: وتتص هذه على أن الزمن المتوسط لديناميكات أعضاء تجميع إحصائى يساوى متوسط التجميع. وهذا الزعم يسد الفجوة بين مستويات تطوير النظام الفردى والسلوك التجميعى. وكمبدأ للإحصائية التقليدية، على أى حال، هى الأخرى لا يمكن أن تكون أقوى من مبدأ التناظر. وفى حالة مسارات الجسيمات، ينطبق مبدأ إرجوديك بابتدال على الوصف الكم ميكانيكى المثالى لـ"موت". وطالما كانت الطاقة المستنفدة مهمة على طول مسار جسيم، فالجسيم لا يعتبر متغيراً فى الحالة الكمية. وبذلك، ففى نموذج "موت" فالنقاط

(*) المبرهنة theorem فى نسق صوري ما - مثل الهندسة الإقليدية - هى عبارة يمكن أن تُشتق من بديهيات النسق. (المترجمان).

المقاسة على طول مسار جسيم (والتي تقابل الزمن المتوسط) صادرة من الحالة الكمية نفسها. ومن هنا تعتبر مساهمة في متوسط التجميع.

٣- التماثلات وقوانين الحفظ: لقد كانت ولا تزال التماثلات وقوانين الحفظ أدوات تصميم قوية في فيزياء الجسيم على مدى عقود. إنها تكمن وراء إنشاء نظريات المجال الكمي ذي المقياس الثابت في الأيام الأولى من نموذج الكواركات عام ١٩٦٣ حتى تكوين المعادلات في نظرية الوتر الفائق. فالتماثلات تثبت فئة من النظريات. ومن الواضح أنها أقوى من مبدأ التناظر. فعلى وجه التحديد هي تؤدي إلى التعريف الأكثر عمومية وبديهية لجسيم. في عام ١٩٣٩ وصف "فجنر" التمثيل غير القابل للاختزال لمجموعة "بوانكاريه" بدلالة الكتلة والمغزلية و"النديه"^(١). ولكن فيما تحتاجه فيزياء الجسيمات يصبح هذا المفهوم البديهي لمعنى الجسيم بالغ العمومية. فالتعريف لا يقم مرجعاً للجسيمات الفردية أو عمليات التشتت. إنه ينطبق على مستوى النوع لا على مستوى النموذج. وتملاً الفجوة المرجعية بربط التماثلات بقوانين الحفظ طبقاً لنظرية "نويذر" وتطبيق قوانين الحفظ لوقائع التشتت الفردية. وهذا التطبيق في الواقع لا يمكنه تجنب استخدام ضمنى لمبدأ التناظر التعميمي لـ"هايزنبرج". فعلى سبيل المثال، المغزلية هي كمية بلا رابطة تقليدية. وفي التحليل الأخير ارتبط قياسها ببعض قياس كمية الحركة الزاوية أو عزم مغناطيسي وهو يرتبط بالمغزلية وهو يفسر

(١) المرجع Wigner 1939. ويصلح هذا التعريف لمجموعة "جاليليو" غير النسبوية أيضاً.

متشابهات "هايزنبرج" بالكميات التقليدية المناظرة.

٤- قواعد الاختيار الفائق في ميكانيكا الكم تعمل الكتلة والشحنة والمغزلية مع جميع المشاهدات الأخرى. وبالتالي فلها سلوك تقليدي. وطبقاً لميكانيكا الكم في فراغ "هلبيرت" فهم يتواجدون فقط في أوضاع وحيدة؛ أى أن حالاتها الكمية لا تؤدي إلى تراكب. وهذه الحقيقة تمت صياغتها من خلال قاعدة للاختيار الفائق تقوم باختيار الحالات القابلة للإدراك فيزيائياً^(١). وترتبط قواعد الاختيار الفائق ارتباطاً وثيقاً بتمثيلات نظرية الكم وتعريف "فجنر" للجسيم بدلالة التمثيل غير القابل للاختزال لجموعات التماثل. إنها تختار حالات المشاهدات المميزة لنوع الجسيم والتي تقابل الخواص الدائمة غير المتغيرة لعملية كمية. وعلى أي حال هي ذات صلاحية محدودة كمبدأ جسري.

ومن ناحية أخرى، فامتداد المفاهيم التقليدية للشحنة والكتلة إلى نظائرها الكمية قائم، مرة أخرى، على إصدار "هايزنبرج" العمومي لمبدأ التناظر. فالأخير فقط يعدّ التفسير الفيزيائي لمفاهيم الكتلة والشحنة في النطاق الكمي وذلك بإخبارنا ما الحالات الكمية القابلة للتحقيق فيزيائياً في فراغ "هلبيرت" وما غيرها الذي يعتبر دون ذلك. وعلى الجانب الآخر، فالقواعد الفائقة الاختيار لتعدّ صالحة في نظرية المجال الكمي. وعلى وجه الخصوص، فحالات الكوارك في النموذج القياسي الحالي لفيزياء الجسيم تنتهك قواعد الاختيار الفائق للكتلة والشحنة (الضعيفة كهربياً). وطبقاً لنظرية

(١) المرجع. Streater and Wightman 1964.

"سلام - وينبرج" للتفاعلات الضعيفة كهربياً، فالكتلة والحالات الوحيدة المميزة للكواركات ليست متطابقة. فنظرية "سلام - وينبرج" تحتوى على مصفوفة "كوبياشى - ماسكاوا" التى تصيغ تراكب حالات الكوارك. وهذا المسمى "خلط الكواركات" أساسى وجزء تم اختياره جيداً فى النموذج الحالى لفيزياء الجسيم^(١).

٥- الـ "لا متغير" البعدى. هى مبدأ تماثل عامة جداً. إنها تزعم "لا متغيرة" نظرية فيزيائية تحت تغير نظام الوحدات، من نظام "سم - جرام - ثانية" مثلاً إلى طول وكتلة وزمن "بلانك". وفرض أن كل النظريات ثابتة بعدياً هو فرض رائد قوى فى الفيزياء الكلاسيكية. إنه يؤدي إلى منهاج رائد فى التحليل البعدى^(٢) كما يؤدي إلى محاولات حالية لإنشاء نظريات فيزياء على مقياس "بلانك"^(٣). وأساس الفرض النظرى ضعيف جداً. فهو البديهية "الأرشميدسية" لنظرية الأعداد الحقيقية، والتى طبقاً لها، فلأى عددين حقيقيين a, b يتحقق فيهما أن $a < b$ يكون هناك عدد طبيعى n بحيث $b > nxa$ ^(٤). وبذلك فأية وحدة a تقيس أى كمية b . ومن الواضح أن البديهية "الأرشميدسية" ومعها

(١) المرجع . Nactmann 1990 .

(٢) والملحق (ب).

(٣) المرجع . Calendar and Huggett 2001 .

(٤) تم تأكيد هذا فى مقالة "هلبرت" الشهيرة حول المنهاج البديهي. انظر المرجع Hilbert

1918. والملحق (أ).

فرضية الـ"لا متغيرة" البعدى هي مبدأ التوحيد الأكثر عمومية لكل الفيزياء طالما استخدمت النظريات الأعداد الحقيقية. إنها تجعل من الممكن إنشاء مقاييس لكميات فيزيائية من حجم الكون إلى مقياس "بلانك". وعلى أى الأحوال، وعلى الرغم من ذلك، فإن مبدأ الـ"لا متغيرة" البعدى أكثر عمومية من مبدأ التناظر، ومن الواجب هنا أن نؤكد أن الأولى لا يمكن أن تعمل دون الأخيرة. وكما فى حالة التماثلات ومبدأ الاختيارات الفائقة، هناك حاجة إلى علاقة ترابط داخلية للنظريات تنشئ تناظراً بين المفاهيم الفيزيائية للنظريات الكلاسيكية والكمية على مقاييس مختلفة. إن قواعد التوحيد التى تمت مناقشتها حتى الآن تعمل بالتزامن مع مبدأ التناظر. فمعاً يوحيان كيف نمدد الكميات الفيزيائية التقليدية إلى النطاق الكمي. وفيما وراء صلاحية مبدأ التناظر هما تقترحان كيفية إنشاء مقادير كمية جديدة كالمغزلية و"الندية" اللتين تعرفان بدلالة التماثل والتي تندمج بشكل ما ضمن الكميات المعروفة حتى الآن. وأخذاً فى الاعتبار امتداد مقياس الطول والزمن والكتلة إلى نطاق ما دون الذرة فكل هذه القواعد تعمل من أعلى إلى أسفل. إنها تساعدنا على أن نبين النطاق الكمي بدلالة الكميات الفيزيائية الكلاسيكية والتماثلات. ولكنها لا تعطى شروحا من أسفل إلى أعلى للعالم التقليدي بدلالة مفاهيم كمية. والمبدأ الوحيد الذي يعمل فى الاتجاه المعاكس هو عدم التماسك المنطقي؛ أى أن التحام الحالات الكمية فى بيئة الديناميكا الحرارية يتفكك.

٦- عدم الترابط المنطقي: ويعنى هذا أن فى بيئة مجهرية ذات درجات متناهية فى الكبر، فحدود التداخل لنظام كمى متشابك يتبدد سريعاً فى البيئة. فهى تضمحل بفعل تأثيرات الديناميكا الحرارية. وعلى الرغم من أن نظرية عدم التماسك المنطقى تفترض عالماً من الديناميكا الحرارية التقليدية (بدلاً من التنبؤ ببزوغ العالم التقليدي)، فإنها تُبين كيف يكون للانحلال المشعة ونواتج القياسات نتائج محددة^(١). ولكنها تبين نشوء وقائع محددة فى عالم تقليد فقط على المستوى الإحصائى فقط لكل الأغراض العملية؛ أى ليس كموضوع قاعدة. فعدم التماسك المنطقى لا يدع تراكبات حالات كمية متشابكة أن تختفى. فالحالات المترابطة تظل مترابطة إلى الأبد على الرغم من أن ساعاتها تصبح قريبة من الصفر فى خلال فترة زمنية قصيرة. وعدم التماسك المنطقى لا تؤدى إلى أى تداع لدالة الموجة. وهى لا تعطى أى إشارة إلى ميكانيكية فيزيائية تبين أى نتيجة قياس فردى نحصل عليها فى النهاية. ومع ذلك، فهى تنشئ وحدة بين النطاق التقليدى والكمى على المستوى الاحتمالى. وعلى وجه الخصوص، هى تشرح لماذا تتوافق ميكانيكا الكم للتشتت مع مناهج الإحصائية التقليدية فى تحليل البيانات^(٢).

٤

(١) المرجع. Giuliani et. al. 1997.

(٢) فى الدرجة الأولى لنظرية الاضطراب، تنتبأ نظرية الكم لتشتت بتشتت غير مترابط. وبذلك فبالدرجة الأولى يكون عدم الترابط مكفولاً. وفى الدرجات الأعلى من هذه النظرية يعنى عدم الترابط أن تداخل التشتت عند الذرات المختلفة يضمحل سريعاً.

خلاصة الأمر أن مبدأ التناظر ومبادئ التماثل معاً يعطيان شرحاً من أعلى إلى أسفل للخواص الفيزيائية لجسيمات ما دون الذرة وعمليات التشتت وبنية ما دون الذرة. ولكن المبدأ الجسري الوحيد ذا الوارد المرجعي هو مبدأ التناظر. والتفسير الاحتمالي المعتاد لميكانيكا الكم ينشئ مرجعاً على مستوى نظام مكون من عدة أجزاء. وينطبق الأمر نفسه على مبدأ أسفل- أعلى الوحيد؛ أعني فرضية عدم التماسك المنطقي التي تحدث في بيئة ديناميكا حرارية. فهي لا تشرح إلا سلوك النظام المجهرى المكون من عدة أجزاء. مبدأ وحيد هو مبدأ التناظر يزعم أن ميكانيكا الكم للتشتت ترجع إلى مسارات الجسيمات الفردية ووقائع تشتت وهي تدعم بالتماثلات وقوانين الحفظ وقاعدة الاختيار الفائق. على أن هذه القواعد كلها تعمل على نوعية الجسيم. فهم لا يعزون إلى مستوى الرمز؛ أى إلى الجسيمات الفردية ونتائج القياسات. وبالإضافة، فمبدأ الـ"لا متغيرة" البعدى يدعم الممارسة الفيزيائية فى امتداد المقياس المعروف للطول والزمن والكتلة نزولاً إلى مقياس "بلانك" مما يؤدي إلى اعتبارات بعدية رائدة عن النظم الفيزيائية على أى مقياس. ولكن هذه المقاييس تنشأ وتمدد باصطلاحات تقليدية. من هنا فالموقف المأثور لـ"بور" هو أنه يتعين صياغة نتائج القياس في فيزياء الكم بلغة كلاسيكية.

٥-٥ مقاييس الكميات الفيزيائية

إن مقاييس الكميات الفيزيائية تصاغ بدلالة الطول والكتلة والزمن. وتبنى وحدة المقاييس فى مصطلحات تقليدية على الرغم من انهيار المفاهيم التقليدية بالتدرج فى النطاق الكمى.

كيف يكون من الممكن ألا يؤدي بناء مقاييس الطول والكتلة والزمن من نطاق ما دون الذرة إلى نطاق دراسة علم الكون إلى تناقض؟ إن مقياس الطول يغطى حجم الكون وحجم هذه الورقة والمسافة بين الكواركات فى البروتون أو النيوترون. فحجم الكون نحصل عليه من نماذج النسبية العامة (وعلى رأسها نموذج الانفجار الأعظم) بالإضافة إلى العديد من بيانات الفيزياء الفلكية. ويقاس حجم هذه الورقة بواسطة مسطرة. وقيست المسافة بين الكواركات داخل النويد من تشتت (الليبتون - النويد) فى فيزياء الطاقة العالية كما تم التنبؤ بها فى نماذج الديناميكا الصبغية. وبالمثل يشمل مقياس الكتلة، كتلة الإلكترون وكرات البلياردو والثقوب السوداء. وتتبع الإلكترونات الكهروديناميكا الكمية وتتبع حركة كرات البلياردو الميكانيكا الكلاسيكية بينما تتبع الثقوب السوداء النسبية العامة. وطبقاً لتوجه "كون" تولّد كل نظرية عالم رؤيتها. وإذا تبيننا هذه الفلسفة فى وجه التعدادات النظرية فى الفيزياء فعلينا أن نعتقد أن مقاييس الكميات الفيزيائية تعبر عالمًا متجزئًا إذا كانت قادرة على أن تعبر عالمًا على الإطلاق.

وفى إنشاء مقاييس الطول والكتلة والزمن دون فنوط من عالم متجزء، يوظف الفيزيائيون قواعد التوحيد التى تمت مناقشتها سابقًا. ولكن الأخيرة ليست من القوة الكافية التى تجمع الجوانب البديهية المرجعية والقابلة للتطبيق معًا. ففى النطاق الكمي تتباعد هذه الجوانب. إن الأسس البديهية لنظرية كم لا تودى إلى مفاهيم قابلة للتطبيق ترجع إلى نتائج القياس الفردى. على أى الأحوال، فقواعد التوحيد والأسس القابلة للتطبيق للطول والزمن والكتلة تجعل معًا مفاهيم الأجزاء المختلفة للمقاييس؛ حيث تتداخل بقدر كاف. وبذلك ينشأ نوع من الوحدة فى المقاييس.

١- لقد بنيت الوحدة البديهية على قاعدة موحدة عامة. وفوق كل ذلك فقد أنشأت قاعدة الـ"لا متغيرة" البعدى وما ارتبط بها من بديهية "أرشميدسية" لوحدة المقاييس^(١). وتعطى بديهية "أرشميدس" قاعدة بديهية بالغة الضعف. فأى نظرية قائمة على الأعداد الحقيقية من المتوقع أن تستوفى مطالبها. ومن الواضح أن البديهية ليست كافية لتمديد مثل هذه النظرية لمعاملات كمية وقيم معاملات قياس^(٢). ومع ذلك فليس هناك غنى عنها لأن "لا متغيرة" التفسير الفيزيائى لميكانيكا الكم بدلالة الطول والكتلة والزمن واشتقاق الكميات الفيزيائية قائمة عليها. وبالإضافة إلى ذلك، فالتماثلات والثوابت هى فى حد ذاتها أدوات بديهية^(٣). فهى تقرر إطاراً عاماً لإنشاء النظرية والعديد من الملامح السارة لفيزياء موحدة. وما يرتبط بها من قوانين حفظ؛ مثل حفظ الطاقة - كمية الحركة تودى إلى تعريفات بديهية لمفاهيم عامة توفى متطلبات قواعد الاختيار الفائق. هى فى الواقع أحجار زاوية صورية فى إنشاء لغة الفيزياء.

٢- ومن الواضح أن الوحدة القابلة للتطبيق فى المقاييس لا تتبع من قاعدة بديهية وحيدة؛ إذ إن كل منهج قياس يأتى بأسسه البديهية الخاصة به. ولكن فى كل الأجزاء العملية الممكن الولوج فيها إلى المقاييس، يوجد

(١) انظر الملحقين (أ) و(ب).

(٢) وبالإضافة، يمكن توظيف مبدأ المطابقة السابق مناقشتها فى الفقرة (٥-٤). إنه يجعل التمييز العيارى لتطابق المشاهدات الكلاسيكية والكمية ممكناً طبقاً للمرجع: Scheibe

.1999

(3) Wigner 1939, 1979.

العديد من مناهج القياس المستقلة المتداخلة. وعلى ذلك، فمقياس مقدار يمكن تعريفه بشكل تطبيقي من خلال سلسلة من القياسات. فمثلاً، مقياس الطول قد بنى على سلسلة من القياسات أجريت بأجهزة قياس؛ مثل اختلاف منظر النجم وأجهزة القياس الجيوديسية والمسطرة والميكروميتر والميكروسكوب والميكروسكوب الإلكتروني أو معجلات الجسيمات. وهكذا يكون مقياس كمية ما هو عنقود مفاهيم في عرف نظرية "إليس" للقياس⁽¹⁾. والجزء الممكن الولوج إليه تطبيقياً من مقياس ما هو عنقود من المفاهيم التطبيقية. إنه ينبع من كل التطبيقات التجريبية والعملية التي تؤدي إلى قياسات ذات التمثيل العددي الوحيد والنطاقات العددية المتداخلة. ففي النطاقات المتداخلة يجب أن تعطى اثنتان من القياسات للمشاهدة نفسها النتيجة نفسها على وجه التقريب. وهذا الشرط من الممكن أن نجعله دقيقاً بحيث يصبح ضرورياً وكافياً لتعريف مقياس ما⁽²⁾. إنه قريب الشبه للملامح الغزيرة لنظرية القياس التي سبق مناقشتها في الفقرة (٢-٥). ويعنى التداخل الغزارة.

٣- الفجوات المتبقية في المقاييس مرجعية. وعلى أقصى حد ممكن فهم قريبين بواسطة مبدأ التناظر. ويفترض إصدار "هايزنبرج" المعمم تفسير المفاهيم الكمية بالتناظر مع الجسم التقليدي والصور الموجية. ومن هنا تفرص مبدأ التناظر لأي نوع من الكيانات تسند إليها كتلة أو طول أو زمن مقاس: جسيمية - موجية تقابل ظاهرة كمية وصفاً

(1) Ellis 1968.

(2) Ellis 1968, P. 41-42.

تقليدياً لمسارات جسيم أو مراكز تشتيت أو ظاهرة تداخل... إلخ. ومن هنا يكون السؤال: ماذا عن مفاهيم كمية دون تناظر؟ إن المرجع المتبقى الوحيد لهم هو واقعية الخواص المشار إليها فى الفقرة (٦-١): مفهوم كمى (أو عدد فى المقياس الذى يقابل مشاهدًا كمياً) يرجع إلى الخواص الفيزيائية للظاهرة الكمية التابع لها. وحامل هذه الخواص ليس إلا الظاهرة الكمية ذاتها؛ أى مسار جسيم فى الغرفة الفقاعية أو نموذج تداخل فى تجربة الشق المزدوج. فالأسلوب الذى ترجع إليه مفاهيم كمية من الممكن فهمها فقط فى اصطلاحات سياقية. فالمفاهيم الكمية تعود إلى خواص الظاهرة الكمية التى تحدث بواسطة نظام تجريبى فى سياق فيزيائى معين. ولتحقيق الوحدة المرجعية للطول والزمن والكتلة يكون هذا السياق المبرر؛ للخواص الفيزيائية لموضوعات تقليدية وظواهر كمية، كافياً.

ويصير البناء الغامض لمقاييس الطول والكتلة والزمن أنجح ما يكون تجريبياً؛ حيث تعتمد كثير من التقنيات الحديثة عليها. وعلى وجه الخصوص فهى تؤدى إلى معايرة عالمية لقياسات دقيقة ومحددة للوحدات الذرية. وطبقاً للبحث الشهير لـ "هلبرت" على المنهاج البديهى تدل هذه الحقيقة على صلاحية بديهية "أرشميدس"^(١)؛ ويعنى هذا بقدر كاف أن البناء التعددى للفيزياء الحديثة متعارض مع بديهية نظرية القياس والمعروف قبولها التجريبى حتى الآن. ولنظرية القياس البديهية امتداد أكبر من البنية البديهية غير الملائمة فى الفيزياء الحالية. ومن أجل الحصول على قيود لبناء جاذبية

(١) انظر Hilbert 1918 والملحق (أ).

كمية موحدة، فقد مدّوا مقاييس الطول والكتلة والزمن نزولاً إلى مقياس "بلانك". وقد ينتج عن ذلك إشكالية في النهاية. وعلى أى حال، ففكرة الجاذبية الكمية تتلاءم بصعوبة مع صحة بديهية "أرشميدس" تحت مستوى مقياس "بلانك".

وعلى الرغم من نجاح المقاييس بشكل تجريبي فإنه من الواضح أنها قد قامت على إنشاء، وهذا الإنشاء يوحد مناهج القياس التي تصنع قواعدها القابلة للتطبيق. وقد يجادل الفرد بأن النظرة البنائية للعلم تشرح بقدر كاف النجاح التجريبي لهذا الإنشاء. وعلى أى حال، هناك حقائق بأن الإنشائية لا يمكنها أن تشرح. وقد اتضح أن المقاييس مقبولة تجريبياً عندما تخضع للاختبار بمناهج قياس مستقلة. إن الإنشائية لا يمكن بحال أن تشرح الامتداد الذى يمكن أن تصنع فيه مقاييس الكتلة والطول والزمن دون أن تؤدي إلى تناقضات.

في الحقيقة من الممكن الآن أن نستخدم حجة "بنتام" المعجزة الشهيرة للدفاع عن التفسير التجريبي للمقاييس⁽¹⁾. فإذا لم تمثل المقاييس الخواص الفيزيائية للأنواع الطبيعية، فسيكون عدم الترابط المنطقي لعنقود المفاهيم القابلة للتطبيق التي تقوم عليها مقياس كمية، معجزة. ويصنع هذا الإصدار لهذه الجدلية المعجزة ضمناً ادعائين: أولهما؛ إن إنشاء المقياس يورط الفرد في الاعتقاد في الأنواع الطبيعية التي تقوم عليها الخواص الفيزيائية. وثانيهما؛ إن النجاح التجريبي للإنشاء يدل على أنه ليس اختياريًا ولكنه يتفق مع البناء الحقيقي للظاهرة التجريبية. وعلى مقياس ما دون الذرة، فالأنواع الطبيعية التي تقوم عليها الخواص الفيزيائية هي الظواهر الفيزيائية التي يتم

(1) المرجع Putnam 1975 : "إن الجدل الإيجابي للواقعية هو أنها هو الفلسفة الوحيدة

التي لا تجعل من النجاح العلمى معجزة". انظر أيضاً المرجع Smart 1963.

قياسها. ومن أجل تفادي مشكلات الواقعية التقليدية، بأى حال، فيجب اعتبارهم أشياء كمية فى عرف الكيانات المعزولة. وهكذا، يجب أن نفهم هنا الجدلية المعجزة بدلالة واقعية الخواص الفيزيائية التى تحملها الظواهر الكمية بدلاً من مواد ما دون الذرة من تلقاء نفسها. وتكون الواقعية الناتجة للخواص واقعية تجريبية (أو نقدية) فى مفهوم "كانط" كما تم بيانه بالفعل فى الفقرة (٦-١). أما إلى أى مدى تتوافق واقعية خواص الظواهر الكمية، فى النهاية، مع النظرة التقليدية لأنواع الطبيعية فيبقى هذا السؤال مراوفاً.

إننا إذ نستدعي آراء كانط بشأن هذه النقطة، ننطلق من إطار موقف "باتنام" من الواقعية الداخلية^(١). فمن ناحية، ليست الإلكترونات والفوتونات والكواركات.... إلخ خادعة فى المصطلحات التقليدية (الأرسطية) للمواد المنفردة (أو التفاصيل). ومن وجهة نظر تجريبية، فهم ليسوا إلا تجميعات لكميات محفوظة من الممكن أن تظهر أو تختفى بشكل عرضى. ومن جهة أخرى، من وجهة نظر الفيلسوف "كانط" فهو مفهومنا للمادة التى من الممكن أن نتصوره جميعاً مثل هذا، تماماً كبنائنا للمقاييس كشرط لإمكانية وجود الخبرة فى فيزياء ما دون الذرة. وامتداد مقاييس الكتلة والزمن والطول إلى النطاق الكمي فقط هو الذى يجعل قياسات فيزياء ما دون الذرة ممكنة، ولم يكن هذا الامتداد التجريبي بمفهوم بسيط ولا بسبب الإنشاء فقط. ولكن مدلول المفاهيم الكمية يبقى احتمالياً. ومن هنا، يصعد السؤال الآتى الى خاطر:

إلى أى مدى يتوافق مدلول ألفاظ امتداد الكميات التقليدية إلى النطاق الكمي؟

(١) Putnam 1980, 1990.

٦-٥ تساؤلات مجردة حول اتساق المدلول اللفظي

إن مقاييس الكميات الفيزيائية تخلق وحدة لفظية معينة فى الفيزياء. وإنشاء مثل هذه الوحدة اللفظية يجعل من الممكن أن ننسب أنواع الخواص نفسها للظواهر الفيزيائية على كل المقاييس. ووحدة المدلولات اللفظية هذه قد صيغت بلغة الفيزياء الكلاسيكية، كما أكد "بور". وعلى أي حال، هى أضعف بشكل ملحوظ من الوحدة التى تخلفها كل نظرية بديهية شاملة. إن الجوانب البديهية والقابلة للتطبيق والمرجعية للمفاهيم الكمية المتضمنة فى مقياس ما دون الذرة لا تجتمع معاً. فالمعنى القابل للتطبيق لبديهيات نظرية كمية تعطى بدلالة التفسير الاحتمالى. ومع ذلك، فالوقائع الفردية المكوّنة لتراكب كمى تخضع لقوانين قياس ذات أسس كلاسيكية. وعلى ذلك، فالمعنى البدهي والقابل للتطبيق فى مفاهيم الكم تعد متباعدة بقدر ما تعود هذه المفاهيم إلى الوقائع والنظم الفردية.

ومن وجهة نظر بديهية، فلا بد أن تتفق هذه الجوانب الثلاث اللفظية للمفاهيم الفيزيائية. وإذا حدث ذلك، فسيكون للمفاهيم البديهية والقابلة للتطبيق النماذج التجريبية نفسها. وفى هذه الحالة (وهى التى من الواضح أنها ليست معطاة لمفاهيم كمية)، يسرى رأى "أينشتين" العابر فى أن النظرية تخبرنا ما الذى يمكن قياسه^(١). إن وجهة نظر "أينشتين" العابرة هى سلوك حدسى للتعبير عن أن النظرية متناسقة لفظياً. وهنا نذكر أن التناسق اللفظي لم يكن

(١) انظر ما سبق، ونهاية الفقرة (٥-١)، والخلاف بين "هايزنبرج" و"أينشتين" حول هذا

الموضوع والمذكور فى المرجع Heisenberg 1969، ص ٩١، ٩٢.

معنيًا به في الجانب المنطقي عند تناول نموذج رسمي. إنه يعنى بالأحرى أن مناهج القياس التي تؤدي إلى نماذج تجريبية لنظرية هي في حد ذاتها نموذج لها^(١).

وهذا التبرير الحدسي يتفق مع تناسق المدلول اللفظي الذي أدلى به "قون وسيزاكر" و"ميلشندا". فطبقًا لوجهة "قون وسيزاكر"؛ يعنى التناسق اللفظي أن تتفق نظرية ما مع المفهوم النظري المبدئي للظاهرة التي تطبق عليها^(٢). وهنا يلزم تحديد أكثر دقة للفظ "النظري المبدئي". فبالنسبة إلى توجه "بور"، المفهوم النظري المبدئي لنظرية كمّ ممكن صياغته بلغة بسيطة؛ أي، بدلالة المفاهيم التقليدية المعروفة. وبهذا المفهوم "البوهري" تكون نظرية فيزيائية متسقة في مدلولها فقط إذا كان محتواها البديهي ممكن صياغته بمصطلحات تقليدية. ومن الواضح أن هذا المتطلب بالغ الصرامة. ويكون منطقيًا أكثر أن نستوضح المفهوم النظري المبدئي بالمفاهيم القابلة للتطبيق التي تجعل من الممكن أن نختبر تنبؤات نظرية. وبأخذها على هذا المحمل، يكون المفهوم النظري المبدئي لنظرية ما نابعاً من مناهج قياس مستقلة تمكن من الولوج إلى النطاق التجريبي (أو العملي) للنظرية. وتكون النظرية متسقة في مدلولها فقط إذا كانت متسقة مع نظرية القياس في نطاقها التجريبي. وفي

-
- (١) إن اتساق المدلول اللفظي يعطى انطباعًا بأنه ليس هناك مناهج للقياس. فطالما لا تزال النظرية محل اختبار، فإنه ينتج عنها قياسات رديئة. ولذلك، فالاتساق اللفظي يجب أن يقف فقط عند نهاية تشكيل النظرية. فيجب تجنب ذلك في نظرية لا تزال تحت الاختبار. انظر دراسة الحالة التي نوقشت في الفقرة (٣-٥).
- (٢) انظر المرجع Weizsaker 1985: "إن الاتساق اللفظي لنظرية يعنى الفهم النظري المبدئي الذي به نفسر تركيبه الرياضي ويرضى قوانين النظرية". (من ترجمتي)

هذه الحالة، تنتمي مفاهيمها القابلة للتطبيق إلى نماذجها. وبذلك، يعنى اتساق المدلول أن المفاهيم القابلة للتطبيق لنظرية تستنتج من بديهياتها، كما يتطلب رأى "أينشتين" العابر.

ويعرف "ميتلشتد" التناسق اللفظى بهذا الأسلوب بالضبط. فبالنسبة إليه، تكون لغة نظرية فيزيائية ولغة ما يتبعها من قياسات تربط لغة موضوع وما وراءه من لغة بالعرف بعرف "تارسكى" اللفظى الخاص⁽¹⁾. وطبقاً لوجهة النظر الـ"تارسكية" للغة الفيزياء، فالتناسق اللفظى يعنى أن اللغة الفوقية من الممكن أن تكون جزءاً لا يتجزأ من الموضوع. وبالنسبة إلى لغة الفيزياء، فهذا يعنى بالضبط أن المفاهيم القابلة للتطبيق التى تقوم عليها مناهج القياسات والتى تقوم باختبار نظرية ما، تصبح فى النهاية منبثقة من بديهيات هذه النظرية.

وبالإضافة إلى ذلك، فقد أوضح "ميتلشتد" أن ميكانيكا الكم متسقة لفظياً على المستوى الاحتمالى فى حين أنها غير متسقة لفظياً على مستوى القياسات الفردية والنظم الفيزيائية.

فالمعنى القابل للتطبيق لمفاهيم كمية تقوم على تفسير "بورن - فون نويمان" الاحتمالى لميكانيكا كمية. وينبثق الأخير على أي حال من بديهيات ميكانيكا كمية دون قياس (أى دون مسلمة "فون نويمان")⁽²⁾. فى نموذج من النظم الكمية المتعددة المستقلة الفردية اللانهائية⁽³⁾. وهى متسقة لفظياً إلى

(1) Mittlestaedt 1986; 1995.

(2) Von Neuman 1932.

(3) Mittlestaedt 1999. و Mittlestaedt 1997a&b.

حد ما. ولكن النظريات الرياضية غير المعارضة التي تقدر نتائج قياسات ميكانيكا الكم لا تزال باقية^(١). فهي تبين أن ميكانيكا الكم ليست متسقة لفظياً على المستوى الفردي؛ حيث إن ميكانيكا الكم لقياس ما، قادرة على الإطلاق لتوضيح كيف تحدث نتيجة قياس فردي. وبذلك لا ترجع ميكانيكا الكم في حد ذاتها إلى نظم فردية. وفي الحقيقة، تتفق مفاهيم فيزياء الكم القابلة للتطبيق فقط على المستوى الاحتمالي بمفاهيم بديهية لميكانيكا كمية. وعلى مستوى النظم الفردية لا تكون المفاهيم القابلة للتطبيق مفاهيم كمية؛ حيث لا ترجع إليها المفاهيم الفردية. ومن هنا تم توظيف مسلمة "قون نويمان" الإسقاطية لجذب ميكانيكا الكم البديهية لتهبط إلى أرض الفرديات.

إن مناهج القياسات التي تمت مناقشتها في هذا الباب هي أكثر تعقيداً بكثير. ولكنها تؤكد بدقة على النتائج الرسمية المعروفة جيداً. إن مناهج القياسات لفيزياء الجسيمات قد تم تصميمها للتغلب على عدم قابلية التطبيق للمفاهيم التقليدية والكمية على المستوى التطبيقي. ويعتبر ذلك غير ملائم قليلاً؛ حيث إن المفاهيم القابلة للتطبيق لفيزياء الجسيمات التجريبية تناسب قياسات الموضع الفردية ومسارات الجسيمات وعمليات التشتت بينما لا تشير المفاهيم البديهية لميكانيكا الكم للتشتت إلى أى واقعة أو مسار فردي. وفي الحقيقة تتغلب الممارسة الفيزيائية على هذه الصعوبة بنجاح تجريبى منقطع النظر. إنها تعمل بإنشاء مقاييس موحدة لكميات تطبيقية؛ حيث لا توجد

(١) انظر المراجع:

Mittlestaedt 1997a,b Mittlestaedt 1999.Mittlestaedt 1998a.

وانظر أيضاً نتائج سابقة وخاصة في المرجع .Von Neuman 1932.

نظرية بديهية. وفي فيزياء الجسيمات فالكميات الأساسية التطبيقية هي الطول والزمن والكتلة، ولكن الكميات المشتقة من كمية حركة وطاقة تؤدي إلى مقياس مهم على الرغم من ذلك. إن تحليل البيانات لتجارب تشتت تقوم على إصاق قوانين قياس تقليدية (التي تنطبق على مسارات الجسيمات الفردية) مع تصحيحات كمية (التي تنطبق على المستوى الاحتمالي).

ولتحليل مسارات الجسيمات تعمل هذه المفاهيم كما يلي: إن ميكانيكا الكم للتشتت متسقة لغوياً، على المستوى الاحتمالي، مع حصيلة نتائج القياسات التقليدية، بينما هي ليست كذلك على مستوى نتائج القياس الفردي. وقد كان ذلك المعتقد فاصلاً في حالة دراسة الطاقة المفقودة التي سبقت في الفقرة (٣-٥). ففي الدرجة الأولى لنظرية التشتت، يتم إهمال التشتت المترابط وبالتالي يكون القياس الفردي لنقاط مسار جسيم تعود لمجرد تشتت غير مترابط. وبذلك هي تحدث مستقلة دون أي ميكانيكية عدم ترابط إضافية (والتي تعمل بالعكس على المستوى الاحتمالي). ففي درجة أولى لنظرية التشتت، هناك تناغم سابق التجهيز لميكانيكا الكم لمسار جسيم والصورة الكلاسيكية التي تقر بأن نقاط القياس الفردية تتولد مستقلة عن بعضها البعض. ومع ذلك فتطبيق حسابات "بيت" الاحتمالية للطاقة المفقودة من الجسيمات المشحونة في المادة على مسارات الجسيمات الفردية يصبح قابلاً للتبرير إذا تم تصحيح الأخطاء الناتجة بهذه الطريقة على المستوى الاحتمالي لمسارات الجسيمات المتعددة^(١).

(١) انظر الفقرة (٤-٣-٥).

وهكذا، فالفيزياء الكمية غير متسقة لغويًا على المستوى الفردي للوقائع ولكن من الممكن تناول هذا الأمر على المستوى الاحتمالي. فالنتائج الرسمية تخبرنا أن ميكانيكا الكم لا ترجع إلى نظم فردية ولكن ترجع فقط إلى تجميعات إحصائية. ويتأكد هذا الزعم بنظرية القياس غير المتجانسة لفيزياء الجسيمات. والذي يشير إلى النظم الكمية الفردية هي القوانين الكلاسيكية ونصف الكلاسيكية للقياسات فقط ولا تشير إليها القوانين الكمية الأصلية. وإشارة قوانين الكم الأصلية إلى النظم الكمية الفردية من الممكن أن تقوم بالأسلوب الآتي:

(أ) بواسطة السياق التجريبي؛ أي بالجهاز التجريبي المحدد الذي تحدث فيه الظاهرة الكمية.

(ب) على المستوى الاحتمالي لنتائج قياسات متعددة فردية التي يتم الحصول عليها في السياق العملي نفسه وتنتمي إلى النظام الكمي نفسه.

(ج) بدلالة قواعد الاختيار الفائق للكميات المحفوظة كالكتلة والشحنة والمغزلية وما يقابلها من قوانين الحفظ وفقًا لأي عمليات التشتت يتم تحليلها.

(د) باستخدام مبدأ التناظر لـ"بور" أو النسخة التعميمية له لـ"هايزنبرج".

وهذه الطرق الأربع تساهم في جعل نظرية الكم متسقة لغويًا لكل أغراض الممارسة؛ أي بمغزى ناشط غير صوري. ومن الممكن تطبيق نظرية الكم على النظم الفردية إذا أخذنا في اعتبارنا:

(أ) السياق العملى (التجريبى). (ب) قياس متكرر للنظام نفسه. (ج) قواعد الاختيار الفائق، أو (د) بتوظيف مبدأ التناظر العمومية من أجل استنتاج نماذج كمية لعواقب وقائع ما دون الذرة والتوزيع الشحنى وغيره. وبصفة عامة، طريقتان أو أكثر من هذه الطرق تكفى للحصول على ظواهر كمية محددة وبالتالي تجتمع النظم الفردية معها.

وعلى وجه التحديد، فالسياق التجريبى وحده (وطريقتنا فى تصويرها فى مصطلحات تقليدية) تجعل من الممكن التحدث بطريقة غير واضحة عن الموضوعات الكمية. إن نظرية الكم وحدها لا تسمح بإنشاء موضوعات فى وجهة النظم الزمانية المكانية بموضع ومدة زمنية. وتلخيص خواص الجسم من كتلة وشحنة أو مغزلية من سياقه العملى أو البيئى يعنى تركيب الموضوعات الزمانية المكانية وعدم الاحتفاظ إلا بحزمة من الخواص الديناميكية لأنواع الخاصة بها. تلك الحزمة مكونة من تلك المقادير التى يمكن قياسها بطرق حرة فى الوقت نفسه فى أى تجربة. والموضوعات الكمية المجردة ما هى إلا حزمة من الخواص التى تقوم عليها قواعد الاختيار الفائق والتى تبدى ارتباطات غير متموضعة وغير صورية. وتمضى، بشكل ما، هذه الحزمة من الخواص الديناميكية خلال سياق تجريبى أخذاً فى الاعتبار قوانين حفظ الكتلة والشحنة والمغزلية (وكذلك الشرط السببى "لأينشتين" أن انتقال الإشارة الضوئية ممكن فقط فى إطار المخروط الضوئى). إنها تبدو كما لو كانت جواهر تجريبية بمعناها لدى "لوك"؛ بمعنى

أنها تراكم لخواص تجريبية تسير بالتساوى مع بعضها البعض^(١). وعلى أي حال، هي تفرّد فقط بالجهاز العملي الذي تقاس به أو بالظاهرة الكمية التي تنتمي لها. وفيما يتعلّق بمرجع ما، فكثرتها خلال الظواهر وكذلك ملاحظتها غير الموضوعية لا تزال غامضة. وهي من الممكن تفريدها فقط كظاهرة كمية تابعة للسياق. ودون سياق تجريبي معين، فمرجع أي مفاهيم كمية تغدو ضالة. وفي هذه النقطة فقد أصاب "بور" تمامًا حتى يومنا هذا.

في قياس ظاهرة كمية، يتم توظيف المفاهيم التقليدية والكمية. وحتى القيم المتوقعة الاحتمالية للملاحظات الكمية تصاغ بدلالة المقادير الكلاسيكية: الكتلة والزمن والطول. وطبقاً لنص "بور" الموثوق به من تفسير "كوبنهاجن"؛ أي النظرة المكتملة لميكانيكا الكم، فالأخيرة تخدم بإعطاء المعنى الفيزيائي لمفاهيم نظرية كم^(٢). ويؤكد ذلك وجهة "بور" في ميكانيكا الكم التي طبقاً لها تجعل مبدأ التناظر إمكانية صياغة ظاهرة كمية بلغة الفيزياء الكلاسيكية. وهذا المعنى الفيزيائي، بأي حال، لا يصاغ بدلالة المشاهدات التجريبية؛ بمعنى، مفردات مشاهدات معتق المذهب التجريبي. وبالأحرى، تصاغ بدلالة خواص، وهي المسماة الكميات الفيزيائية التقليدية. وقد كان "بور" هو من أكد أنه ليس من الممكن بناء موضوعات كمية خارج هذه الخواص^(٣).

(١) انظر المرجع Lock 1689, book II, chap 23 والفقرتان (١-٦) و(٦-٣). وحول السؤال عن حاملات هذه الصفات، تبقى مفاهيم ميتافيزيقية تخالف فكرة اللا تغير لـ"لورنز" طالما لم يتم تبني وجهة نظر "كانط"، والتي طبقاً لها يجعل الخداع في مفهومنا للمادة في النهاية ممكناً عن كونها تجميعاً للصفات.

(٢) انظر الفقرة (٧-٢) والمرجع Howard 2002.

(3) Bohr 1948

وهكذا لا يكون هناك غنى عن مبدأ التناظر التعميمي لتمديد مقاييس الكميات الفيزيائية إلى النطاق الكمي. إنه مبدأ ما وراء النظرية حول العلائق الداخلية بين النظريات. على أي حال، إنها تبنى علاقات داخلية متميزة بين النظريات. إنها تعطى ميكانيكا الكم نماذج راسخة هي نظم فردية شبه كلاسيكية. ولصياغة ذلك في مصطلحات أخرى، نقول: إنه مبدأ جسري يجعل من الممكن لميكانيكا الكم أن تسيطر على تطبيقاتها التجريبية. ولكن هناك نماذج لنظريات الفيزياء الكلاسيكية بدلاً من مشاهدات من وجهة نظر تجريبي. وهذا المبدأ الجسري يؤدي إلى قياس عام لمفاهيم غير قابلة للقياس بالمعنى الذي قدمه كون في أطروحته للامقياسية.

وبدلالة نظرية القياس المجرد، فإنها تسد الفجوة البديهية والمرجعية بين المفاهيم المتباينة القابلة للتطبيق. ومن جانب معين، فالتناظر العمومي يكون، على الفور، أكثر وأقل قوة من القواعد الموحدة الأخرى. فهو يعطى وحدة جزئية للمدلولات اللغوية الفيزيائية؛ حيث لا توجد وحدة بديهية. ومع النظريات البديهية تصنع العمود الفقري للبناء المعماري للفيزياء الحالية⁽¹⁾.

وعند هذه النقطة، ممكن أن تصاغ الخلاصة العامة حول تفسير نظرية الكم. إن نظرية الكم بشكل عام (شاملة نظريات المجال الكمي النسبي الحالية لفيزياء الطاقة العالية) ليس لها تفسير واقعي يقوم عليها مرجع لنظم فردية.

(1) بقدر ما أرى، فوجهة نظر غير معتق منهج التجريب عن التناظر كمبدأ انتقالي هو منسجم مع طريقة "نانسي كارترايت" في نقد مبادئ معتق تجريب الانتقالي (المرجع Cartwright 1983). وعلى أي الأحوال، فهذا يتعارض مع نظرتها فيما بعد حول

الفيزياء غير الموحدة تماماً كما اقترح في المرجع Cartwright 1999.

وبواسطة مبدأ الاختيارات الفائقة فقط، تطبق الفيزياء الكمية مبدأ التناظر وخلافها على النظم الفردية. ونظرية الكم في حد ذاتها تسوق الفرد إلى تفسير تراكم ما^(١). وفي الحقيقة، تلك هي بالضبط طريقة أخرى للقول بوجهة حاسمة: إن ميكانيكا الكم متسقة لغويًا فقط على المستوى الاحتمالي. إن التفسيرات الميتافيزيقية الحالية لميكانيكا الكم في حالة تعارض مع المبادئ النسبوية ولا تُتيح مخرجًا من هذا المأزق.

(١) إنني مدين لـ"ف. راينهارد ورنر" في لفت نظري إلى هذه النقطة، ففي تباين واضح مع وجهات نظري السابقة التي تم التعبير عنها في المرجع. Falkenburg 1995، طبقاً لفهمي الحالي للفيزياء الكمية، يغدو تطبيق نظرية الكم على نظام فردي محدثاً استخدامًا ضمنياً لمبدأ التناظر التعميمية.

تحول جوهري في المفهوم الجسيمي

يُمثل تاريخ القرن العشرين في معرفة المفهوم الجسيمي رواية عن التخلص من الأوهام. فقد اتضح أنه ليس ثمة جسيمات بالمعنى الكلاسيكي في مجال ما دون الذرة. فلا الذرات ولا أجزاء مكوناتها ولا أسباب مشاهدة مسارات الجسيمات في الغرفة الفقاعية ولا مراكز التثتت شبه النقطة أو الممتدة لمادة قيد البحث تُمثل جسيمات كلاسيكية. وسيُتضح عبر مسار هذا الفصل أن المفهوم التعميمي لجسيمات الكم ليس متاحاً أيضاً. فالجسيمات هي بالأحرى ظواهر تجريبية وليست كيانات أساسية.

ومع ذلك فإن مفهوم الجسيم لم يتم هجرانه. فلم يزل الفيزيائيون يتحدثون بعد ثورة الكم عن الجسيمات. إلا أنهم يقومون بذلك مع اختلاف في المعنى. فمن ناحية ما زال النموذج الكلاسيكي للجسيم مُستخدماً؛ إذ لا غنى عنه في قياس الأحداث وتسجيل مسارات الجسيمات عن طريق عدادات جيجر والمستحلبات النووية والغرف الفقاعية ومزيد من العدادات الجسيمية الحديثة. لقد تم التوسع في نظرية القياس الكلاسيكية للجسيمات دون الذرية وتصحيحها عبر مسار ثورة الكم، إلا أن مضمونها الكلاسيكي ظل كما هو. وعلى الجانب الآخر فقد ظهر العديد من المفاهيم الكمية لتخالف المفهوم الكلاسيكي للجسيم. وقد كان يتعين ألا تختلط هذه المفاهيم بالمفهوم الكلاسيكي للجسيم. فقد نتجت عن العديد من التحولات في المعنى بشأن الجسيمات الكمية.

إلا أن هذه التحولات في معنى المفهوم الجسيمي لم تؤخذ في حسابان فلسفة الفيزياء. ونتج عن ذلك العديد من مظاهر الغموض في المفاهيم. فلم يعد اليوم مفهوم الجسيم مفهوماً فريداً. فبالإضافة إلى المفهوم الكلاسيكي للجسيم، ثمة عائلة من المفاهيم الكمية للجسيم. ويُمثل تحليل هذه العائلة من المفاهيم والعلاقات بين أعضائها مهمة هذا الفصل. وعلى الفلاسفة الحذر إزاء هذه النقطة؛ إذ تعتمد جسيمات الفيزياء الحالية على التفسير الاحتمالي المُعتاد لنظرية الكم. ويتعين على المرء أن يقوم بالأمر نفسه إذا ما أراد فهم الأوجه العديدة لما يُدعى اليوم "جسيم". ومن ثم فإنني لن أتناول فيما سيلي النقاش الفلسفي بشأن أسس ميكانيكا الكم أو السجال الحديث بخصوص الجوانب الأنطولوجية لنظرية مجال الكم⁽¹⁾. إنني أتشد فحسب توضيح ما يقصده الفيزيائيون حين يتحدثون عن الجسيمات فيما بعد ثورة الكم.

بالمقارنة بالمفهوم الكلاسيكي للجسيم (CP) فقرة (٦-١) أدى ظهور فروض ميكانيكا الكم والكم الضوئي إلى حدوث تحولين سيمانطيين. وهو ما أدى إلى ظهور المفاهيم الجسيمية (QM)، (LQ) فقرة (٦-٢). إن أساسها التجريبي هو المفهوم الإجرائي للجسيم (OP) وهو مُعتدل من الناحية الميتافيزيقية وإن كان غير متحفظ الفقرة (٦-٣). تذهب فلسفة اللغة حالياً إلى أن المعنى هو الاستخدام. وعلى المستوى البديهي، يستعمل الفيزيائيون المفهوم الكلاسيكي للجسيم بالإضافة إلى عدة مفاهيم جسيمية مثل الموجودة في نظريات الكم، وحتى إنهم استخدموا أكثر من هذا وخصوصاً مفاهيم المجال الكمي (FQ) ونظرية المجموعات (GT) والجسيمات الافتراضية

(1) Brown and Harre 1988 , Auyang 1995, Teller1995, Cao1999, Kuhlmann et al 2002.

(VP) والجسيمات الشبيهة (QP) التي نوقشت. وتشارك هذه المفاهيم الكمية جيمعها في أنها تعزو للجسيمات خصائص غير موضعية أو شبه موجية فقرة (٤-٦). وقد أحدثت أيضاً رؤى جديدة حول الأجزاء المكونة للمادة (MC)، وهنا نجد أن النموذج الكواركي على وجه الخصوص بحاجة إلى إمعان النظر فقرة (٥-٦). ما الشيء المشترك بين هذه المعاني كلها؟

وبغض الطرف عن الجسيمات الافتراضية؛ تبقى الاستقلالية أو عدم الاعتماد وعدم الاتصال وقابلية تجميع الكميات المحافظة المعالم العامة للجسيمات (GP). لكن بالمعنى الدقيق فإن هذا يسري على المجال غير النسبوي فحسب. إن الكيان الداعم يتمتع بمعالم المجال، إذا ما كان من المفيد التساؤل عن هذا الكيان من الأساس فقرة (٦-٦).

ومن ثم لم يتبق بعد ثورة الكم سوى مفهوم غير صوري للجسيم. هذا المفهوم أكثر من مجرد حديث عابر. إنه أكثر اعتدالاً من الناحية الميتافيزيقية من المفاهيم الميرولوجية والعلية للجسيم المرتبطة بالفيزياء الكلاسيكية. إن لها أساساً إجرائياً ذا علاقات محددة بنظريات الكم السائدة، كما أن له بعض السمات النمطية، من بينها الاستقلال الإحصائي.

٦-١ الجسيمات الكلاسيكية

إن "الجسيم" يعني ببساطة "جزءاً بسيطاً من الكل"، والمعنى الأصلي للمفهوم الجسيمي هو معنى ميرولوجي وليس علياً. وهو ينبني على علاقة الجزء بالكل بين الجواهر المادية وأجزاء مكوناتها الميكروسكوبية^(١). لقد

(١) انظر الملحق (هـ).

افتترضت الذرية القديمة أن المادة تتكون في إطلاقها من أجزاء متحركة لا يمكن اختراقها نهائياً وبنشأ عنها جميع الأشياء المادية. وبالرجوع بالزمن إلى ديكارت ونيوتن معتبرين هذه الجسيمات المكونة للمادة كأجسام ميكانيكية صغيرة جداً محمولة (كريات)، وظل حتى نهاية القرن التاسع عشر افتراض تبعيتها لقوانين الديناميكا الكلاسيكية، وهي توصف بأنها نقاط كتلية مثالية، وقد جاء المفهوم الكلاسيكي للجسيم بالأفكار الذرية القديمة وبرياضيات الوجهة الميكانيكية وكلاهما معاً، ففي الوجهة الكلاسيكية تتصرف أجزاء المادة بأشبه الأجسام السماوية الدقيقة التي تتحرك خلال مسارات محددة، وطبقاً لهذا فإن كل جسيم يكون له مسار موحد والذي يحدد كاملاً عن طريق قوى خارجية.

ومن ثم يكون للجسيمات الكلاسيكية خصائص فيزيائية كالتي للأجسام الميكانيكية، تكون خصائصها المكانية - الزمانية هي الموضع والسرعة (غير نسبوية) والعجلة أو التسارع وجميع الكميات متغيرات. القيمة (بارامترات) بواسطة الزمن، وتكون خصائصها الديناميكية هي كتلة القصور الذاتي m_i ، والشحنة الكهربائية q_e ، وكتلة الجاذبية m_g (الكتلة الجاذبية التي تتفق عددياً مع كتلة القصور الذاتي) والكميات المستنتجة مثل كمية الحركة p والطاقة E ، واستمر النسق البسيط للميكانيكا الكلاسيكية عن طريق الثلاث مسلّمات لنيوتن، وقد انبنى سرد أكثر تفصيلاً على معادلات لاجرانج وهاميلتون، وأحدثت هذه النظم لهذه المسلّمات خصائص مطابقة للجسيمات الكلاسيكية والتي قد ينص عليها بواسطة القائمة المتوقعة التالية:

(CP) الجسيمات الكلاسيكية تكون:

(MQ) حاملات الكتلة m والشحنة q .

(INDEP) مستقلة عن بعضها بعضاً.

(POINT) أشباه النقط في التفاعلات.

(CONS) موضوع خاص بقوانين الحفظ.

(LOCAL) موضعية.

(DET) يتم تعيينها كاملاً عن طريق قوانين الميكانيكا.

(TRAJ) تتحرك في مسارات أو مدارات في طور فضائي.

(IDIV) مفردة زمانية مكانية (أو وجود مستقل).

(BOUND) قابلة لتكوين نظم مقيدة.

إن خصائص (MQ) و (POINT) و (LOCAL) تعبر مجتمعة عن حقيقة أن الجسيم هو "نقطة كتلية"، وهي مطابقة لأنطولوجيا الجسيم. وعلى ضد الجسيمات الكلاسيكية تكون المجالات والموجات غير موضعية. وتكون خصائص الـ (LOCAL) و (TRAJ) و (INDIV) مطابقة لمفهوم الجسيم الكلاسيكي، وأنها تحل محل أو تتخطى ما في الكمية بطريقة ضعيفة، كما أن الـ (DET) تكون متوافقة مع الميكانيكا الكلاسيكية ونظريات المجال الكلاسيكي، وفي جميع النظريات الكمية فإنه يحل محلها التحديد الاحتمالي.

إن خاصية (INDEP) تكون حاسمة لمفهوم الجسيم الكلاسيكي وتعميماتها، كما سوف نرى فيما يلي، إنها تعني أن الجسيمات تتفاعل حرة بصفة مبدئية أو باعتبارها غير مقرونة ومن ثم تعتبر مستقلة (غير معتمدة)

إحصائياً، وبأكثر دقة، فإن الجسيمات غير المعتمدة هي في حالة غير مقيدة وتعتبر (على وجه التقريب) غير متفاعلة ما عدا التفاعل عن طريق التصادمات ومن ثم فإن لها حركة داخلية فقط وأن حزمة الشروط الابتدائية لحركتها تكون غير مرتبطة إحصائياً، وهذا يعني في الميكانيكا الكلاسيكية أن مواضع وكميات حركة الجسيمات تكون غير مقرونة ببعضها، وهذا النموذج أوجد نظرية الحركة للغاز المثالي ومعادلات بولتزمان، وبصفة عامة ونتيجة القوى فإن الجسيمات لا تكون مستقلة (أو غير معتمدة)، ومع هذا فالمفهوم تماماً قبل افتراض القوة أن حالة التفاعل الحر تكون كلاحتمالية النوعية، وفي الحقيقة فإن ما قبل افتراضات أي ديناميكا فيزيائية خطية قد تكون الأشياء المتواجدة غير المتفاعلة لها شروط خاصة غير مقرونة خاصة بحركتها، وفي معظم المعنى العام، فإن:-

(INDEP) عدم الاعتمادية تعني أن الجسيمات:

(UNCOUP) قد تكون في حالة غير تفاعلية أو حالات غير مقرونة، و

(UNCORR) شروطها الابتدائية تكون غير مرتبطة إحصائياً.

تشارك خصائص (INDEP) و (POINT) و (CONS) عن طريق وجهة النظر الكلاسيكية للميكانيكا وميكانيكا الكم ولجميع نظريات المجالات الكلاسيكية والكمية وهي تعتبر امتداداً معيناً لما وراء النظرية والشئ نفسه حقيقي بالنسبة إلى الخصائص الديناميكية لـ (MQ)، وقد تتغير الخصائص الديناميكية لما هو موجود بالقائمة، ولكنها دائماً تقتصر على ما يتعلق بالتمائليات والكميات المحافضة في الفيزياء. وتعني (POINT) أن الجسيمات

تتفاعل موضعياً وأن (CONS) مصحوبة بتماثلاتها، ولكي نتجنب التشوش يكون عن طريق عدة خصائص للكثير من الجسيمات، وإني لأحتفظ بالبيانات أو الرموز الموجودة خلال هذا الفصل لـ (INDEP) و (POINT) و (CONS) حتى لو أن معنى هذه الخصائص الجسيمية سوف يتغير في الانتقالات إلى ميكانيكا الكم ونظرية المجال الكمي.

ومع هذا فيجب أن نتذكر المعنى الدقيق لهذه التنبؤات أو التوقعات النظرية المعتمدة على السياق النظري، يتأثر المعنى لـ (INDEP) عن طريق الانتقال إلى نظرية الكم بطرق متنوعة كما سنتناوله بالمناقشة في جانب من هذا الفصل ويجمعه في فقرة (٦-٦). في الميكانيكا الكلاسيكية، تجد أن (POINT) تنص على أن الجسم يمكن إحلاله بمركز جاذبيته، ولكن في نظرية المجال الكلاسيكي فإن (POINT) تعني أنه لا يوجد فعل -عند- مسافة، فقط تكون تفاعلات النقاط الشبيهة متوافقة مع السببية الخاصة بأينشتاين؛ أي متوافقة مع متطلبات إمكانية وجودها على وجه بارز داخل مخروط الضوء فقط وعلى سطحه ولكنها ليست على المسافات شبه فضائية، تحتوى (CONS) على حفظ كمية الحركة والطاقة وكمية الحركة الزاوية، وقوانين الحفظ تقترب بعلاقة المجموعة التماثلية للديناميكا الأساسية وهي هنا مجموعة جاليليو، وفي النظرية النسبوية تصحب بمجموعة بوانكاريه محدثة بقاء أو حفظ كمية الحركة - الطاقة أي ثبات كمية الحركة المربعة - والطاقة ذات المتجة الرباعي. إضافة إلي إحداث مجموعة القواعد التي تبرز نماذج الأنظمة المقيدة والنماذج المصاحبة المكونة للمادة، إن التحويلات النظرية للخاصة الجسيمية (BOUND) قد فحصت بمزيد من التفصيل في فقرة (٦-٥).

وجد بالمجال دون الذري أن المسارات الكلاسيكية (TRAJ) تكون غير معينة تجريبياً في ظواهر فيزياء دون الذرية، وكلما كان العداد الجسيمي في ثبات مكاني أفضل كان أفضل في مشاهدة المسارات الجسيمية بقدرة تحليلية في القياسات النقطية المنفردة، وفي رؤية أنه لا يوجد قياس لمسار متصل ولكن فقط مواضع منقطعة. إن عدم التحديد التجريبي هذا للمسار الجسيمي لا يكون عن طريق الوسائل العرضية وأنه لا يعتمد على اختيار نوع العداد الجسيمي، ولكن تعتمد تماماً على احتماليات القياس الموضعي بالجهاز الماكروسكوبي، وكما استنبط بورن في مهد ورقته البحثية للتحليل الاحتمالي لميكانيكا الكم؛ حيث وجد أنه يستحيل مبدئياً أن يتتبع كل مسار جسيمي في عملية التشتت دون الذري، لقد أحدثت الفيزياء الكلاسيكية تأكيداً غير مستقر حول الأحداث دون الذرية بينما أحدثت ميكانيكا الكم هذا الاستقرار دونهم.

هنا تظهر مشكلة الحتمية بأسرها. فمن وجهة نظر ميكانيكا الكم، لا يوجد أي مقدار في حالة منفردة مسبباً تثبيت نتيجة التصادم ولكن أيضاً لا نجد سبباً عملياً الآن نعتقد أنه يوجد بعض الخصائص الداخلية للذرات والتي تشترط نتيجة محددة للتصادم. هل نتوقع أن نأمل في المستقبل اكتشاف مثل هذه الخصائص (مثل الأطوار الحركية للذرية الداخلية) وأن نحدد في حالات منفردة؟ أو هل نتوقع الاعتقاد بأن تتوافق النظرية مع التجربة - كما هل يستحيل سقوط الشروط مع مرور الزمن للتحوّل السببي - أو هل يوجد انسجام قبل الاستقرار من عدم وجود مثل هذه الشروط؟⁽¹⁾.

(1) Born 1926a, 51; translation from Wheeler and Zurek 1983, 54.

ومن ثم فإن المسار الذي يصل النقاط المقاسة لمسار الجسم يخص الملامح غير التجريبية للمفهوم الكلاسيكي للجسيم، وأنها مفهوم كلاسيكي أساسي أو بديهي دون نظير تأثيري، ومن وجهة النظر التجريبية فإن ذلك يختص بالميتافيزيقا حتى لو أن نموذج النتائج للمسار الجسيمي في صور الغرفة الفعالية ناتج من تركيز الزمانى - المكانية للقياسات الموجية المتتالية. وفي المعنى المتعلق بالجهود الملكية لعلم الوجود^(١). فقد عهدت لنا بالجسيم الكلاسيكي.

هذا النموذج النتائجي لا يتوافق حقيقة مع ميكانيكا الكم حتى ولو بالأخطاء القياسية في الموضع وفي كمية الحركة على طول المسار الذي في العادة يكون أكبر من عدم التحديد المتوقعة بواسطة علاقة عدم التحديد لهايزنبرج بمقدار الأس العاشر. وإنه معلوم جيداً هذه الأيام أن نموذج النتائج الكلاسيكي هذا يكون ملائماً تجريبياً فقط عند القياس الماكروسكوبي وعند الطاقة المنخفضة للجسيمات دون الذرية. وكلما زادت الطاقة للجسيم أخطأ نموذج النتائج الكلاسيكي^(٢)، فمسار الجسم لا يكون سببه الجسم الكلاسيكي وإنما يكون نتيجة التفاعلات دون الذرية التي هي موضوع ميكانيكا كم التثنت.

= وهنا عرف بورن العلية والحمية. وقد هوجم هذا التعريف عن طريق كاسيرر في عام ١٩٣٧، ومع هذا أصبحت تلك التعريفات مؤثرة في مناقشة ميكانيكا الكم.

(1) Quine, On What There Is.

(٢) انظر (الفقرة ٥-٣).

٦-٢ انتقال إلى الجسيمات الكمية

مع تقدم نظرية الكم ظهر مفهوم الجسيم الكلاسيكي، ولكن بقيت عدة طرق غير صورية للحديث حول الجسيمات، حتى يومنا هذا يسمى الفيزيائيون الموجودات الدقيقة الذرية والنوية والفيزياء الجسيمية "جسيمات"، ولإعطاء مثال واحد فقط في متن الكتاب: فقد عرفنا في أيامنا الحالية سلسلة كاملة من الجسيمات الأولية، أمثلة الإلكترون (e) والفوتون (γ) والبروتون (p) والنيوترون (n) والميزون باي أو البيون (π) والميزونات (K) والهيبرونات (Σ, Λ وهكذا) ومن هؤلاء ما هو معروف من زمن طويل كالإلكترون في ذلك الوقت (طومسون ١٨٩٧) ظل الاعتقاد سائدًا في صلاحية الفيزياء الكلاسيكية والتي فيها تنتقص مفاهيم كل من الموجات والجسيمات تمامًا، وذلك حقيقة لم تزد عن كونها حدثًا تاريخيًا بأن الإلكترونات أول المشاهدات في تجربة والتي تتصرف شبيهة بالجسيمات الكلاسيكية [...] وفي حالة الكمات الضوئية فالوضع معاكس تمامًا [...] وكانت الفكرة الثورية لأينشتين - في فرض الكم الضوئي والذي يتصرف فيه الضوء بافتراض أن له طبيعة جسيمية (أينشتين ١٩٠٥). عند أول تقابل مع الشك الكبير، الذي أخذ حوالي عشرين عامًا قبل الموافقة على أن تقبل الكمه γ "كجسيم" [...] وبمرور الوقت، ومع ظهور ميكانيكا الكم تحقق أن الجسيمات والموجات لا يمكن النظر إليهما كظواهر منفصلة تمامًا ولكن يجب استبدالهما باعتبارهما سمتين للظاهرة نفسها^(١).

(1) Nachtmann 1990,3.

هنا يستعمل المقطع "جسيم" في عدة معانٍ مختلفة، نسمي أربعة منهم:

• الجسيمات الأولية (الإلكترونات وفوتونات وبروتونات وهلم جرا)

• الجسيم الكلاسيكي.

• كمة ضوئية.

• السمة الجسيمية للظاهرة والتي لها أيضا سمت موجي.

على ما يبدو أن المفهوم الجسيمي في أصله يكون مصحوبًا بوجهة النظر الكلاسيكية الميكانيكية ولم يكتمل ظهورها مع الثورة الكمية، وأعطى معنى جديدًا فقط، ولكي نكون أكثر دقة فإنه يعطي عدة معانٍ جديدة أحدثت معنى مشوشًا في الحوار بين الفيزياء والفلسفة، مع هذا ففي مجتمع الفيزياء لم يشك أحد من هذا التشويش، وبالطبع كان بجانب هذا القليل من تضيق المعنى وقفت في شراكة حقيقية في إثبات وجود الجسيمات دون الذرية مهما كان الاعتقاد، وهذا الاعتقاد يكون مصحوبًا باتهام قوى أن المرجعية لهذا المقطع المسمى "جسيم" يبقى ممتدًا على الأقل ببعض الاستقرار عندما يطبق على الظواهر الكمية. ماذا يجب أن نفكر في هذا الاعتقاد الحقيقي بوجود الجسيمات دون الذرية؟ يمكن الإجابة عن هذا السؤال فقط عن طريق تحليل التفكير في معنى المفهوم الجسيمي بالتفصيل.

لقد حدث التغيير في المفهوم الجسيمي للجسيم في جبهتين أحدثتا انتقالًا مختلف المعنى في المفهوم الجسيمي: ١- في الفيزياء الذرية تتطلب نتائج تجارب رذرفورد للنشئت نموذجًا ذريًا والذي لم يمكن التعبير عنه في الفيزياء الكلاسيكية. وهذا حدث بمجرد أن سببت أول مسارات جسيمية وقت

أن شوهدت أشعة ألفا (α) في الغرفة السحابية. قدم النموذج الذري الظاهراتي لبور القواعد الكمية للنموذج الكلاسيكي لنظام ربط الجسيمات المشحونة، وهذه القواعد تتضاد مع الديناميكا الكهربائية الكلاسيكية، لقد أعادت ميكانيكا الكم لذرة الهيدروجين ترسيخ الاتساق. ٢- امتدت فروض الكم الضوئي لأينشتين في مجال المفهوم الجسيمي إلى الإشعاع أي إلى مجال الديناميكا الكهربائية وأمدت الحركة النسبوية هذا التطبيق بنظرية القياس، واصفة مسار الجسيم عديم الكتلة في المخروط الضوئي وطاقته انمفقودة نتيجة التصادم بالجسيم الكتلتي، ولقد أثبت تأثير كومبتون أن هذا التطبيق كاف تجريبياً.

٦-٢-١ الموجات المادية

في النموذج الذري لبور^(١) كما في ميكانيكا الكم غير النسبوية ذهب المفهوم المنطقي المجرد للجسيم إلى التطبيق في مكونات المادة، وما زال نموذج بور الذري ينبنى على المفهوم الكلاسيكي للجسيم، وأضيفت الشروط الكمية إليها بطريقة عشوائية ad hoc اعتباطية لكي توقف استنباط مدارات الإلكترون غير المستقرة عن طريق ميكانيكا الكم بدلاً من وجهة نظر الميكانيكا الكلاسيكية، وقد حلت ميكانيكية كم ذرة الهيدروجين مدارات الجسيم الكلاسيكية بحلول معادلة شرودينجر المقيدة، ويوصف الآن الإلكترون المقيد بجهد كولوم بدلالة الموجة الموقوفة، وبهذا السبيل تم إحلال المسار

(1) Bohr 1913b

الكلاسيكي بدالة شرودنجر الموجية، وأصبحت الآن الخاصية الكلاسيكية الموضوعية مضبوطة بمستويات موضوعية للدالة الموجية أي بحزمة موجية.

لم ينجح شرودنجر في التفسير الواقعي المقابل للدالة الموجية وتطورت سريعاً الحزمة الموجية للجسيم الحر تجاه الموجه المستوية ومن ثم تحولت المستويات الموضوعية لأن تكون غير مستقرة، وحتى تستنتج التفسيرات الخاصة بميكانيكا الكم للتشتت والتفسيرات الاحتمالية للدالة الموجية قام بورن بتطبيق الميكانيكا الموجية لشرودنجر على الموجات الموقوفة الحرة على أطرافها⁽¹⁾، وطبقاً للتغير الاحتمالي للميكانيكا الموجية لشرودنجر فقد بدت جسيمات ميكانيكا الكم أشبه بالجسيمات المذكورة بالمعنى السابق (أي الكلاسيكية)، ما عدا المتصلة بالموضوعية والتفريدية:

(QM) جسيمات ميكانيكا الكم؛ هي:

(MQS) تحمل الكتلة m ، والشحنة الكهربائية q ، واللف s (مغزلية).

(INDEP) لا يعتمد على بعضهم البعض.

(POINT) شبه النقطية في التفاعلات.

(CONS) موضوع قوانين الحفظ.

(LOCPD) محصورة عن طريق عداد الجسيمات.

(PROB) تحديد احتمالي عن طريق معادلة شرودنجر.

(WAVE) في مستويات متراكبة ومتداخلة.

(1) Born 1926a,b.

(UNPQ) غير محدد بدقة في كمية الحركة والموضع طبقاً لمبدأ عدم التحديد $\Delta p \Delta q \leq h/2$.

(PAULI) ليس منفصلاً زمانياً ومكانياً ولكن يميز عن طريق مستوياتها الكمية طبقاً لمبدأ باولي للاستبعاد.
(BOUND) قابل لتكوين نظم مقيدة.

هذا التغير في المعنى يكون شديداً^(١)، وإنه جاد: حيث إن الجسيمات لا تطول في محلها، وضعفت الموضعية الكلاسيكية (LOCAL) لمجرد احتمالية (LOCPD) أن أصبحت محصورة فقط خلال العداد الجسيمي لقياس الموضع، وهذا يرتبط بعلاقة عدم التحديد لهايزنبرج (UNPQ) والتي تحدث خصائص غير محددة بدقة أي خصائص تعرف بالمستوى الاحتمالي بالمعنى المتسع للتوزيع الإحصائي للقياسات الخاصة بنتائج متكررة للموضع وكمية الحركة^(٢) وقد صنعت هذه العملية للموضعية كلاسيكية المفهوم الجسيمي مستقلاً في السياق، وتعتمد خاصية أن تكون موضعية الآن على السياق التجريبي^(٣)، لقد حلت الدالة الموجية لشرودينجر محل المسار الكلاسيكي

(١) طبقاً للمعاني الحديثة يكون مقصد المفهوم في المحتوى المفهومي (بمعناه لدى فريجه)، بينما يكون الامتداد هو مجاله؛ أي فئة الأشياء التي يُشير إليها (الإشارة لدى فريجه).

(٢) انظر Busch et al.1995,3,59-60.

(٣) لقد تجنبت الحديث عن التنسيق أو الاستعدادات حيث إنهم كانوا في العادة يلزمون أنفسهم بتجاهل تفسير نظرية الكم التي لم أستطع تعريفها. حاولت ميكانيكا الكم لدى بوهيم الاحتفاظ بالموضعية، ولكن كان الثمن إدخال مفهوم "الفعل عن بُعد" إلى =

موزعة مع الفردية الزمانية المكانية الكلاسيكية (INDIV) والمذهب التحديدي (DET) أي التعيين الكامل عن طريق قوانين الميكانيكا، وطبقاً لنظرية الكم فإن الجسيمات دون الذرية لا تأخذ المسار الذي يفردهم، ونتيجة علاقة عدم التحديد لهايزنبرج فإنه لا يستطيع وصفها بدلالة المحاور الزمانية المكانية وكمية الحركة - الطاقة في الوقت نفسه. (تم تأكيد هذه النقطة بواسطة بور التي أحدثت استكمالاً لرؤيته لفيزياء الكم)^(١). هذه أيضاً خاصية مؤثرة (INDEP) وهي الطريق التي بها قد تعتبر الجسيمات كمية غير معتمدة بعضها على البعض الآخر، ومن أحد الجوانب وبسبب علاقة عدم التحديد لهايزنبرج فإن نتائج القياسات غير المترابطة إحصائياً ظهرت لتلعب دوراً، وعلى الجانب الآخر فقد أثرت ميكانيكا الكم على السلوك الإحصائي للجسيمات، فالإلكترونات هي فيروميونات وتخضع لمبدأ الاستبعاد لباولي (PAULI) وإحصائيات فيرمي، ووصف نظام الجسيمات المتعددة عن طريق الدالة الموجية غير المتماثلة، وهذا يتعلق بالإلكترونات ذات اللف (المغزلي) $2/1$ والذي يدخل في قائمة (MQS) للخصائص الديناميكية، ولكن الذي ما زال لم يتأثر فيأخذ خصائص المفهوم الكلاسيكي الجسيمي (POINT) و(CONS).

ومع هذا فما زال المفهوم الجسيمي (QM) يشارك امتداد الـ (CP) هذه في الخصائص الكلاسيكية التامة للجسيمات والتي تجعلها ممكنة القياس،

=النظرية؛ أي تخطت الخاصية (Point)، وهو ما يتعارض مع مبادئ النسبية.

(١) بالنسبة إلى فلسفة بور التنامية انظر: Meyer - Abich1965, Jammer1966

والذي لم يلمس أيضاً هو المحتوى التأثيري أو الواقعي للمفهوم الجسيمي، والذي خرج عن نطاق التأثير حتى هذه اللحظة من قريب أو بعيد أيضاً فهو المفهوم السببي للجسيم^(١)، ومن ثم كلما بعدنا عن الإعتبار غير النسبوي للجسيمات الكتلية الشحنة فلا يبدو إشكالية في اعتبارها (QM) كوريث شرعي لـ (CP) في جعل مفهوم المنطق المجرد والسببي دقيقاً.

٦-٢-٢- كمات الضوء

أحدثت فروض أينشتين للكم الضوئي معنى ممتداً للتغيير، فقد تخطت السمة المميزة الكلاسيكية للمادة والإشعاع عن طريق المفهوم الجسيمي الممتد للظواهر الشعاعية، وكانت هذه خطوة تقريرية، نتجت من استعمال مدلول "جسيم" في جميع كمات المجال أيّاً كانت في نظرية المجال الكمي. إن الصورة الجسيمية للضوء والمسمى "فوتون" للجسيمات الضوئية تم التوافق عليها بمجرد أن امتدت فروض الكم الضوئي إلى قواعد الحركة النسبوية وحفظ الطاقة في عمليات التشتت المفردة والتي طبقت في تأثير كومبتون^(٢)، وقد جلبت قواعد الحركة النسبوية بعض الفروض في مفهوم الكتلة، فإنها تفرق كتلة السكون الثابتة m_0 وكتلة الجسم المتحرك $m(v)$ الذي يعتمد على السرعة، بالنسبة إلى الفوتون كتلة السكون هي صفر (0) وكتلتها الحركية

(١) على الأقل في مجال ميكانيكا الكم غير النسبوي. انظر مناقشات بنت Mott 1929 and

5.3.1

(٢) انظر الفقرة (٣-٢-٢).

هي $h\nu/c^2$ وبتطبيق قواعد الحركة النسبوية لفروض الكم الضوئي والناجح في ازدواجية المعنى الممتد في تغيير المفهوم الجسيمي:

(أ) قد توصف كتلة السكون؛ الآن للجسيم غير المشحون المبين عن طريق طاقة وكمية الحركة رباعية المتجة لقواعد الحركة النسبوية، وهنا يمتد المفهوم الجسيمي إلى الجسيمات عديمة الكتلة والتي تتقدم فقط في مسارات الحركة في مخروط الضوء.

(ب) تعتبر الجسيمات مكونات الضوء، في حال أفكار نيوتن التي ظهرت في صورة تساؤلات وشك حول الطبيعة الذرية للضوء^(١). فطبقاً للتكافؤ النسبوي للكتلة والطاقة فإن هذا الجسيم يكون مصحوباً بكتلة قصور، وبهذا السبيل نصل إلى المفهوم غير الرسمي للجسيمات في إطار فهم كمات الضوء أو الفوتونات والتي طرحت كالتالي حول عام ١٩٢٣:

(LQ) كمات الضوء (فوتونات)؛ هي:

(E) كمات عديمة الشحنة ذات طاقة $E=h\nu$.

(DISC) غير مستمرة، أي تأتي على هيئة كمات.

(INDEP) لا يعتمد بعضها على بعض.

(POINT) شبه النقطية في التفاعلات.

(CONS) موضوع قوانين الحفظ.

(١) انظر: Newton 1730 vs. Einstein 1905.

(BOSE) غير مميزة، تتبع إحصائيات بوز - اينشتين.

(PROB) تحرير احتمال عن طريق نظرية الإشعاع الكلاسيكي

(WAVE) في مستويات متراكبة ومتداخلة.

(NLOC) غير موضعية.

(LOCPD) محصورة أو مرصودة عن طريق العداد الجسيمي.

تتطلب العلاقة بين (NLOC) و (LOCPD) ملاحظة، فطبقاً لوصفها النظري تكون الفوتونات غير - موضعية (غير محصورة)؛ حيث إنها توصف عن طريق متجه موجي معين K أو تردد ν ويعتبران غير موجودين في مستويات محصورة⁽¹⁾، حتى لو تم قياسهما بواسطة عداد جسيمي وبالتالي يعتبران محصورين لجميع الأغراض العملية في تطابق مع (LOCPD). ومع هذا، فيجب ملاحظة أن (LOCPD) خاصة تأثيرية ليس لها نظير في الوصف النظري لفوتون ما حول عام ١٩٢٣ ولا في نظرية المجال الكمي الحديثة.

بالتالي، دار مفهوم الفوتون فقط في الخصائص الكلاسيكية للجسيم حول (INDEP) و (POINT) و (CONS)، ومع هذا فقد تغير معناه، وأصبح لـ (POINT) خاصية مجالية يكون لها معنى فقط حينما لا يوجد فعلاً عند

(١) في الواقع هذه حقيقة لأي جسيم نسبوي أو حالة مجال، انظر Halvorson 2002 Clifton and العامة جداً لمجالات الكم النسبوية غير معتمدة على جميع الاعتبارات العلمية لا مكانية موضعية الجسيمات بدوران منخفضة عن أطوال كومبتون لها الموجية دون تأثيرها مثلما في الإنتاج الزوجي.

مسافة معينة أو يتزاوج الفوتون موضعياً مع جسيمات أو مجالات أخرى، وقد تصاحبت (CONS) مع مجموعة بوانكاريه للحركة النسبوية، وازدادت خاصة عدم الاعتماد تغيراً (INDEP)، ومرة أخرى عادت نتائج القياس غير المرتبطة إحصائياً لتلعب دوراً ولكن في إضافة غير تمييزية وأخذت في الحسبان إحصاء بوز أينشتين المصاحب (BOSE).

الآن، أصبحت جميع الجسيمات دون الذرية هي موضوع نظرية الكم بينما يكون بعضهم عديم الكتلة ولم يكن نظاماً مقيداً، وقد أخذت الخصائص الكلاسيكية للضوء أطوالاً موجية أو تردداً على كاهل نظرية الكم للضوء محدثة الخاصية المزدوجة الموجية - الجسيمية^(١)، وفي الحقيقة أنتج ذلك المزيد في المعنى الانتقالي الممتد، فصممت الموضوعية الكلاسيكية إلى عدم الاستمرارية (DISK). فكانت الفوتونات أفضل ما يميزها هو طبيعتها غير المستمرة (المتقطعة) وتكون على هيئة كمات طاقة متقطعة، وقد تأكدت هذه النقطة عن طريق بور في بداية مجموعة محاضراته الشهيرة بما ينص على: الفرض الكمي الذي يصف أي عملية ذرية يكون أساساً في عدم استمراريته (عدم تواصله) أو حالة انفرادية وهو يتجنب تماماً النظريات الكلاسيكية ويرمز بالفعل الكمي لبلائك^(٢).

وطبقاً لهذا فإن أي خاصية كمية تأتي مضروبة في \hbar قد تحصر كجسيم وقد تكون محصورة موضعياً أو غير ذلك؛ (ويجب ملاحظة أن بور لم يفرق بين مضاعفات أو نصف المضاعفات للمقدار \hbar في حالة كمية

(١) انظر الفصل التالي.

(2) Bohr 1928,580.

الحركة الزاوية واللف (المغزلي) المعبر عنها في ميكانيكا الكم وكمات تكميم الطاقة بدلالة المقدار $h\nu$. ومع هذا، فهي تطبق حتى على نغمات الأوتار في الميكانيكا الكلاسيكية.

في يومنا هذا، وافق الفيزيائيون كثروا أم قلوا على افتراضين حقيقيين: أولهما؛ يرجع مفهوم الجسيم إلى الظواهر غير المتصلة (متقطعة)، وثانيهما؛ هذه الظواهر التي وضعت خطوطاً لقوانين نظرية الكم، إضافة إلى أنهم توافقوا على أنه عند مستوى التأثير هذا يكون الاحتياج لقوانين القياس شبه الكلاسيكي ضرورياً لرصد هذه الظواهر كمياً، آخذين في الحسبان تأثير كومبتون، فقد أدخل جميع الجسيمات دون الذرية لتكون موضوع نظرية اتقياس والتي تصف الجسيمات الكلاسيكية غير النسبوية والنسبوية التي لها كتلة $m \geq 0$ سكون.

وما وراء هذا التوافق هو استعمال مفهوم الجسيم بحرية في يومنا هذا وما يترتب عليه من الوصول للمزيد بتعميم التوصيات التي جاءت في محاضرات بور والتي أخذت في الحسبان عدم الاتصال لظواهر الكم؛ حيث تقاس كمات الطاقة لمجال الإشعاع عن طريق جهاز موضعي وقد حصروا أيضاً كجسيمات بالمعنى الإجرائي.

٦-٣ المفهوم الإجرائي للجسيم

من هنا يكون للمفهوم الجسيمي الحالي أساسان: أولهما؛ يوجد في تجارب الفيزياء الذرية والنوية والجسيمية وفي نظرية القياس التي تتبنى على المفهوم الجسيمي الكلاسيكي، ومن أول قياس e/m للإلكترون وحتى

يومنا هذا، وقد بررت عن طريق الظواهر التجريبية وعن طريق الافتراضات النظرية الموجودة في تحليل نتائجها، وأنها مبدئيًا تتبني على خصائص شبه كلاسيكية للمسارات الجسيمية الملاحظة في قياسات زمن - الطيران التي أجريت في تجارب تشتت الطاقة العالية في المعجلات الجسيمية، وهلم جرأً. والأساس الثاني هو فرض الكم الضوئي لأينشتاين والذي يبنني أيضًا على الظواهر التجريبية متما ظهر في الظاهرة الكهروضوئية كتأثير كومبتون. وبالتالي فإن التعريفات الإجرائية التالية للجسيم عامة جدًا:

من الناحية الإجرائية (OP) تكون الجسيمات:

(MESQ) تجميعات من الكتلة m والطاقة E واللف مغزلي s والشحنة q .

(LOCPD) موضعية بواسطة عداد جسيمي.

(INDEP) مستقلة عن بعضها البعض.

انسأقت هذه الخصائص من المفاهيم الكمية (QM) و (LQ) المشروحة سابقاً، وفي (MESQ) تعمم الخاصية الكلاسيكية للكتلة والشحنة بطريقة الجسيمات الكتلية نفسها والكمات الضوئية لتكون على النمط الموجود نفسه، فأمكن قياس اللف المغزلي للجسيمات ذات الكتلة والشحنة، على سبيل المثال، في تجربة ستيرن - جيرلاخ، وفي (MESQ) حل المفهوم الإجرائي لتجميع الخصائص محل التعبير الميتافيزيقي من الواضح عدم إمكانية قياسه، وفي (LOCPD) عممت الخاصية الكلاسيكية لكونها موضعياً أو حصرياً في الحس أو المعنى الاحتمالي الإجرائي لموضعية جسيمات وفوتونات ميكانيكا الكم،

وما زال هذا التعميم ينبني على الاعتقاد الراسخ بأنه يوجد أشياء دقيقة قد يتم حصرها بوسائل العداد الجسيمي، وترتبط الآن خاصية عدم الاعتماد (INDEP) بحدوث العد الجسيمي غير المرتبط، المقررة لعدم الاعتماد الإحصائي للأحداث المفردة التي تكون مجموعة أو فرقة.

قد يسأل سائل عما إذا كانت الجسيمات بالمعنى الإجرائي لا تُرد إلى مثل هذه الأحداث، مجرد طقطقات في عداد جيجر أو أي عداد آخر. لالسن يُمكن ردها. فالمفهوم مُحمل بالنظرية. وهو يتضمن الاعتقاد الواقعي المذكور عاليه. ومن الناحية الإجرائية، يتم إدراك الجسيمات كتجمعات لخصائص ديناميكية معينة والتي تخضع لشروط تجريبية معرفة دائماً ما تكون متجمعة. ما عدا ذلك لم يكن هناك أي معنى لإجراء تجارب للجسيمات دون الذرية. فلا بد من قابلية النتائج التجريبية للتكرار. واستقرت تجميعات الخصائص الديناميكية فقط حينما تم التمكن من تكرار إنتاج التجارب، ومن ثم اهتم المفهوم الإجرائي للجسيم بمواد تجريب لوكين أي بتجميع الخصائص التجريبية والتي اتسقت معاً⁽¹⁾، أو حزمت الخصائص التي تظهر متكررة مع بعضها. وفي عالم الفوضى حيث لا يوجد مثل هذه الحزم من الخصائص الظاهرة وأنه يستحيل ممارسة الطرق التجريبية بنجاح، في الميتافيزيقا تكون مثل مواد تجريب لوكين أكثر من مجرد أحداث معزولة ليست معاد إنتاجها ولكن أقل من حاملة للخصائص. (علاوة على ذلك، فإنها قد تفسر من خلال المُخطط الكانطي للجوهر، وطبقاً لما في النهاية فإن مفهومنا الخاص للجوهر أن يجعلها ممكنة التصور كمثل هذه الحزم أو تجميعات الخصائص).

(1) Locke 1689, Book II, beginning chap. XXXIII.

تستخدم أيضاً مفاهيم الجسيم في الفقرة التالية هذه الطريق الميتافيزيقية التي لا يمكن تجنبها وإن كانت مُعتدلة لتحديد خصائص ديناميكية مُستقرة لنوع من الجسيمات.

لسوء الحظ، لا يوجد نظير بديهي غير غامض لهذا المفهوم الجسيمي المعتدل الميتافيزيقي، وأحدثت نظرية الكم الخاصة بالمزدوجة الموجية الجسيمية. وفي المستويات الكمية فقط توحد الجسيمات ذات التعريفات (QM)، و (LQ) (على وجه التقريب) لتكون حصرياً موضعية، ولكن المستويات الموضعية لا تكون مفضلة؛ حيث إنه في أي ديناميكا كمية يتم تفضيل المستويات غير الموضعية، ودون القياسات الموضعية المكررة نجد أن المستوى الميكانيكي الكمي يتطور في اتجاه الموجة المستوية، ودون جهاز القياس الماكروسكوبي والذي هو نفسه موضعي؛ حيث لا يوجد شيء موضعي ويوجد إمكانية لعدم إعادة تعريف نوع الجسيم نفسه في القياسات المتتابة^(١)، والأشياء التي على نحو أسوأ ككمات الضوء تكون نسبية ولكن طبقاً لنظرية الكم النسبية فإن الموضعية تكون مستحيلة في الفهم الدقيق^(٢)، إن أي نظرية كمية نسبية تكون على نشاذ مع إمكانية وجود للمستويات الموضعية، ومن ثم فعند الحديث الدقيق في المجال النسبوي فإنه لا يوجد نظير بديهي أو أساسي للمفهوم الإجرائي للجسيم، وإن هذا ليس فقط نتيجة الوجود الكلي لمشكلة القياس الكمي ولكن يكون نتيجة لعدم التلاقي الكبير بين نظرية الكم النسبوية ومفهوم المستوى الموضعي، وقد أعطت هذه المشكلة تركيزاً في أن المفهوم الجسيمي للفيزياء دون الذرية يكون إجرائياً من حيث المبدأ.

(١) انظر الفقرة (٦-٦).

(٢) انظر: Clifton and Halvorson 2002، وانظر أيضاً الفقرة (٦-٦).

إن أي محاولة لفهم المفهوم الجسيمي على وجه الحصر بشكل أساسي يحدث تشويشاً مفهوماً، وحينما واجه الفلاسفة الاستخدام الكثير لتوجهات الفيزيائيين في تعبير "جسيم" فيظهر بشكل تلقائي في الغالب مثل هذا التشويش. عديمو الخبرة في نظرية الكم هم فقط الذين يعرفون ما حول الجسيمات الكلاسيكية وإنهم يعرفون الجسيمات بمفرداتها الدقيقة الموضوعية عن طريق مساراتها، وإن فلاسفة نظرية الكم في معظم الغالب ليس لديهم معرفة تفصيلية عن الاكتشافات التجريبية والمحتوى الإجرائي للمفهوم الجسيمي، وقد ركزوا بوضوح على الموضوعية كخاصية جسيمية سائدة^(١)، ومع هذا فقد احتفظ معظم الفيزيائيين بالحدوث الجسيمي الكروي دون الالتزام برؤية عالم الميكانيكي الخفي أو علم الوجود الجسيمي الكلاسيكي، وفي الحقيقة فإن المسارات الجسيمية وأحداث التثنت المسجلة بواسطة العدادات الجسيمية قد أمدتهم على الأصح بأسباب جيدة للاحتفاظ بالتعبير "جسيم"، وحتى يومنا الحاضر فإنهم يتحدثون عن فيزياء الجسيمات. إلا أن المفهوم الجسيمي المناظر إجرائي بشكل جزئي، وذلك تأسيساً على بعض بديهيات النظرية الكمية.

(١) انظر خصائص نظرية الجسيم والذى أرسل ريدهير مقدمة لمناقشة المسائل الفلسفية لنظرية المجال الكمي "اختصت نظرية الجسيم بمفردات معينة (الجسيمات) لتعريف من الخصائص، ستحتوي هذه الخصائص بمركزية (موضوعية) الزمان - المكان" Redhead1988,10. وطبقاً لهذا فإن النظريات الحالية في الجسيمات الأولية لم تكن نظريات جسيمية.

وعلى النحو الموضح في الفصل السابق، فإن صلب مشكلة اللا مقياسية في الانتقال من الفيزياء الكلاسيكية إلى فيزياء الكم يكمن في عدم التلاقي بين الجوانب الإجرائية والبديهية والمرجعية للمفاهيم الكمية. وظهر عدم التلاقي كالتالي: لقد دفع تحليل مُعطيات أي تجربة لفيزياء الطاقة العالية الفيزيائيين لتحليل مسارات الجسيمات المتفردة وأحداث التشتت في الجانب شبه الكلاسيكي، ولكن من وجهة النظر البديهية فإن الأساس الإجرائي لميكانيكا الكم ونظرية المجال الكمي يكون محتملاً، واعتتت الوجهة الكلاسيكية للميكانيكا بالجسيمات المنفردة وأعطت مسألة القياس الكمية غير المعاد حلها عند مستوى الحصر الجسيمي المنفرد وكان عدم الاتفاق في عدم التجنب، وقد بنى المفهوم الإجرائي للجسيم (CP) بعض الجسور؛ حيث فشلت فيها المفاهيم النظرية (CP) و (QM) و (LQ) لكي تتفق بعضها مع بعض، وإذا أهمل ذلك فسنبقى في الظلام كما في كيفية ارتباط علاقة المفهوم الجسيمي الكلاسيكي وإرثها الكمي المتنوع.

٦-٤ مزيد من الجسيمات الكمية

يتم التداول اليوم حول كلمة "جسيم" بعدد من المعاني غير التصويرية فعلاً، دون نظرية موحدة للجسيمات الأولية وتفاعلاتها؛ حيث لا يوجد اتفاق عام حول كيفية استعمال مقطع "جسيم"، ووراء المفهوم الإجرائي للجسيم (OP) الوارد سالفاً في هذا فقط يتضح سياق نظرية نوعية، أساساً الجسيمات هي أشياء دقيقة ترجع إلى نظرية أساسية التي تبين مدلولات معينة، ويحدد نوع الشيء الدقيق هذا عن طريق الوصف النظري المرتب، بهذا المعنى

نستطيع القول: إن المفهوم الجسيمي يعرف ضمناً في حس طريقة هيلبرت الأساسية وهي تعرف ضمناً عن طريق بديهيات الوجهة الكلاسيكية للميكانيكا بواسطة نظرية الكم أو عن طريق النموذج النظري المتعلق بذلك أو البنائي.

علاوة على ذلك عادة ما تكون ثمة حاجة لوجود بعض التناظر التجريبي بين المفهوم البديهي للجسيم والمفهوم الإجرائي للجسيم (OP). إن الاعتقاد في وجود نوع معين من الجسيمات يعتمد على التدهيم التجريبي للوصف النظري؛ أي يعتمد تقريباً على النموذج التجريبي؛ أي يجب على الوصف النظري أن يتفق مع تجميع الخصائص الديناميكية التي وجهت لأنواع المعاد إنتاجها للمسارات الجسيمية ولأحداث التشتت، وهذا هو الذي صنع الفرق بين الجسيمات الفيزيائية والوسائل الرياضية المجردة للحسابات.

ومن ثم فإن طبيعة الجسيم تتحدد بدلالة البديهيات لبعض الديناميكا، وهذا مطابق لما قبله حالة الفراغ ومجموعة دوال الحالة ومعادلة الحركة.

وقد ذكر بالفعل ثلاثة أمثلة لمثل هذه التعريفات الضمنية للمفهوم الجسيمي بدلالة البنائيات النظرية، وأحدثت التعريفات غير الصورية (OP) و(QM) و(LQ). إن الجسيم الكلاسيكي هو موضوع أساسيات الوجهة الكلاسيكية الميكانيكية، وجسيم ميكانيكا الكم هو موضوع أساسيات فراغ هيلبرت ومعادلة شرودنجر والفرض المخطط للحالات (المستويات) في فراغ هيلبرت وهذه التعريفات معروفة جيداً، وقد أدلت أمهات الكتب في الفيزياء النظرية بدلوها في ذلك الشأن بتأكيد أن الأشياء الدقيقة الديناميكية تحت الفحص هي جسيمات (إذا وجد أي إعلان بهذا الشأن)، على سبيل المثال، قدم

كتاب لاندو ليفشيتز الشهير المفاهيم الجسيمية بالنسبة إلى الميكانيكا الكلاسيكية والكمية في هوامش الكتاب⁽¹⁾، واعتماد المثال الثالث على نظرية الكم البدائية للإشعاع المسماة فروض الكم الضوئية لأينشتين في عام ١٩٠٥ وما تلاها في عام ١٩٠٦ المبنية على علاقة بلانك - أينشتين $E=h\nu$ وقوانين الحركة النسبوية (خاصة حفظ كمية الحركة - والطاقة) وقوانين الانتقالات الإشعاعية في نموذج بور الذري، ويمكن إعطاء تعريفات كاملة لأساسيات الكم الضوئي فقط في إطار نظرية المجال الكمي.

لكن هنا بدأت التعبيرات الملتبسة للمصطلحات الفنية في التواجد، وقد استعملت في سياق نظرية المجال عدة مفاهيم غير صورية للجسيم، وبالمباشرة نفسها فقد يعتبر مرجعية المجال الكمي أو كماتها المجالية إلى الجسيمات، وتعتني نظرية المجال الكمي بتخليق أو إفناء كمات المجال، وكمات المجال الحقيقية هي جسيمات فيزيائية بالحس المقابل للمفهوم الإجرائي للجسيم (OP)، إضافة إلى أنه يوجد ما يسمى الجسيمات الافتراضية؛ حيث تكون حالاتها الوجودية غير واضحة، وتكون مغمورة في التمدد الاضطرابي لتفاعلات المجالات الكمية؛ أي نقول: إنها وسائل حسابية شكلية ولا يمكن قياسها طبقاً للمفهوم الإجرائي للجسيم (OP). ومع هذا فهي تحدث تأثيرات تجميعية يمكن قياسها حقيقة، وترجع شبيهة الجسيمات في فيزياء المادة المكثفة إلى النتائج المأخوذة من الظواهر التجمعية في الجوامد، وهي وسائل شكلية أيضاً ولكنها النظير الصوري لكمات الكم الحقيقي وأنها حقيقة تحمل المعنى الإجرائي كما سنرى بعد ذلك.

(1) Landu and Lifschitz 1987,1note1 and Landu 1988,2,note2: انظر

لكي نجعل هذا المدى في استعمال أوضح للتعبير "جسيم"، سأناقش الآن المفاهيم التالية:

(١) كمات مجال نظرية المجال الكمي النسبوي (FQ).

(٢) تعريف جسيم فيجنز بدلالة نظرية المجموعة (GT).

(٣) الجسيمات الافتراضية (VP)،

(٤) الجسيمات الشبيهة في فيزياء المادة المكثفة (QP) والتي ليست

نظيرًا نسبيًا لكمات المجال النسبوي.

لا يوجد ما يقابل مفاهيم مبدأ بور وهايزنبرج للجسيمات الكلاسيكية، وكلما بعد عن كل ما يقابل النماذج الكلاسيكية للأشياء الميكروسكوبية الدقيقة فإنها ترجع للمجالات الكلاسيكية.

ومع هذا، ففي ميدان المجالات الكمية النسبوية وكمات مجالها، فإن انهيار ما يقابلها يشكل مشكلة لكل ما يتعلق بالحقيقة الكلاسيكية على الرغم من كل هذه المفاهيم عدا ما يختص بالجسيمات الافتراضية التي قد تُتَاطَر (تقريبًا) الجسيمات بالمعنى الإجرائي.

٦-٤-١ كمات المجال

يتم تحديد الجسيمات الناتجة من كمات المجال وذلك بتعميم فروض الكم الضوئي لأينشتين التي تتعامل مع الكمات المفترضة بأي نظرية في مجال الكم. وكان أول نضج لنظرية مجال كمي هي الديناميكا الكهربية الكمية

وطرحت أساسياتها في ورقة ديراك عام ١٩٢٧ بعنوان: نظرية الكم لانبعاث الإشعاع وامتصاصه^(١)، وكانت الخطوة الثانية هي نظرية ديراك للإلكترون والتي طورت أصلاً في إطار عمل ميكانيكا الكم النسبوية، إضافة إلى حلول الطاقة الموجية المعتادة للإلكترون، وقد تنبأت معادلة ديراك بالدوال الموجية المقابلة لحلول الطاقة السالبة، والتي صاحبت البوزيترون بعد ذلك وهو الجسيم الضد للإلكترون ويحمل كتلة الإلكترون نفسها ولفه ولكن بشحنة عكسية (موجبة). وتتلاشى الجسيمات وأضدادها، وحشت عدم الحفظ المقابلة للعدد الجسيمي للانتقال خطوة من ميكانيكا الكم النسبوي إلى نظرية المجال الكمي.

لقد طبقت نظرية المجال الكمي على المادة بمثل ما طبقت طريقتها على الإشعاع، وميزت المادة المكتمة والمجالات الإشعاعية فقط بـقيم لفيها المغزلي ومعادلات المجال المقابلة وإحصائيات فيرمي أو بوز المصاحبة لكمات المجال وتتبع كمات المجال ذات اللف المساوي أنصاف القيم الصحيحة (فيرميونات) قاعدة باولي للاستبعاد وإحصائيات فيرمي. أما كمات المجال ذات اللف المغزلي ذي الأعداد الصحيحة (بوزونات) فتتبع إحصائيات بوز - أينشتين ووصفت المجالات الخاصة بكل عن طريق معادلة كلين - جوردن (اللف صفر)، ومعادلة ديراك (اللف ١/٢) ومعادلات ماكسويل (اللف ١)، وعرف في عديد من كتب نظرية المجال الكمي أن الكمات الموجودة في هذه المجالات بالجسيمات، وقد عمم بجوركن ودريل في كتابهما الشهير مفاهيم الإلكترون والبوزترون في هذا الطريق، وطبقاً لهذا فإن كمات

(1) Dirac 1727.

المجال التي تخص القيم المميزة الموجبة أو السالبة الناتجة من مؤثر الشحنة تسمى الجسيمات أو الجسيمات الصغيرة على التوالي⁽¹⁾.

لقد اتبع الكتاب المعتاد والذي يقرب طريقة كشف لنظرية مجال الكم أوصلت بمبدأ التعميم المقابل لهايزنبرج⁽²⁾، وقد قدمت نظرية مجال الكم عن طريق تكميم نظرية المجال الكلاسيكية وحلت محل مشاهدات المجال الكلاسيكي المؤثرات وقواعد تبادلية معينة تم تعريفها أو أوجدت علاقات غير محددة النوع لهايزنبرج والتي عبرت عن الملامح غير الكلاسيكية لملاحظات المجال.

فبالنسبة إلى المجال أو لجسيم اللف صفر تبدأ خطوة التكميم من أي مجال قياس كلاسيكي أو هاميلتوني للذبذبة التوافقية الميكانيكية الكمية. وتسمى الخطوة المكتممة الأخيرة بالتكميم الثاني للسبب الشكلي التالي - تكميم الدالة الموجية للذبذبة التوافقية الميكانيكية الكمية أو تكميم ذبذبات المجال القياسي الكلاسيكي منتجاً النتائج الصورية نفسها بدقة والمسماء حلول معادلة كلين - جوردن المكتممة، ويعمل التكميم الثاني كالتالي. أولاً: تكون الذبذبة التوافقية الكلاسيكية مكتممة وفي الخطوة الثانية تتحول معادلة شرودنجر للذبذبة التوافقية إلى صورة هايزنبرج وتكمم مرة أخرى، وحيث تكون شكل النتائج هي نفسها في كلتا الحالتين فيتكافأ صورياً المجال الكلاسيكي المكتمم لنظام عديد الجسيمات الميكانيكي الكمي مع عديد الجسيمات اللانهائي الخاص بكل من المذبذبات أو درجات الحرية. ومجال ماكسويل يكون مكتمماً

(1) Bjorken and Dreef, and of chap.12.5.

(2) Heisenberg 1930a,78 and 1930b, 105; ٢-٥-٤ بالفقرة الواردة بالمناقشة

كالتالي. يتطور المجال الإشعاعي الكلاسيكي إلى أساليب مجالية لكمية حركة معينة P أو تردد زاوى $\omega=2\pi\nu$ والذي يعبر عنه بدلالة متجه الموجة K \hbar $P \perp K$ = وحينئذ تصبح كمية (مكممة) بدلالة مؤشرات التخليق أو الإقناء a_k , a_k^+ لكمات المجال ذات الطاقة $E=h\nu_k$ والتي تخص أسلوب المجال ذات العدد الموجي K .

بصفة عامة فإن كمات المجال للمجال المكمم تتميز بدلالة العدد الموجي.

$K = \hbar P = h/\lambda$ ومجموعة القيم للخصائص الديناميكية الكمية (المكممة) مثل الكتلة واللف وأخيرًا الشحنة، وتعتبر كمات المجال أصغر وحدات هذه الخواص؛ مثل تجميع الخصائص الديناميكية وأنها بوضوح تقابل مفهوم الجسيم العامل (OP) ⁽¹⁾، وتخضع مؤثرات التخليق والإقناء a_k , a_k^+ للعلاقات التبادلية التالية: ⁽²⁾

$$(6.1) \quad [a_k, a_k^+] = 1,$$

$$(6.2) \quad [a_k, a_k] = 0,$$

$$(6.3) \quad [a_k^+, a_k^+] = 0.$$

بالنسبة إلى الفيرميونات أو البوزونات فإن $[a_k, a_k^+]$, تعني الضد

التبادلي

(1) تركت جانبًا مسألة الموضوعية المذكورة بعاليه.

(2) أى اعتمادية على المحاور الزمانية المكانية (والتي يعبر عنها بدلالة الدوال S) موجودة هنا، بالنسبة إلى العددين الموجيين المختلفين k, k فإن العلاقة التبادلية المتلاشية هي (6.1) والتي حينئذ تصبح $(a_{k_1}^-, a_{k_2}^-) = S(k, k_1)$.

هذه المؤثرات على أشكال المجال، يولد المؤثر التخليقي a_k^+ مجالاً كمياً للعدد الموجي k ، ويصنع المؤثر الإفنائي a_k مجالاً كمياً لصيغة خاصة بالمجال المختفي:

$$(6.4) \quad a_k^+ \Psi_{k,n} = \sqrt{n+1} \Psi_{k,n+1},$$

$$(6.5) \quad a_k \Psi_{k,n} = \sqrt{n} \Psi_{k,n-1}$$

قد تتطور الآن، حالة المجال Ψ إلى مجموع حالات لأشكال المجال $\Psi_{k,n}$ للعدد الموجي k وأعداد الإشغال المعرفة جيداً n (هذه المستويات تكون فراغ فوك).

$$(6.6) \quad \Psi = \sum_{k,n,k,n} \Psi_{k,n}.$$

والمستويات في هذا التجميع هي مستويات معينة لمؤثر عدد الإشغال $N = a_k^+ a_k$:

$$(6.7) \quad N \Psi_{k,n} = n \Psi_{k,n}.$$

ومن ثم إذا أثر المؤثر التخليقي a_k^+ على المستوى المفرغ Ψ_0 فيتولد الشكل المجالي $\Psi_{k,1k}$ ، بمجال كمي واحد للعدد الموجي k ويكون قيمة المستوى المقابل للمؤثر العددي الإشغالي هو:

$$(6.8) \quad N \Psi_{k,1} = 1 \Psi_{k,1}.$$

إنه من المغري أن نحدد مستوى معيناً لمؤثر عدد الإشغال مع تجميع كمات المجال أو الجسيمات، ولكن هذا لم يعمل، على الأقل إذا كانت صورة الجسم الكلاسيكي نفترض مقدماً بشكل ضمني، ولم ينته المجال الكمي إلى

سرب من الجسيمات في الفهم الكلاسيكي، ولنظرية المجال الكمي عدة ملامح تحطم أي مقابلة واضحة مع المفهوم الجسيمي الكلاسيكي على وجه الخصوص، فالمجالات الكمية ذات الكثافة المنخفضة لها خصائص غير موضعية وغير كلاسيكية مذهشة، وعلى المستوى العملي فإن هذه الخصائص تظهر في تجارب الأشعة الساقطة ذات الكثافة المنخفضة^(١)، ويعبر عنهم عند المستوى الأساسي بدلالة العلاقات التبادلية لمؤثرات المجال، إن مؤثرات قوى المجال الكهربائي والمغناطيسي لمجال الإشعاع الكمي لا يكون متبادلاً وأن طور أشكال المجال بمستوى العدد الإشغالي لا يكون جيد التعريف وبالتالي فيستحيل إعزاء قوى المجال المعرفة جيداً إلى وجهة النظر الزمانية المكانية أو لشدة المجال القاطع للمناطق الزمانية المكانية المحددة.

وتعطي شدة المجال بدلالة القيمة المتوقعة للمؤثر العددي الإشغالي N وأساس حالة المجال الكمي هو الفراغ المتعلق بأداة الفراغ وأنها تتعلق بالقيمة المتوقعة $\langle \Psi_{k,0} | a_k^\dagger a_k | \Psi_{k,0} \rangle$ أي المتوقعة للعدد صفر (أو القيمة المتوسطة) لكلمات المجال، ولكن طبقاً لقوانين نظرية المجال الكمي تتراوح الحالة الفراغية حول عدد الإشغال، حتى إن المتوسط العددي لكلمات المجال قد يكون صفراً، ويبدو الإنتاج التلقائي والإفنائي لكلمات المجال موجود كلياً كما هو موضح في مثال ظاهرة كازيمير وتجارب الاستقطاب بالشعاع الفوتوني منخفض الكثافة^(٢).

(١) انظر مناقشة مثل تلك التجارب في الفصل السابع الفقرات (٧-٣) إلى (٥-٥).

(٢) تأثير كازيمير (Casimir) هو تجاذب لوحى المعدن فى الفراغ الذى ينتج عن تعديل

حالة الفراغ بينهما، انظر: Itykson and zuber 1985,138-141.

ومن ثم لا تصنع كمات المجال مجالاً كمياً كمكون في أي اتجاه مستخدم وقد أشركوا شدة المجال بطريقة مختلفة وأقل وضوحاً، فتحل مجموع صيغ مجال الكم الكمومي في (٦,٦) محل الحالات الفيزيائية الكلاسيكية والميكانيكا الكمية، وتسمى المسارات في الأطوار الفضائية والموجات الكهرومغناطيسية والدوال الموجية لشروندجر وتصف حلول معادلات المجال النسبوية المجالات الحكومية بدلالة تأثيرات المؤثرات الخاصة بالتخليق والإفناء وبالأحرى بدلالة تحول الدوال الموجية المهمة، فهي تتنبأ بانبعث كمات المجال وامتصاصها، وهي تبعث لمعادلات ماكسويل الكمومية (الجسيمات ذات اللف ١)، وأمثلة أخرى هي إلكترونات وبوزيترونات معادلة ديراك (لفها ١/٢) أو بيونات معادلة كلين-جوردن (ذات اللف صفر)، وبصفة عامة قد تتأهل كمات المجال كما يلي^(١):

كمات المجال (FQ) هي:

(MESQ) تجميعة الكتل m والطاقة E واللف s والشحنة q_i

وفي تجارب الاستقطاب ذات الفوتونات الفردية لا يسمح المستقطبان المتقاطعان العموديان بمرور الإشارة خلالها، بينما يتقاطع المستقطب الثالث القطري بإعادة ظهور الإشارة؛ انظر المناقشة في الفقرة (٧-٣-٣).

(١) بالنسبة إلى كمات المجال النسبوي في (MESQ) فإن المعنى هو كتلة السكون للجسيمات النسبوية، وبالنسبة إلى الشحنة الكهربائية q أضف الشحنات العامة للتفاعلات الكهروضعيفة والقوية أي النكهة q_f واللون q_c انظر (ال فقرات ٦-٤، ٦-٥) الجسيمية النظرية والكواركات.

(DISC) عدم الاستمرارية؛ أي أنها تأتي على هيئة كمات (غير متصلة).

(INDEP) غير معتمدة على بعضها البعض.

(POINT) شبه النقطية في التفاعلات.

(PROB) تحدد بالاحتمالات عن طريق معادلة المجال الكمومي.

(WAVE) في مستويات تراكيبة أو تداخلية.

(NLOC) غير موضعية.

(LOCPD) موضعية عن طريق العداد الجسيمي.

(COMM) موضوع قواعد تحويل معينة لأضداد المحولات

(فيرميونات) أو محولات (البوزونات).

(NDIST) المميزة عددياً وتتبع إحصائيات فيرمي أو بوز (معتمدة على

اللف).

(CONS) الأشياء المرتبطة بقوانين الحفظ (البقاء).

(BOUND) قابل لتكوين أنظمة مربوطة.

ليست فقط الفيرميونات ولكن أيضاً العديد من البوزونات التي لها

خصائص شبه - النقطية (BOUND)^(١)، وتعتمد الكميات المحفوظة

(CONS) على تماثل المجال محل الاهتمام، وقد أحدث ذلك في مجموعة

(١) انظر الفصل السادس (فقرة ٦-٥).

المفاهيم (GT) الجسيمية النظرية نقاشاً في القسم التالي، فبقيت خصائص شبه الموجية للمادة الكلاسيكية أو المجالات الإشعاعية في (WAVE)، وقد عبرت خاصة شبه - الجسيمية (DISK) عن التكميم لأنماط المجالات بدلالة كمات الطاقة $E=h\nu$ أو كمية الحركة $p=\hbar k$ التي تخلقت أو تلاشت، وقد نشأ هذا من كمومية المجال أو من قواعد تحويل مؤثرات المجال، وبالنسبة إلى البوزونات تعطي هذه القواعد بدلالة المحولات، وبالنسبة إلى الفيرميونات تعطي بدلالة ضد المحولات، ومن ثم حسم وجود لف كمات المجال في قائمة (MESQ) في الخصائص الذاتية، وبتثبيت استعمال المحولات أو المحولات المضادة فإن اللف يحدد الإحصائيات المتتالية لـ (NDIST) محدثة أي من إحصائيات فيرمي أو بوز - أينشتين، وبهذه الطريقة ظهر تأثير اللف على الخاصية المعتمدة (INDEP)، والتي لها تحول جوهري بالمقارنة مع الخاصية الكلاسيكية المقابلة^(١).

والعلاقة بين (NLOC) و (LOCPD) هي نفسها كالخاصة بالفوتونات^(٢)؛ حيث توصف كمات المجال عن طريق متجه موجي معين k أو التردد ν وأنها لا تتواجد في حالات أو مستويات موضعية حتى لو أنها قيست عن طريق عداد جسيمي وبالتالي يصلح موضعياً لجميع الأغراض العملية في تطابق مع الخاصية الإجرائية (LOCPD).

وقد أحدثت قوانين الحفظ (CONS) ترابطات غير موضعية لكمات المجال المقاسة؛ مثل المثال المعروف تماماً لترابطات (أينشتين - بودولسكي

(١) انظر الفصل السادس (فقرة ٦-١).

(٢) انظر الفصل السادس (فقرة ٦-٢-٢).

- روسين (EPR) المعروضة⁽¹⁾، إضافة إلى أن قواعد المحولات (COMM) تكون مسئولة عن إمكانية الترابطات شديدة اللا موضعية، وعلى سبيل المثال معاملات مؤثرات قوى المجالات الكهربائية والمغناطيسية لمجال ماكسويل الكمي لا تحول أو تبدل، أيضاً، أين تكون شدة المجال؟ والمؤثرات الطورية التي قد تنشأ في الكم الضوئي⁽²⁾ ترتد غير متحولة بمؤثر عدد الإشغال وبالتالي، كم عدد كمات الضوء التي يحويها شعاع الليزر في المستوى المتسق؟ فبوضوح لا يوجد بالعديد من مستويات المجال قيمة محددة لهذه الكميات، وسوف يناقش في الفصل التالي النتائج غير الموضعية.

وتأكدت نقطة إضافية، كمات المجال للمجالات الكمية المتفاعلة المقابلة للمفهوم الإجرائي للجسيم (OP). تتجمع كمات المجال للمجالات الحرة للخصائص الديناميكية مثل الطاقة (أو التردد) والكتلة والشحنة واللف المغزلي، إضافة إلى جميع الأغراض العملية فإنها تعتبر متمركزة في العداد الجسيمي، ويقابل عددها الامتصاص الكمي (أو ما يقابلها أكثر تعقيداً في العمليات التشتتية مثل ظاهرة كومبتون). والمطلب أن كمات المجال للجسيمات غير المتفاعلة موجودة وتبدو متناقضة، ومع هذا فتفسر تفاعلات المجالات الكمية بدلالة ساعات التشتت، بينما تعتبر الجسيمات الداخلة والخارجة لها تصرف حر عند النهاية الطرفية. (ويكون لمربع ساعات التشتت معنى احتمالي معتاد) إضافة إلى خضوع عمليات الرصد لقوانين الحفظ ولقواعد الانتقاء الفائقة للخصائص الديناميكية لكمات المجال، على الأقل

(1) انظر الفصل السادس Einstein et al.1935

(2) انظر على سبيل المثال Walls and Milburn 1994,23-62

بالنظر إلى الكميات المرصودة من الطاقة والكتلة والشحنة واللف المغزلي وهلم جرأ...، وتتصرف كمات المجال التشتتية كلاسيكياً وفي أي حالة فإنها لا تتفرد بواسطة مسار.

٦-٤-٢ تعريف المجموعة النظرية

طبقاً للتركيب الخاص بالمستوى الفضائي ومعادلات المجال فإن نظرية المجال الكمي تقدم بديلين ممكنين للمفهوم الجسيمي الكلاسيكي: كل أنماط المجال سواء التي يعمل فيها معامل التأثير التخليقي أو الإفنائي أو كمات المجال التي تخلق وتفنى، يوصف كلاهما بدلالة تجميعية الخصائص الديناميكية نفسها ومن وجهة النظر الإجرائية (OP) فإنها خطوة واضحة لتحديد جسيمات فيزياء الجسيمات السارية مع كمات مجال نظرية المجال الكمي لكن من وجهة النظر الأساسية أو البديهية فإن الخصائص التركيبية لمعادلات مجال نظرية المجال الكمي تكون هي السائدة، فماذا يكون تكوين فضاء الحلول لهذه المعادلات المجالية؟

في هذا التوجه فإن التعريف المعتاد للجسيمات يكون مع التمثيل المتعذر تبسيطه لمجموعة بوانكاريه، فمجموعة بوانكاريه هي مجموعة التحويلات المتماثلة الزمنية المكانية للنظرية النسبوية وإن إحدى مجموعاتها الفرعية هي تحويلات لورنتز، وطبقاً لنظرية نيوتن للفيزياء النظرية فإن عدم تغيير النظرية الفيزيائية يكون مصحوباً بقوانين حفظ معينة محققة عن طريق كميات فيزيائية للنظرية، وبهذه الطريقة فإن قوانين الحفظ للكتلة والطاقة وكمية الحركة الزاوية والشحنة تكون مقتربة الاتصال وكمية الحركة وكمية

الحركة الزاوية والشحنة تكون مقتربة الاتصال بالتماثلية للديناميكا الفيزيائية. في عام ١٩٣٩ أظهر فيجنز ببحثه الجوهري أنه يمكن تقسيم الحلول لأي معادلة مجال نسبي طبقاً لتمثيل مجموعة بوانكاريه المتعذر تبسيطها بدلالة كميات الكتلة واللف المغزلي والندية^(١). وهذا يمكّن بحلول جميع معادلات المجال من أن تكون كمية أم لا، ومن ثم فإنها لا تكون محددة لنظرية الكم على الإطلاق وتطبق عموماً إلى حد بعيد على أي نظرية نسبية للمجالات غير المتفاعلة إضافة إلى أنها قد تمتد لمعادلات المجال غير النسبوي أي إلى مجموعة جاليليو للميكانيكا غير النسبوية وميكانيكا الكم.

قد تذكر في النهاية، أن هذه التطورات لا تطبق فقط على ميكانيكا الكم ولكن تطبق أيضاً على جميع النظريات الخطية، على سبيل المثال، معادلات ماكسويل في الفضاء الفارغ [...] واضطراد الزيادة في العمومية يتم التحصل عليها عن طريق الحسابات المعروضة كما قورنت بالنظرية المعتادة للممتدات المتكونة في عدم وجود افتراضات مرتبطة بطبيعة المجال للمعادلات ذات الشأن وتكون ضرورية^(٢).

يعتمد اختيار معادلة المجال النسبوية النوعية على اللف المغزلي. وتختص معادلة كلين - جوردن باللف المغزلي ذي القيمة $(1/2)$ ، وتختص معادلات ماكسويل باللف المغزلي الذي يساوي واحداً (١)، وأخيراً فقد تحولت إلى أن حفظ الندية أو عدم الحفظ الذي يعمل فرقاً آخر معهما) في نظرية المجال الكمي النسبوي يكون لكمات مجالها الخاص لف مغزلي صفر

(1) Wigner 1939

(2) نظرية الممتد المعتاد" هي ميكانيكا كم في فراغ هلبرت. Wigner 1939

و ١/٢ أو ١. ذلك طبقاً لتصنيف فيجنز الذي يعطي قيمة اللف المقابل لحلول معادلات المجال الخاص، ومن ثم نواجه التباساً ذا دلالة وقد ذكرت سابقاً: في سياق نظرية المجال الكمي فإن الجسيمات قد تحدد سواء بكلمات المجال أو بحلول معادلات المجال أي بالمجالات أو بأنماط المجال، وهذا يصنع فارقاً أساسياً لجميع حالات أو مستويات المجال عدا الحالات المعينة لعدد الإشغال واحد ١ وإضافة لهذا المفهوم الملتبس هي الحقيقة التي تقول: إن تعريف "جسيم" فيجنز لا يكون خاصاً بالجسيمات على الإطلاق.

لقد ساعدت ورقة فيجنز لعام ١٩٣٩ في كشف عظيم القيمة للمحاولات الأخيرة لإيجاد نظرية مجال كمي نسبي مقبولة للجسيمات الأولية، وعلى وجه الخصوص كانت عاملاً مؤثراً على هايزنبرج عندما حاول تكوين نظرية مجال موحد يبني على التماثلية، فقد أوصل مفهوم الجسيم الأولي المميز بقيم معينة للخصائص الكمية مع طريقة فيجنز لتصنيف حلول معادلات المجال النسبي بدلالة الكتلة واللف والندية، وقد اعتبر هايزنبرج الجسيمات الأولية تمثيلاً لعدم تغيير لنظريته (نظرية المجال):

يعرف قانون الطبيعة للتماثل الأساسي المعين العملي P مثل الانتقالات في الفضاء أو الزمن، فإنها تعين بهذه الطريقة الإطار الذي يمكن أن تحدث فيها جميع الأحداث للجسيمات الأولى المقابلة لأبسط تمثيل لهذه التماثلات (في فهم نظرية المجموعات الرياضية)^(١).

وأيضاً ترجمتي، Heisenberg 1971,879 (1).

حتى في 1975، ظل هايزنبرج يريد وضع المقياس غير المتغير للتشتت غير المرئي العميق للبيتون- مع النيوكليون (انظر في هذا المضمرة الفقرة ٤-٣-٢)، انظر 1976

Heisenberg

تتفق هذه الخصائص مع الافتراض بأن الجسيمات الأولية تكون مرجعية لنظريات المجال الكمي، كل تمثيل لمجموعة متماثلة يتميز بمعادلة مجال نوعي لنظرية المجال الكمي. إن التمثيل المختلف المقابل للمستويات المختلفة للمجال الكمي يوصف بالمعادلة، التمثيل المتعذر تبسيطه المقابل لأنماط أساس المجال أي المقابل للجسيمات التي تعتبر أولية.

وأخيراً أوصل بعض المؤلفين المفهوم الجسيمي بتقسيم فيجنز للتمثيل غير المبسط لمجموعة بوانكاريه، ولكن دون عمل أي فرق بين التمثيل الرياضي لمجموعة التماثل والجسيمات الفيزيائية، على سبيل المثال، أعطى فون فايشكار الشرح غير المتقن التالي للعلاقة بين التماثل والجسيمات الأولية:

لقد حاولت فيزياء الجسيمات الأولية السارية أن تقر نظام الجسيمات الأولية عن طريق مجموعات التماثل [...] إن وجود الجسيمات يكون متتابعاً لحظياً للنظرية النسبية الخاصة؛ وهي التمثيل غير المبسط لمجموعة بوانكاريه⁽¹⁾.

لقد اعتنت ورقة فيجنز الأصلية بالمسألة الرياضية لنظرية المجموعات؛ حيث ذكرت التطبيقات الفيزيائية هذه المسألة، واعتنت هذه الورقة بمستويات ميكانيكا الكم والمجال وبالأحرى الجسيمات، وأن لفظ

(1) Von Weizsaker 1985,37-38,

وقد أشار هايزنبرج وفون فايز سيكر إلى الجسيمات الأولية بوصفها مقابلة للتمثيلات غير القابلة للاختزال لمجموعات التماثل المتتالية. وقد أخذ بهذه النقطة مرة أخرى في الفصل التالي عندما تناقش أجزاء المادة.

"جسيم لم يكن من مفرداتها، يجب أن يقال: إن تعريف فيجنز لمفهوم الجسيم يرجع بالأحرى لمن تبع فيجنز أكثر من مرة، وأنه حقاً يعتبر تعريفاً مطلقاً (ضمنياً) لمفهوم الجسيم (في فهم هيلبرت بطريقته البديهية) وطبقاً لها، فإن الجسيم الذي له كتلة ولف وندية هو نموذج فيزيائي لنظرية المجموعة الرياضية، إن المرجع التاريخي التالي لمفهوم فيجنز للجسيم لعام ١٩٣٩ هو بالتالي قائمة تفسيرية لمصطلحات الفيزيائيين بأشكالها التاريخية:

لقد فاق نجاح فيجنز في عام ١٩٣٩ في عمل التعريف: الجسيم الأولي هو التمثيل الناتئ المتعذر تبسيطه لمجموعة بوانكاريه، P ، ذات الكتلة $0 \leq$ والطاقة $0 \leq$ واللف المغزلي $s \in \{.1/2, 1, \dots\}$ وهو لم يقل مجرداً بأن الجسيم يوصف جيداً عن طريق مثل التمثيل: بترك كلمة جسيم هذه غير معرفة، وهكذا يكون الجسيم عبارة عن زوج $(H, U_{(m,s)})$ حيث H هي فضاء هيلبرت، U هي وحدة الفعل المستمر لمجموعة بوانكاريه P على H الخاضعة لـ $U(a, A)U(b, M) = \omega U(a + Ab, AM)$ حيث $a, b \in R^4$ تكون متجهات زمانية مكانية وتكون A, M هما محددات لورنتز وأن (m, s) هما الكتلة واللف (المغزلي)^(١).

وهنا يعرف الجسيم المعطى ذو الكتلة m واللف s بدلالة التركيب البديهي؛ أي أن البناء الرياضي ينبنى على الحقائق البديهية للتحليل الدالي ونظرية المجموعات، وتتكون البنية من الفضاء الدالي المسمى بفضاء هيلبرت ومجموعة لورنتز غير المتغيرة المرسوم خرائطها على هذا الفراغ (الفضاء)، وهذا يؤدي إلى المعنى العام الكامل للفظ "جسيم وأنه يمتد إلى

(1) Streater 1988, 144.

تعميم الشحنات q_i للتماثل الديناميكي أو الداخلي لنظريات القياس غير المتغيرة مثل $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ تماثل النموذج القياسي الساري في فيزياء الجسيمات، إضافة إلى جعلها تتحرر إلى مفهوم تكسير التماثلية المتصلة التي توجد في النموذج القياسي، محدثة الكتل الليبتونية، وحيث إن التماثل لا يثبت الشكل المحدد لدوال هيلبرت الفراغية، فإن المفهوم يكون مفتوحاً لتطوير النظريات المستقبلية في فيزياء الجسيمات، وطبقاً لهذا، على سبيل المثال الأوتار لنظريات الأوتار الفائقة السارية (والتي بالأحرى يتصور أنها امتداد للأشياء شبه النقطية) هي جسيمات أيضاً. ونقرأ تعريفات الجسيم الناتج بعمومها كالتالي:

(GT) الجسيمات (الأولية) طبقاً لنظرية المجموعات.

(MESPQ) هي تجميعه الكتلة m والطاقة E واللف s والنديّة P والشحنات q_i .

(REPR) هي الخاصة بالتمثيل المتعذر تبسيطه للمجموعات المتماثلة.

(INDEP) غير المعتمدة بعضها على بعض.

(FIELD) هو الموضوع المرتبط ببعض معادلات المجال.

(CONS) هو الشيء المرتبط بقانون الحفظ (البقاء).

يعبر (MESPQ) عن الخصائص الديناميكية لمفهوم الجسيم العامل (OP) ومفهوم كمات المجال (FQ) بدلالة مجموعات التماثل، وأن الكتلة واللف والنديّة وبعض الشحنات العامة تقسم حلول معادلات المجال للتماثلات الزمانية المكانية والديناميكية (أو الداخلية). وارتباط هذه التماثلات يقترّب من

قوانين الحفظ (CONS) للحركة والخصائص الديناميكية للجسيمات والمجالات، إن الخصائص الموضعية الكلاسيكية (LOCAL) وما نتج منها (LOCPD) و (DISC) لكل من (QM)، (OP)، (LQ) و (FQ) قد تم تخطيها. طبقاً لتعريف فيجنز فإن الجسيمات لا تطول موضعيتها فلا يجب أن تكون موضعية أو غير متصلة. فقط يكون لنظرية المجموعات (GT) ملمحاً متسقاً مع المفاهيم الجسيمية في الفصول السابقة؛ وهو أن تكون الجسيمات مبدئياً غير متفاعلة، فيتصور أن تكون غير معتمدة نسبة إلى ما حول عالمها مثل المواد الميتافيزيقية المعتادة، ولكن هنا لا تستطيع (INDEP) أن تعني عدم الاعتماد الإحصائي، فهذه الخاصية لا يمكن أن تصنع أي فهم لجعل التفاعل حرراً أو غير متشابك^(١). بهذا السبيل فإن (INDEP) تصبح مقيدة لمعادلات المجال (FIELD) وتكون الجسيمات موضوعاً لمعادلات المجال غير المتشابك، وهذا أيضاً حقيقي للموجات الكهرومغناطيسية الحرة بوضوح، وبهذا السبيل تم إهمال الفرق بين الجسيمات والمجالات.

طبقاً لنظرية المجموعات فإن السمة المميزة الوحيدة للجسيمات هي (REPR)، أنها تتوافق مع بعض التمثيل المتعذر تبسيطه أو القابل للاختزال لتماثلات بعض معادلات المجال المتعلقة بقوانين حركتها وكمياتها الديناميكية، وقد يسأل البعض عن ما إذا كان مثل هذا المفهوم المجرد للجسيم يكون عقلياً أيضاً، وأن هذه حقيقة غير متصلة مباشرة بالظواهر التجريبية،

(١) هذا هو الافتراض الديناميكي المتقدم للإحصائية غير المعتمدة، وقد أخذ مرة أخرى بمسألة الاستعمال المتعدد للحد غير المعتمد في الفصل السادس (الفقرة ٦-٦) والفصل الثامن (الفقرة ٨-٥).

وأنه يعرف أنواع الجسيم الذي له كتلة ولف وندية وبعض الشحنات العمومية ولكنها لا تجلبهم إلى حصرهم فرادى جسيمياً أو تكون أحداثاً موضعية في تجارب فيزياء الجسيمات، وتكون مكوناتها العاملة عند مستوى النوع وبالأحرى المستوى الرمزي، وأنها تقابل أنواع الحصر الجسيمي المنفرد والمسارات وأحداث التشتت، وهذا يتوافق مع التفسير الموحد لنظرية الكم ولكن أكثر تجريداً من نظرية القياس شبه الكلاسيكي لفيزياء الجسيمات، في الحقيقة فإن (GT) هي مفهوم نظري خلفي ويخدم في تقسيم أنواع النظريات الممكنة للظواهر وبالأحرى الظواهر نفسها⁽¹⁾.

٦-٤-٣ الجسيمات الافتراضية

إن المفهوم الجسيمي حتى الآن يناقش في سياق المجالات الكمية غير المتفاعلة فقط، وبوجود تفاعلات المجالات الكمية ظهر العديد من المسائل المتصورة الجديدة في الساحة؛ من بينها التمييز بين كمات المجال "الحقيقية" و"الافتراضية" ومسألة إعادة التطبيع، وسوف تذكر هذه الأخيرة فقط في نهاية هذا الفصل بينما سنعتني الآن بما يشكل ببعض من التفصيل.

(١) انظر: Wigner 1964, Falkenburg 1988,

في الخاصة البعد-نظرية للتماثلات، في تعريفات الجسيم المتتالية تم طمس الندية لسببين اثنين الأول نظري، ويعود لكسر حفظ الندية في التفاعلات الضمنية، والسبب الثاني عملي، حتى لو أن الندية تكون خاصية جسيمية ذاتية ولا يمكن قياسها للجسيمات المفردة، ولكن فقط عند المستوى الموحد؛ أي من عدم التماثلات في التوزيع المكاني للعد الجسيمي المتعدد.

بشكل واضح فإن مفهوم المجالات الكمية غير المتفاعلة ليس حقيقياً في واقعيتها، والأساس التجريبي لفيزياء الجسيمات يتكون فقط من الظواهر المشاهدة للتفاعلات دون الذرية المسماة بالقياسات الموضوعية والمسارات الجسيمية وأحداث التثنت ومساحات المقطع الكلية والجزئية والرنيويات والأحداث المتشعبة النفائنة وهلم جرأً. ومتى وجدت هذه الظواهر مشروحة وجدت معها نظرية الكم للتثنت، وتقابل نظرية المجال الكمي الظواهر الموجودة في تجارب الحصول على مساحات مقاطع التثنت عند الطاقات العالية، ولكن أيضاً تم حساب التنبؤات الدقيقة للديناميكا الكهربية عند الطاقة المنخفضة؛ مثل إزاحة لامب والمعامل الجيرومغناطيسي للإلكترون باستخدام نظرية الكم للتثنت، وحقيقة أن نظرية المجال الكمي للتفاعلات هي نظرية تثنت وكميتها الرئيسية هي المصفوفة S - التي تحتوى على الاحتمالات الانتقالية لعمليات التثنت وحساباتها معقدة، ويتم حسابها باستخدام نظرية الاضطراب غير المعتمدة على الزمن، وهنا يأتي الدور الذي تلعبه الجسيمات الافتراضية وقد سميت "افتراضية" على التضاد مع "حقيقى" للجسيمات القادمة والخارجة أو مستويات المجال. وذلك في فهم ما لم يكن حقيقياً، وترتبط ناقلاؤها بالتمدد الاضطرابي للمصفوفة S .

تبدأ الحسابات من اصطلاح التفاعل $\gamma(x)$ لكثافة لاجرانج للمجالات المترابطة (المقرونة ببعضها) مثل مترابطة ديراك ومجالات ماكسويل⁽¹⁾. الرتبة السفلى لنظرية الاضطراب هي مقاربة بورن، وأنها تنبني على

(1) يتبنى الترابط على فكرة عدم التغير المقياسى التى لا يمكن شرحها هنا، وتم تحليل هذا المفهوم فى 2004 Lyre.

الافتراض بأن الجسيمات القادمة والخارجة على الترتيب تقابل مستويات المجال الكمي الابتدائي والنهائي،

$$(6.9a) \quad |i\rangle = \lim_{t \rightarrow -\infty} |t\rangle,$$

$$(6.9b) \quad |f\rangle = \lim_{t \rightarrow +\infty} |t\rangle,$$

وهي متماثلة مع المجالات الكمية غير المتفاعلة، وفي مقاربة بورن تعطي تفاعلة لاجرانج عن طريق الاصطلاح التالي الذي يقابل الرتبة السفلى لأشكال فايمان:

$$(6.10) \quad \langle f | S | i \rangle_{Born} = \delta_{fi} - i \int dt \langle f | d^3x L'(X,t) | i \rangle.$$

وتكون عناصر المصفوفة S هي ساعات التشتت الخاصة بعمليات التشتت الكمية، وتتعلق ساعة التشتت بالمقطع المستعرض لتفاعل الجسيم كما يلي:

$$(6.11) \quad \left(\frac{d\sigma}{d(q^2)dE} \right)_{QFT} : f(p_1^i, \dots, p_n^i; p_1^f, \dots, p_m^f) | \langle f | S | i \rangle |^2.$$

وقد توافقت القيمتان عاليًا بعامل الفيض الذي لم يعط هنا، ويعتمد عامل الحركة f على كميات الحركة $p_1^f \dots p_m^f \dots p_n^i \dots p_1^i$ للجسيمات n الداخلة والجسيمات m الخارجة للجسيمات المنفردة المتفاعلة، وترصد أو تعد الجسيمات القادمة والخارجة أو مستويات مجال الكم كشيء حقيقي. وهذا يعني أنهم يحملون معنى عاملاً، وهم يقابلون مستويات الكم التي يتم تحضيرها وقياسها في تجارب التشتت. (على الأقل تفعل لجميع الأغراض العملية).

عملية التشتت نفسها هي صندوق أسود. إن شعاع الجسيمات القادم (الساقط) يتم تحضيره في مستوى كمي معرف جداً، ويتم قياس المسارات

وما يقابلها من مستويات كم للجسيمات الخارجة ودون ملاحظة ما يحدث بالداخل، ورياضياً يوصف التشتت في الرتب السفلى لنظرية الاضطراب: في تقريب بورن ممكن أن يكون رتبة ثانية وفي ظروف نادرة يكون لبعض رتب أعلى، ويعاد تركيب التمدد الاضطرابي ما يذهب إلى داخل الصندوق الأسود بدلالة ما يسمى عمليات افتراضية، وأنها تصف انبعاث وامتصاص كمات المجال الافتراضي، وناقلات كمات المجال الافتراضي هي المركبات الرياضية للتراكب النظري الكمي، وبجاهزيتها للعمل فإنها لا تعني إمكانية إعادة فكها إلى جسيم مفرد مساهم، إنها لا شيء ولكن المساهمة الرياضية للخطوة التقريبية هي مثل الانسياق الهارموني للذبذبات الميكانيكية للوتر ومركبات فورير للمجال الكهرومغناطيس الكلاسيكي أو الدورات وفلك الدوران بنظام بطليموس الكوكبي وشكلياً فإنها النظير الكمي للخطوط المستقيمة في النموذج الكلاسيكي للحيود معه جبهات الموجة للموجات الكرية المتقدمة، وتتقدم جبهات الموجة الكلاسيكية طبقاً لقوانين الضوء الهندسي وعند إزاحة معينة تجمع السعات المتقدمة في تداخل بناء أو هدم إلى شدة أهداف التداخل الملاحظة.

عمل فايغان نموذجاً لتفاعل المجالات الكمية بروح المثال الأخير عن ماذا يحدث داخل الصندوق الأسود لتشتت مجالات الكم المعاد بناؤها بدلالة النواقل، ورياضياً فإن هذه النواقل هي دوال جرين والتي يجرى تكاملها وجميعها قبل حساب الاحتمالية من ساعات التشتت وتصف النواقل تقدم كمات المجال الافتراضي، وأنها تقابل تقدم جبهات الموجة في النظير الكلاسيكي (أو ساعات المجال غير الكمومي) ومرة أخرى يكون تكميم المجال الكلاسيكي

نظيرًا للتكميم الثاني للدوال الموجية لميكانيكا الكم، ومن ثم تحدث النواقل التي تسهم في تفاعل المجال الكمي بعمل صورة كمية للمسار التكاملي المتكون لميكانيكا الكم العادية نحو ذلك يكون جيدًا، فحتى هذه النقطة لا توجد أغاز ولم تظهر مفاهيم مرتبكة، ويعبر عن تأثير مجالات الكم التشتتية بدلالة كمومية المسار التكاملي المتكون لميكانيكا الكم العادية وأن حساب مصفوفة S- تكون طويلة ومملة⁽¹⁾ وتكون في تجميع الساعات للعديد من العمليات الممكنة لانبعاث وامتصاص كمات المجال الافتراضي، ولعمل ذلك فإنه يكون أكثر ملاءمة للتعبير عن معاملات المجال بالتمثيل بكمية الحركة مفصلاً ذلك على محاور الزمكان، (ويستخدم نقل فورير البسيط في التغيير من محاور الزمكان للتمثيل بكمية الحركة؛ ومع هذا يكون ذلك شبيه التحول من النظام البطلمي إلى النظرة الشاملة لكوبرنيكوس لتصبح الأشياء أكثر بساطة من وجهة النظر الأكثر تجريدًا).

ولم يفسح تمثيل كمية الحركة لمجالات الكم وتشتتها مجالاً طويلاً لأي فكرة زمانية - مكانية لما يحدث أثناء تشتت مجالات الكم، وتبقى فقط الفكرة المجردة لاحتمال انبعاث وامتصاص كمات المجال المصاحبة لانتقال معين لكمية حركة - طاقة، وتكون الخطوة الثانية في تبسيط الحساب عن طريق نقل التجميع للناقلات المختلفة إلى لغة شكلية من أشكال فايمان وكل واحد من الناقلات بالمجموعة في سعة التشتت والتي تقابل رياضياً خط فايمان ويرمز

(1) لكي تصف الحالات (المستويات) الفيزيائية فإنها تحتوي على حيل رياضية؛ مثل

الرتب العمودية والرتب الزمنية لعامل الضرب، انظر مثال:

Nachtmann1990,108-110, Itzykson and zuber, 1985,110-111and123.

كل شكل من أشكال فايمان إلى عملية افتراضية مساهمة في سعة التشتت، ومن ثم توجد قواعد معرفة تمامًا للأشكال المقابلة بين الصور الرياضية للتمدد الاضطرابي والتوضيح التمثيلي لانبعاثاتها وامتصاص كمات المجال الافتراضي ولم يوجد تفصيل أكثر لأشكال فايمان.

إن الناقلات داخل الصندوق الأسود تسهم فقط في تمدد اضطراب تفاعل المجالات الكمية، ولنتحدث عنها بدلالة الجسيمات الافتراضية يكون مجرد حديث عارض وقد استخدمت بعض هذه الاصطلاحات في كتب نظرية المجال الكمي بينما تجنبنا كتب أخرى⁽¹⁾، وقد وصف فايمان بنفسه العمليات الافتراضية وكمات المجال الافتراضي والفوتونات الافتراضية وهكذا في أوراقه ومحاضراته⁽²⁾ ولكنه تحدث عن الجسيمات الافتراضية في ندواته العامة وكتبه⁽³⁾ وبالتالي - ما الخصائص الجسيمية لهذه الجسيمات الافتراضية التي تجعلها لا تزال حاضرة؟

(1) ضم (Nachtmann1990) كلا الوضعين، فمن وجهة النظر الأولى، أكد أنه في حدود معين لما يسمى علاقة عدم التحديد بين الطاقة والزمن فإن الإلكترونات المشحونة غير المتفاعلة قد تنبعث ويعاد امتصاص الفوتونات الافتراضية (Nachtmann1990.99) ومن الوجهة الأخرى فقد استنتج أن الدور المتفرد لسعة التشتت (العمليات الأولية) تكون افتراضية؛ الاحتياط في الأمر، مع هذا لا نسأل متى، أو كيف تحدث عدة عمليات أولية في تجربة خاصة، وهذا يكون سؤالاً لا معنى له تمامًا؛ حيث إن يكون التفاعل وتحوله لعمليات أولية يكون مساعدة نظرية تامة لسحاب ساعات الانتقال. Nachtmann1990,126.

(2) Feynman1949a,b,196.

(3) Feynman1985,1987,10.

ويجب تمييز ذلك كالتالي:

الجسيمات الافتراضية (VP) هي:

(MESQ) مجموعة من m والطاقة E ، واللف المغزلي s والشحنات

• q_i

(DISC) عدم اتصالية؛ أي أنهم يأتون في كمات.

(ERT) جزء من تمدد الاضطراب لمصفوفة S-

(WAVE) في مستويات متراكبة ومتداخلة.

(PATH) يتقدم في مسارات طولية والتي تتجمع طبقاً لتكون المسار

التكاملي لميكانيكا الكم.

(NIND) ليست غير معتمدة؛ أي أنها مختصة بالتفاعلات.

(NCON) مسموح بانتهاك حفظ الطاقة؛ أي أنها قد تتجنب الغلاف

الكتلي أثناء فترة التفاعل طبقاً لما تسمى علاقة عدم التحديد

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

لنتحدث عن الجسيمات الافتراضية في فهم (VP) بوضوح نجد أنها

تنشأ من التعامل مع كمات المجال ونسميها جسيمات في المفهوم الجسيمي

نفسه (FQ)، ولكن في وضع المتعارض لجميع المفاهيم الجسيمة المذكورة

من قبل فإن الجسيمات الافتراضية تكون غير مفهومة بشكل

غير مستقل.

وأنها أساسًا ترتبط بالتفاعلات ومن ثم فإنها ليست مرتكزة ولا مستقلة (غير معتمدة) ولا منفصلة ولا معتمدة على استخدام قانون حفظ الطاقة⁽¹⁾، على وجه الخصوص فإن خاصة شبه الجسيم النظرية (PATH) لا يجب أن ترتكز بمسارات الجسيمات الكلاسيكية (TRAJ) على الإطلاق ويقف السابق على ما به من شكل خاضعًا للتجميع الذي يجرى لما لا نهاية من الاحتماليات، ويعتمد كل من (PATH) و (WAVE) على ما يكافئ الوضع أو الشكل الأرضي ولجميع هذه الأسباب فإن مفهوم الجسيم الافتراضي بما في خاصته لا يحمل أي معنى جاهز للعمل به، وبالتالي فإن هذا التحدث العارض يثير المفهوم المرتكز كلما لمح أو ظهر للجسيمات الافتراضية أي على تساوي مع كمات المجال الحقيقية أو الجسيمات الفيزيائية الداخلة والخارجة لتجارب التشتت، تحدث الجسيمات الافتراضية فقط في إسهامات مركبة للتمدد الاضطرابي وتسمى جسيمات في حالة فهم كمات المجال التي تتولد وتتلاشي أثناء عملية التفاعل ولكنها تسمى افتراضية في فهم غير جاهز المعنى، إن مفهوم الجسيم الافتراضي يعترف فقط بإفساح المجال لتحليل التجريبيين بأن كمات المجال الافتراضي لا شيء، ولكنها وسيلة أساسية في حسابات التفاعلات لمجالات الكم.

(1) يجب ملاحظة أن هذه النصوص التي تدور حول الجسيمات الافتراضية التي تقابل الخطوط الداخلية لأشكال فايمان هي ليست تدور حول العمليات الافتراضية التي تقابل ذروة أشكال فايمان فالأخيرة تؤخذ بطرق مختلفة، بالإضافة إلى أنه أصبح حاسمًا أن الجسيمات الافتراضية قد لا تكون لها كتلة مدارية لزمن قدرة $\Delta t = \hbar/2\Delta E$ ، وأنى قد أملت خلال عرضي في هذا الكتاب خاصة مهمة أخرى هي فترة الحياة للجسيمات، وقد أخذت في الحسبان على سبيل المثال في تعريف الجسيم المعروف في (Bogoliubov and shirko v 1959,5)، ومع هذا فإنها خاصة احتمالية.

ومع هذا فإن هذا لا يعني شيئاً وأن التمدد الاضطرابي للمصفوفة بدلالة الجسيمات الافتراضية يكون افتراضياً تماماً (أو خيالياً) وتوصف العمليات الافتراضية بدلالة انبعاث وامتصاص الجسيمات الافتراضية المساهمة في سعة التشتت أو الاحتمالية الانتقالية، ومن ثم قد يعتبر جميع عدة لا نهائيات من الجسيمات الافتراضية سبباً في التأثير التجمعي الحقيقي، وبهذا الحس يكون لها معنى جاهز للعمل به بوضوح وما يقاس هو عنصر المصفوفة أو الاحتمالية الانتقالية بين جسيمات حقيقية داخله وخارجه وتتسأ الاحتمالية الانتقالية من جميع كمات المجال الافتراضي الموجودة في الرتب الأكثر انخفاضاً وارتفاعاً للمترابكات المناسبة أو وثيقة الصلة بأشكال فايمان.

في ميدان الطاقة المنخفضة يمكن في بعض الأحيان لشكل فايمان إسهام فردي واحد للتمدد الاضطرابي، حتى إنه توجد عدة قياسات دقيقة معروفة جيداً والتي تؤسس شكل فايمان واحد أو ما يقابلها من ناقل لجسيم افتراضي، وهذا يتم تطبيقه بصفة خاصة عن طريق اختبارات عالية الدقة للكهربية الديناميكية الكمية وقياس إزاحة $(g-2)/2$ للهيدروجين والقيمة g لقياس عامل الجيرومغناطيسية g للإلكترون أو الميون، نظرية ديراك وحدها لم تصح تنبؤات التركيب الدقيق الخاص بطيف الهيدروجين (لم تتشقق المستويات $S_{1/2}$ ، $P_{1/2}$ للرقم الكمي الرئيسي $n=2$) ولعامل الجيرومغناطيسي g تظهر قياسات إزاحة لامب للتركيب الدقيق للهيدروجين والعزم المغناطيس الشاذ للإلكترون.

الفرق الشاذ $(g-2)/2$ بين تنبؤ نظرية ديراك والعزم المغناطيسي الفعلي قد تم قياسه بدقة عالية من السبق اللفي للجسيم المشحون في المجال المغناطيسي المتجانس، وينشأ التصحيح للرتبة التالية للديناميكا الكهربائية الكمية من شكل فايمان المفرد والذي يصف تفاعل الإلكترون الذاتي، وهنا تتوافق النظرية مع التجربة عند مستوى ١ إلى 10^8 بفارق دقيق بين النظرية والتجربة في الرتبة الثامنة^(١)، وفي مثل هذه الحالة فإن التجارب تكون قادرة (لجميع الأغراض العملية) على إيجاد تأثير حقيقي مفرد لشكل فايمان الفردي (أو مجال كمي افتراضي) وحالة إزاحة لامب تكون مماثلة، وهنا تعطي الرتبة التالية لنظرية الاضطراب تصحيحاً مبنياً على شكلين لفايمان يسميان استقطاباً تفرغياً وتفاعلاً ذاتياً للإلكترون ويوضح التصحيح أن ٩٧% فقط من إزاحة لامب المشاهد يمكن أن يشرح دون مصطلح استقطاب تفرغي وتخبرنا كتب الفيزياء الجسيمية التجريبية أن قيمة ٣% المفقودة هي تطبيق للوجود الفعلي للمصطلح (استقطاب تفرغي)^(٢)، ووجب على أي فلسفي أن يحصي بأن هذه حالة غير حقيقية، ولا تستطيع كمات المجال الافتراضي الموجودة في هذا الطرف أو المصطلح أن تخرج مفردة بدقة.

من ثم فقد بقيت الاستنتاجات السابقة بأن الجسيمات الافتراضية تكون وسائل أساسية للتمدد الاضطرابي لنظرية المجال الكمي، وأنها لا توجد بخاصتها، على أي حال فإنها لا تكون خيالية أو صورية ولكن تحدث

(١) لقد أخذ (Lohrmann 1992,109) لوهرمان عدة رتب عالية في حساب هذه العملية التي لم تتغير؛ انظر Perkins 2000,41-42.
(٢) Lohrmann 1992,108-109 وترجماتي.

تأثيرات تجمعية يمكن أن تحسب وتقاس بدقة عالية، وتكون مثل هذه التأثيرات التجمعية لإزاحة لامب في طيف الهيدروجين أو العزم المغناطيسي الشاذ للإلكترون، ويكون تأثير تجمعي آخر للجسيمات الافتراضية هو الكتلة والشحنة المعاد عياريتها للرتب العالية الناتجة لنظرية الاضطراب، وقد نتجت طريقة إعادة العيارية فيما يسمى الجسيمات "الفيزيائية"؛ أي المجموعة في وحدات الكتلة والشحنة التي تختلف عن الكتلة والشحنة الفعليين، ويرجع هذا التأثير التجمعي للاستقطاب التفرغي، لقد جسد ذلك بسحابة من الجسيمات الافتراضية، وبهذا المنطق للحديث العارض تهمل حقيقة أن هذا المغطى يحدث فقط في التفاعلات ودائمًا ترتبط الجسيمات الافتراضية بمثل هذه التأثيرات التجمعية، وفي هذه النقطة فإنها تشبه مكونات فورير للإشعاع الكهرومغناطيسي أو فلك دورات النظام الكوكبي لبطليموس، ومع هذا ففي عدة توجهات تعتبر أشبه بأشباه الجسيمات في فيزياء المادة المكثفة.

٦-٤-٤ أشباه الجسيمات

إن أشباه الجسيمات في فيزياء المادة المكثفة هي إثارات لنظام جسيמי متعدد شامل (ماكروسكوبي) فمثل الجسيمات الافتراضية لا تأتي بخاصتها، ولكن تكون مرتبطة بتأثيرات متجمعة أو جمعية، ومع هذا تأخذ العلاقة هنا بين السبب والتأثير سبيل دورة أخرى، فالجسيمات الافتراضية ليس لها تأثيرات منفصلة وتراكم العديد منهم يولد تأثيرًا جمعيًا يسمى إسهام سعة التشتت حتى الرتبة n . ومع هذا، فأشباه الجسيمات هي التأثيرات الجمعية لجميع الشحنات والأنوية داخل الشبكة الذرية (الماكروسكوبية) مثلما في

البلورة، وتحت شبه ظروف شرطية معينة فإنها تكون منفصلة ومتمركزة، وتكون أشباه الجسيمات كمات طاقة مشحونة أو غير مشحونة والتي تتقدم خلال المادة الصلدة وتتفاعل مع بعضها كما لو أنها جسيمات منفردة، في حين يحتاج إلى تأهيل واضح، وأنهم نتاج من الإثارة التجمعية للعديد من المكونات دون الذرية للمادة الجامدة؛ حيث تتجمع عدة معان للرتبة العددية لـ 6×10^{23} إلكترونًا ونواة ذرية^(١).

إن النظرية الأساسية هي الميكانيكا الكمية لنظام عديد الجسيمات، وأن مكونات المادة الصلدة هي الإلكترونات والأنوية الذرية، وهي الجسيمات في فهم المفهوم الميكانيكي الميكانيكي الكمي الجسيمي (QM) وأنه ليس واضحًا كيف تكون الخواص الظاهرية للأنواع المختلفة للمادة الصلدة مستنتجة من هذه النظرية، لقد صنعت المواد الصلدة في المعادن والأنواع المتنوعة لبلورات بتميزها بدلالة الرابطة الكيميائية من أحد الوجوه والموصلات وأشباه الموصلات والعوازل من الوجه الآخر، يمكن وصف عدة صفات أو سمات لسلوك الموصلات وأشباه الموصلات والعوازل بواسطة طرق تقريبية من وسائل ميكانيكية كمية جيدة، وأن أبسط الخطوات التقريبية هي نظرية هارترلي - فوك والتي تسمى أيضًا المجال الذاتي - الثابت أو المجال - المتوسط التقريبي، وكان هدفها عند وصف سلوك أحد الإلكترونات في المجال المتولد بواسطة جميع الشحنات الأخرى لمكونات المادة الصلدة، وهذا يحدث النطاق البنائي للمادة الصلدة المعروفة جيدًا (والتي يمثلها مثال نموذج التراتزستور)، وهنا يفترض أن الإلكترون الحر يتحرك باستقلال في مجال

(١) بالنسبة إلى ما يلي انظر Anderson 1997.

جميع الإلكترونات والأنوية الأخرى للمادة الصلدة، وينبني هذا التقريب على التأثيرات الجمعية التي تحدث ظهور أنواع الإثارات المسماة بأشباه الجسيمات، وعمومًا فمثل هذه التأثيرات لها من الكبر بحيث لا يمكن أن تعامل كالأضطرابات، ومن ثم فإن هارترى - فوك هاميلتونيان لا تحدث في العادة وصفًا صحيحًا للحالة الأرضية للمادة الصلدة؛ أي المستوى الكمي لأقل طاقة، وإن أفضل نتيجة تحققت في هذا السبيل هي التي تعطي أحسن تقريب مدهش لطاقة المستوى الأرضي، ومع هذا فإن أهم كمية على الإطلاق للمادة الصلدة ليست هذه الطاقة، ولكنها الفرق في الطاقة بين المستوى الأرضي والمستويات المثارة المنخفضة⁽¹⁾، فإنها تعين عدة ملامح ظاهرانية شاملة (ماكروسكوبية) للمادة الصلبة وعلى وجه الخصوص خصائصها المغناطيسية.

لكي نحسب هذا الفرق الحاسم في الطاقة نجد أن طرق نظرية المجال الكمي تساعد جدًا في ذلك، ويوجد بُعد اتصال في التناظر الصوري بين نظرية المجال الكمي ونظرية الجسيم المتعددة في فيزياء الحالة الصلبة سيبيني التناظر على الحقيقة المسماة بالتكميم الثاني (الكمومية الشكلية لدالة شروندجر الموجية للجسيم المتعدد) وتعطي الكمومية للمجال الكلاسيكي شكل النتائج نفسه. منذ أن كانت نقطة البدء هي معادلة المجال غير النسبوي كانت النتيجة هي التناظر غير النسبوي لنظرية المجال الكمي حتى في اتجاه هارترى - فوك النسبي المبسط كان مساعدًا جدًا، فقد نسمح بإنهاء التعقيدات غير المتماثلة للدوال الموجية عديدة الإلكترون في المادة الصلدة وأحلت محلها

(1) 97-99، Anderson 1997

عدد من التمثيلات لأنماط مجالية للمجال الكمي في فراغ فوك^(١)، وقد ميزت الإلكترونات عددياً فقط وخضعت لمبدأ باولي للاستبعاد، ومن ثم كان إحلالي للاستبعاد، ومن ثم كان إحلالياً المستويات الكمية لإلكترونات المادة فقط، وتبنى الصورة بالتحديد على نفس مؤثرات التخليق والفاء وقواعد التحويل كما عرفت سابقاً بالنسبة إلى كمات المجال وحيث إن الإلكترونات هي فيرميونات فيجب أخذ المحول المضاد في هذا الشأن، فيتمثل أي إلكترون بواسطة المستوى $c_k c_k^+ \psi_k$ والذي يختص برقم الإحلال 1 في فراغ فوك، وطبقاً لهذا الاتجاه فإن الإلكترونات المستقلة أو غير المتشابكة تقريباً يكون لها خواص فيرمي الغازية.

وتدخل أشباه الجسيمات حيثما يصبح تقريب هارترى - فوك صريحاً أيضاً، وهذا يرجع إلى الإثارات الجمعية للإلكترونات أو لأنوية المادة الصلدة، الإثارات الجمعية تعني بالمادة الجامدة ككل وتجميعة الإلكترونات في حدود $10^{23} \times 6$ إلكترونات ونواه ذرية؛ وهذا يعني أنها لا شيء ولكنها في مستويات كمية ماكروسكوبية للمادة الصلدة، والأكثر أهمية هي المستويات ذات الإثارة المنخفضة المذكورة سابقاً وهي تسمى الإثارات الأولية، ويمكن تعريفها في الاتجاه الأول كتناظر لكمات المجال بدلالة مؤثر التخليق والفاء q_k^+, q_k للكمات ذات كمية الحركة k .

حينئذ، فهذا تعريف مبدئي يمكن أن نتخذه للإثارة الأولية:

(١) انظر: Anderson 1997, 15-28

فكون الإثارة الأولية ذات كمية حركة k هي المؤثر الذي يخلق مستوى إثارة منخفضة لنوع خاص ذي كمية حركة k من المستوى الأرضي⁽¹⁾.

ومن الملاحظ أن أندرسون استدعى تعريفاً مبدئياً لأن مفهوم شبيه الجسيم يبني على خطوة تقريبية وفي الخطوة الثانية يؤخذ في الحسبان التفاعل بين أشباه الجسيمات⁽²⁾، فالمستويات المثارة وهي "النوع الخاص" بالنظر إلى أنواع مختلفة من الإثارة وهذه قد تكون نتيجة إضافة إلكترون بتذبذبات بطيئة لقلب النرة الأيونية للمادة الصلدة (الجامدة) ولف مغزلي متقلب وإثارات ضوئية وهكذا، وقد تختلف جوهرياً مستويات الطاقة المنخفضة الناتجة من هذه الإثارات الأولية المختلفة ويتم حسابها في نظرية الاضطراب وتكون الخطوة التقريبية واضحة في التمدد الاضطرابي لنظرية المجال الكمي فتضمنا استعمال أشكال فايمان، وحتى الرتبة الأولى فيعتبر كل منهم مستقلاً، وقد أوضحت الحسابات أن الإثارات الأولية لها خصائص جسيمية تقريبية بحس مفاهيم الكم الجسيمي بالفصول المتقدمة، على وجه خاص فإن لها (تقريباً) شحنة أو لفاً كمياً وهي عبارة عن فيرميونات أو بورزونات وأنها تعرف باستقلالية ولها بعض الكتلة الفعالة m_e ومن أجل استقلاليتها التقريبية وخصائصها الديناميكية المؤثرة فقد تم تسميتها أشباه الجسيمات.

في $p = \hbar k$ حيث يسمى المقدار k بكمية حركة أندرسون Anderson 1997,102 (1)
أجزاء أخرى من هذا الكتاب.
(2) انظر ما بعد ذلك أسفل.

الكتلة المؤثرة m_e ، لشبه الجسيم تعتمد على التفاعل وتصابه بطاقة E لشبه الجسيم معطاة بمقدار فرق الطاقة بين مستواها والمستوى الأرضي للمادة الجامدة، وأنها ترجع إلى التأثير الجمعي والواضح للكتلة المعاد عياريتها في نظرية المجال الكمي، وكما في نظرية المجال الكمي رغب الفيزيائيون في القول: إن أشباه الجسيمات "مغطاة أو ملموسة" في فيزياء الحالة الجامدة بدا هذا القول السائد له منطق أفضل؛ حيث إن الكتلة الفعالة ترجع إلى التفاعلات داخل المادة الجامدة (ومع هذا فإن هذه النقطة محل مناظرة، وطرفا التناظر هما كمات المجال للمجال الكمي وأشباه الجسيمات لفيزياء الحالة الصلبة المسبب للتناظر الشكلي بين المستوى المفرغ للمجال الكمي والمستوى الأرضي للمادة الجامدة، وبالتالي ظل الجدل حتى سلمت نظرية المجال الكمي بالتفسير الحقيقي الأقوى والذي أوصى في النهاية بما جاء في الفصل السابق).

توجد أنواع مختلفة من أشباه الجسيمات، بعضها تكون مركزية والأخرى غير ذلك، بصفة خاصة تميزت المفاهيم الثلاثة التالية لشبه الجسيم^(١):

١- حاملات الشحنة الإلكترونية الحرة: ونتجت من إضافة الإلكترون للمادة الجامدة، التي اكتسبت شحنتها ولها من الإلكترون ولكن تعتمد كتلتها الفعالة على سرعتها، ففي المعدن يختص الإلكترون المضاف في النطاق المملوء جزئياً بالإلكترونات التكافؤ التوصيلي؛ أي تتوزع كمية حركتها داخل المادة الجامدة، محمولة بالإلكترونات النطاقية

(١) انظر: Anderson 1997, 102-104

محدثة إثارة الطاقة المتلاشية، وفي أشباه الموصلات أو العوازل تتطور الدالة الموجية للإلكترون المضاف بطريقة مختلفة، وبعد زمن معين تبقى الحزمة الموجية وتتمركز الحزمة الموجية حول قيمة كمية حركة مركزية k_0 (التي تقابل طاقة الإثارة) ويكون لها عرض قدرة Δk أنها تتمركز في منطقة بحجم $(1/\Delta k)$ حول نقطة ما r_0 ، وتحمل هذه الحزمة الموجية تقريباً شحنة ولف للإلكترون، ومن ثم فإنها تتصرف مثل الفيرميون.

٢- فونونات: هي مثل كثافة موجية أخرى مثل ماجنونات أو بلازمونات وهذه تنتج من الإثارات الجمعية للأنوية، وتنتج الفونونات من الذبذبات المنخفضة للأيون المذكور سابقاً، وهي كثافة موجية موقوفة في مثل التي لا تكتسب أي خصائص ديناميكية من الجسيمات الفيزيائية، وخاصة التي لا تحمل شحنة وليس لها لف وتصبح تقريباً بوزونات، وتتصرف الفونونات مثل تناغمات الموجات الصوتية (من هنا جاء اسمها)، وفي العديد من الجوامد لا تكون مركزية أو موضعية، ومع هذا فإنها في البلورات قد تكون تقريباً موضعية عند الشوائب والعيوب.

٣- أكسيتونات. تحدث الأكسيتونات في العوازل (تسمح بانتقال الطاقة دون انتقال شحنة كهربائية) ويحدث ذلك نتيجة الإثارة الضوئية فإلكترون قلب الذرة الأيونية في البلورة مثلما في GaAs (والتي لها أهمية كبيرة في عملية الاتصالات عن بعد) يحدث له إثارة من مستوى p للأرسينيد (الزرنينخ AS) إلى مستوى s للجاليوم (GA)

بشكل عام، ويمكن للإلكترون المثار أن يتحرك في نطاق p خلال البلورة، ونتيجة التفاعل الكولومي فإنه يطرد إلكترونات s للذرات المارة، ومثل هذا الزوج من (الإلكترون-الثغرة) يكون حالة ترابط للإلكترون والثغرة محدثًا مركب شبه - جسيم لشحنة (0) صفرية ذات كتلة فعالة معينة ولها تصرف بوزوني، وقد تتمركز تحت ظروف معينة مثل الشحنات الإلكترونية الحرة والفونونات، والموجات ذات اللف (التي تحدث الحالة المغنطيسية للمادة الجامدة) وأزواج كوبر فوق التوصيلية تعتبر شبيهة للأكسيتونات.

توجد عدة أنواع أخرى لأشباه الجسيمات التي تصاحب مزيدًا من الاختلاف في المفاهيم ولا يمكن ذكرها هنا، ومع هذا فلكل ذلك خصائص شبه جسيمية تعزى إليها، فبصفة عامة فإن أشباه الجسيمات هي حالة إثارات للمادة الصلبة التي تتصرف تقريبًا؛ مثل الجسيمات حتى لو أنها ليست جسيمات، وقد يضاف مزيد من الملامح شبه الجسيمية لكمية الحركة والشحنة واللف والكتلة الفعالة التي قد تحملها، وأنها لا تتصرف فقط تقريبًا كما لو أنها غير معتمدة على ما بقي من المادة الجامدة، وأنها أيضًا تتصرف في العديد من النواحي باستقلالية تقريبًا لا تعتمد على بعضها البعض، وأنها تتراكم بالطريقة نفسها لتعطي تقريبًا إسهامات خطية للطاقة في المادة الصلبة، وأنها تتصرف بدرجة عالية مثل الفيرمونات أو البوزونات، وأنها تتفاعل كما لو كانت جسيمات، على طول المسارات للمفاهيم الجسيمة السابقة، يمكن تمييز أشباه الجسيمات كالتالي:

(QP) أشباه الجسيمات (بتقريب شديد) هي:

(ESQM) تجمعات ذات طاقة E ولف s ، وشحنة q وبعض الكتل
الفعالة m ،

(DISC) عدم الاتصالية؛ أي أنها تأتي في صورة كمات .

(PROB) تحدد بالاحتمالية عن طريق معادلة شرورنجر
أو الهاملونيات للمادة الجامدة.

(COLL) التجمعات الإثارية لطاقة الحالة الأرضية للمادة الجامدة.

(INDEP) عدم اعتماد بعضهم على بعض.

(WAVE) في المستويات تتراكب وتتداخل.

(UNKR) غير محدد في كمية الحركة k ولا في الموضع r طبقاً
لعلاقة عدم التحديد $\Delta k \Delta r \geq h/2$.

(COMM) قواعد التحويل المعينة لموضوع ما؛ أي محاولات
للبوزونات وأضدادها للفيرميونات (مواصفات تحويل
للمؤثرات المناظرة للمتغيرات).

(NDIST) مميزات عددية فقط، التي تحدث إحصائيات فيرمي أو
إحصائيات يوز (معتمدة على اللف).

(CONS) خاضعة لقوانين الحفظ.

هذه القائمة تربط خصائص المفاهيم الجسيمية (QM) و (FQ).
تتصرف أشباه الجسيمات مثل جسيمات الميكانيكية الكمية أو كمات المجال

غير النسبوي وبعض هؤلاء له شحنة إلكترونية ولف البعض الآخر له شحنة ولف صفري والبعض يكون أنظمة مربوطة بالإثارات، وقد يحدث للعديد من أشباه الجسيمات تمركزاً في مستويات تتطابق مع علاقة هايزنبرج لعدم التحديد : (UNKR) وهي تتناظر تمامًا مع (UNPQ) لميكانيكا الكم (QM) واضحة حدوداً لمقدار عرض كمية الحركة k ومنطقة الموضع Δr والتي يوجد فيها أشباه الجسيمات حتى يتم قياسها موضعياً، ومن ثم ففي نواح عديدة يكونون شبيهي الجسيمات، إن كلمة شبيهه (quasi) يرجع تسميتها بوضوح للخاصية (COLL) وتكون أشباه الجسيمات عبارة عن أشياء موجودة مزيفة، وتشبه التي تأتي بوصفها ولكنها حقيقية غير موجودة⁽¹⁾، وأنها تنشأ من الإثارات المجمعة وهذا يحدث الكتلة الفعالة والتي تكون غير ثابتة (غير معتمدة على التفاعلات الداخلية للمادة الجامدة كما في مثل المجالات الخارجية) وتتبع حقيقة أن الخصائص الكمية الجسيمية (INDED)، (COMM) و(NDIST) هي فقط المحققة تقريباً.

حيث إن أشباه الجسيمات فقط تتصرف بشكل تقريبي في هذا الطريق، وتؤخذ تفاعلاتها في الحسبان في الخطوة الثانية وأنها تحدث التشتت وتأثيرات الاستقطاب، فعلى سبيل المثال قد يفقد شبه الجسيم المشحون مقداراً كميًا k من كمية حركته للتذبذبات المركزية أو العكس بالعكس وتكون مثل

(1) في الواقع، للأسباب نفسها يسمون أشباه الجسيمات كمسارات الجسيم في نموذج موت لعام 1929 (Motts model) قد يسمى شبه-كلاسيكي، وطبقاً لنموذج موت فإن الجسيمات الكمية في مفهوم (QM) (ميكانيكا الكم) تسبب تتابع القياسات الموضوعية التي تشبه المسارات الكلاسيكية المحددة تماماً حتى لو لم يكونوا.

هذه الطاقة مماثلة لانبعثات الفونون أو امتصاصه، ويمكن وصفه بدلالة المؤثرات المقابلة للتخليق أو الإفناء q_k^+, q_k^- ، وتوجد عدة تفاعلات ممكنة لهذا النوع وقد أعيد حسابها بوسائل نظرية التشتت لميكانيكا الكم، وقد أحدثت سلسلة من الاضطرابات والتي تناظرت حقيقة في نواحي حساب عناصر المصفوفة S- لتفاعلات المجالات الكمية، وعلى وجه الخصوص النواقل ودوال جرين وأشكال فايمان للعديد من عمليات التشتت الممكنة الموجودة وأنها تتراكم مثل العمليات الافتراضية أو أشكال فايمان لنظرية المجال الكمي، وكما في نظرية المجال الكمي فإن هذه التفاعلات أيضاً تحتوي إسهامات من التخليق والإفناء لشبه الجسيمات الافتراضية. وأن التناظر مع نظرية المجال الكمي أخذ في المزيد، وبالتناظر للفراغ غير الخالي لنظرية المجال الكمي وتأثيراتها على الشحنة والكتلة لكلمات المجال توجد تغذية مرتجعة بين التفاعلات داخل المادة الجامدة ومستواها الأرضي، ويوجد دائماً تفاعلات بين ذنبات الداخل (القلب) الأيوني وإلكترونات نطاق التكافؤ للمادة الصلبة التي لا يمكن أخذها في الحسبان في الطريقة التقريبية المخططة سابقاً، وقد أثرت على الفرق بين المستويات المنخفضة الإثارة والمستوى الأرضي للمادة الصلبة كما يلي:

هكذا يجب الاهتمام الكبير بتفاعل الإلكترون - فونون باعتقاد وجوده فعلاً في تعريف إثارة الفونون نفسه كالإلكترونات تكون مشتتة وتكون غير معتمدة حقيقة كالإلكترونات منفردة ولكن شبه - جسيمات.

المسألة تكون علاقة مثل التي أعيد معايرتها في نظرية المجال فيزيائياً فإن أشباه الجسيمات والفونونات التي نراها ليست إطلاقاً بالمثل كالجسيمات

"المجردة" والتي تعتقد فيها ببساطة وبخصائصها التجريبية - طاقة وتفاعلات، وهكذا، محتوية مساهمات من سحابة التشوش المحيطة بالجسيمات المجردة⁽¹⁾.

وقد أحدث هذا تأثيرات تعني بأن "التعريف المبدئي" "للاثارة الأولية" لم تعد تحملها، ونتيجة العديد من عمليات التشتت فإن مستويات أشباه الجسيمات ليست مستويات مميزة حقيقية لهاميلتونيات النظام الكلي، وطريقاً واحداً يعتني بهذه المسألة هو تقريب "إعادة المعايرة"⁽²⁾ والتي تعود مرة أخرى طبيعية بإعادة طبيعتها في نظرية مجال الكم.

وحتى هذه النقطة، شرح تعريف شبه الجسيم وأساسه ومميزاته والمسائل التكنيكية التي تظهر، وقد فعل ذلك عند بعض المسافات للفلاسفة، وحقيقة فإنها قد تبدو ممتدة إلى حد ما، ومع هذا فمن وجهة نظر الفيزيائيين التكنيكية فإن الشرح السابق يكون بالأحرى ظاهرياً وحقيقياً وتهمل المسائل التكنيكية، ومع ذلك فلا بد أن أترك المسائل الفيزيائية التي تعطل الوقت الآن وأن آتي في النهاية للأسئلة الفلسفية، وهي بوضوح مرتبطة بوجود شبه - الجسيمات.

(1) Anderson1997,116.

فيما يلي ذكر أندرسون أن التناظر انتهى عند تشعب نظرية المجال الكمي والتي مصادفة لم تحدث عند حساب تفاعلات أشباه-الجسيمات التي سماها أندرسون بأشباه الجسيمات المطابقه للشحنات الكهربية الحرة للنوع (1) وليست المنكورة بأعلى كالنوع (2,3)، وأنا أطلق عليهم أيضاً أشباه- الجسيمات طبقاً لاستعمال الحد في فيزياء المادة المكثفة الحالية، وقد تأصل هذا الاستعمال؛ حيث أصبحت الأنواع الثلاثة شائعة بأنها مستقلة تقريباً ومحكمة وموضعية ونتيجة التأثيرات التجميعية.

(2) Anderson1997,120

هل نفترض أشباه الجسيمات للمادة المكثفة فيزيائياً أن تكون مثل الجسيمات الافتراضية لأشكال فايمان في نظرية مجال الكم؟ إنها بوضوح ليست كذلك. بالتعارض مع المشكل السابق فإنها تأتي بخاصتها بظهور كمي (مكمم) حتى لو أنها نتيجة الإثارات الجمعية، وأنها لم تكن فقط نتيجة الطرق الرياضية التقريبية للمادة المكثفة الفيزيائية التي دخلت المسرح أو الحلبة، وقد وضحت حساباتهم تفاصيل بناء نطاق الطاقة للمادة الجامدة التي لم يستطع شرحها تقريب هارترى- فوك إضافة إلى أنها تتبأ بتفاصيل ترتبط ببناء شحنة المادة الجامدة بالشوائب والعيوب وكل ذلك يمكن التحقق منه تجريبياً، وأنها ناجحة بشكل فعال في التنبؤ بالسلوك الشامل ظاهرياً للمادة الجامدة وعلى وجهة الخصوص الحالات المغناطيسية أو الفوق توصيلية، بقدر ما تكون أشباه الجسيمات متموضعة في البلورة بقدر ما توجد بالمفهوم البناء المكاني نفسه لمراكز التشتت دون الذري في الحقل غير النسبوي لطاقة التشتت وتساهم توزيع الشحنات شبه الكلاسيكية في المادة الجامدة بالمفهوم نفسه كما في مربع السعة للدالة الموجية عديدة الجسيم للذرات محدثة توزيعاً شحنيًا شبه كلاسيكي (أي عن طريق مبدأ التناظر العام^(١)) وهذا حقيقي جزئياً للتمركز غير المحدد للرزم الموجية لأشباه الجسيمات المشحونة أو الفونونات التي تتجمع حول الشائبة صانعة هدفاً مركزياً لتشتت أشباه الجسيمات المشحونة.

طبقاً للتناظر مع نظرية المجال الكمي فإن أشباه الجسيمات على تساو مع كمات المجال الحقيقية، والتي تخضع لحفظ الطاقة في تعارض مع

(١) انظر الفقرات (٤-٣، ٥-٤-٢).

خاصية (NCON) لمفهوم الجسيم الافتراضي (VP) وبطريقة أخرى لا يكون لها مفهوم على الإطلاق لتعريف شبه - الجسيمات الافتراضية على مسار أو في سياق (VP) ولكي يكتمل التناظر بين كمات المجال الحقيقي وأشباه الجسيمات.

وفي سياق المناظرة الفلسفية لمذهب الحقيقة العلمية كانت المحاولة لبرهنة معيار هاكينج الحقيقي لخصر أشباه الجسيمات:

"إذا استطعت نثرهم إذن فهم موجودون"⁽¹⁾، قد ادعت أن أشباه الجسيمات غير موجودة حتى لو أمكن نثرهم (كالرذاذ) وأطلق القول: إنه قد يستعملهم كعلامات، وهلم جرأً، حتى ولو في البلورات فإنهم أشياء مزيفة، ومع هذا فقد فقدوا هذا المسلك هذه النقطة الحاسمة بأن شبه -الجسيمات هي مجموعات تأثيرات ديناميكية لمكونات المادة الجامدة، في حالة كمومية مستويات الطاقة فإنها تكون موجودة، وهي بالطبع ليست موجودة كأشياء دقيقة مستقلة مطلقة مثل تلك الجسيمات الكلاسيكية المقترحة بأن تكون كذلك، وإني أوافق على أنه بهذا الفهم فإنها تكون أشياء مزيفة ولكنها توجد كتجمعات نسبية مستقلة للطاقة والشحنة واللف (وقد أحب الفيزيائيون في اعتبار ذلك كحوامل لهذه الكميات، ومع هذا فإن هذا يعتبر تفهقراً مضلاً للميتافيزيقا الكلاسيكية للمادة) ونتيجة للمسائل التكنيكية المذكورة سابقاً فإن التنبؤات الكمومية لطاقة إثارتها الدقيقة قد تكون سيئة، ولكن هذا لا يؤثر في وجودها كمستويات طاقة منفصلة للمادة الجامدة التي قد تكون أحياناً موضعية.

(1) Gelfert2003, against Hacking 1983,22-25.

حقيقة، فإن شبه -الجسيمات- بقدر ما تكون حقيقة بقدر ما تشارك بقيمة عند المخزون المتغير، القيمة المشاركة تكون أيضاً نتيجة التأثير التجمعي (كما تشير النهاية الفعلية)، المسمى (في اللغة التجارية) التصرف الجمعي لجميع المستثمرين وقد يمتد التناظر، ويمكن أيضاً أن "ينثر" القيمة المشاركة في فهم هاكينج، أي يؤثر في تسعيرها (اقتباسها) عن طريق الشراء أو البيع لأغراض المضاربة، ويمكن لسقوطه الحر أن يضع انهيار الاقتصاد وقد يصنع ارتفاعه المثير (المفاجئ) بعض الازدهار التسويقي، وقد يكون الانهيار وأيضاً الازدهار موضعياً؛ أي قد يؤثر فقط في بعض التسويق الموضوعي. لكن هل نستطيع استنتاج أن القيمة المشاركة تكون غير موجودة على أراضٍ منفردة أي أنها تكون تأثيراً جمعياً؟ وبوضوح القيم المشاركة وأيضاً شبه - الجسيمات لها حالة منطقية أخرى في كلمة أخيرة بيجاسوس. بيجاسوس غير موجود في العالم الحقيقي، ولكن فقط في حكايات علم الأساطير القديمة، ولكن توجد أشباه الجسيمات في البلورة الحقيقية؛ مثل القيم المشاركة الموجودة في الاقتصاديات الحقيقية والأسواق، حقيقة فإن كلا المفهومين لهما تعريف جيد في المعنى العرفي حتى لو لم يستطع استخراج سببهما عن طريق التجارب أو الدراسات الاقتصادية، ولكن الشيء نفسه يكون حقيقة غير ملائمة لسبب وجود مسار الإلكترون.

ومن ثم، فالتزعم "بالحقائق المرة" التي تسمح فقط للكيانات الحقيقية حول الأشياء الدقيقة الحقيقية تكون غامضة ووهمية، وإذا كانت الحقيقة المرة أن الإلكترونات موجودة كأشياء دقيقة بطبيعتها الخاصة (أي أنه في المادة بخاصتها)^(١) وإذا أخذ هذا كحالة ضد وجود شبه - الجسيمات فنكون الحقائق المرة للفلاسفة على نحو أسوأ جميعها .

(١) انظر:

Gelfert2003, against Hacking 1983,22-25 and 265.

لا تزال الخاصية الجسيمية (BOUND) لإحداث نظم ربط محل دراسة أو لم يتم دراستها، طبقاً للنماذج المتكونة الحالية كتكوين المادة للجزيئات والجزيئات للذرات والذرات للإلكترونات والأنوية، والأنوية للنيوكليونات (نويديدات) أي البروتونات والنيوترونات وتكوين البروتونات والنيوترونات من الكواركات والجليونات، ويكون هذا الفهم لزيادة المحتويات في تكوين نظم ربط تتغير أيضاً مع الانتقال من ميكانيكا الكلاسيكية إلى نظريات الكم، فقد أحدث مفهوم ميكانيكا الكم الجسيمية (QM) حساباً عمومياً لمكونات المادة (MC) والمذكورة في (فقرة ٦-٥-١) وهذا استناد إلى قوانين الحفظ وقواعد الجمع والخصائص الديناميكية للمفاهيم الجسيمية المدروسة في الفصل السابق، والتي جعلتها في غير إشكالية باعتبار أن المادة مكونة من الذرات وهي بدورها من الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات، حتى لو أن هذه المكونات دون الذرية تكون غير مميزة فإن قواعد جمع كتلتها وطاقتها ولفها وشحنها وكمية حركتها تعطى تعريفاً جيداً ومعالم واضحة ومحتوى إجرائياً قابلاً للاختبار^(١).

ولكن ماذا عن الكواركات؟ طبقاً للنموذج المعياري الحالي في الفيزياء الجسيمية، فإن النيوكليونات (بروتونات ونيوترونات) اقترح تركيبهم من الكواركات والجلونات، وبمقارنة نماذج أعلى مستوى تكوين للمادة فإن النموذج الكواركي يأخذ عدة ملامح تأملية، فحتى ظهور النموذج الكواركي فإن الإلكترون يكون مصحوباً بوحدة صغيرة من الشحنة الكهربائية، وقد اقترح

(١) انظر الفقرة (٦-٥-١) والملحق (هـ).

للكواركات أن تحمل شحنات كسرية تساوي $(\pm 1/3)$ أو $(\pm 2/3)$ من هذه الوحدات الشحنية، بالنسبة إلى غير شبيه الإلكترون لم يعدوا من الجسيمات الحرة في مستويات غير مقيدة، وأنهم لم يتمركزوا (موضعيًا) كجسيمات مشحونة (أو تجمعات كتلية وشحنية) في المفهوم الإجمالي للجسيم (OP) ولكنهم يعتبرون كمات مجال حقيقي تختص بالحالات الداخلية والخارجية لعملية التشتت دون الذرية وما يقابلها من عناصر المصفوفة S- ومن ثم فإن قابلية تطبيق المفاهيم الجسيمية لهذا الفصل للكواركات تحتاج إلى تحقيق ومزيد من الفحص^(١).

٦-٥-١ تعميم مكونات المادة

دعنا نبدأ من المذهب الذري الكلاسيكي ونظم ربط الميكانيكا الكلاسيكية قبل أن نتقدم في طريق نظم ربط الميكانيكا الكمية، وفي المعنى المعتاد للمذهب الذري يفترض أن جميع الأشياء المادية تتكون من أصغر المكونات غير المرئية. يستطيع المذهب الذري القديم الرجوع إلى ديموقريطس وأبيقور؛ ففي بداية العلوم الحديثة التي أخذت عن طريق جيلبرت وجاليليو وأخيرًا المذهب الذري والذي تم الدفاع عنه بواسطة بويل ونيوتن ولوك وبوسكوفيك وحتى أواخر القرن التاسع عشر فإن الذرات لم تكن في متناول الطرق التجريبية، وكانت معظم المسائل محل خلاف بالنسبة إلى موضوعات ومناظرات الميتافيزيقا مثلما كان في مناظرة ليننتس - كلارك أو خلال القرنين التاليين في مواجهة ماخ للمذهب الذري لبولتزمان

(١) انظر الفقرة (٦-٥-٢) والملحق (هـ).

وبلانك يتضمن المذهب الذري المعتاد على افتراضين؛ حيث يتميز بدقة أحدهما عن الآخر، ويكون للأول تصور بأن المادة تتكون من أجزاء ميكروسكوبية مفصولة وهذا أحدث نظرية لبناء مكونات المادة، والافتراض الثاني هو أنه يوجد مكونات جزئية جوهرية والتي تكون ذرات في فهم موضوع بسيط (وهي كلمة إغريقية) ولكن البحث عن المكتشفات الموضوعية للفيزياء لا تزيد عن المبدأ المنظم لتشكيل النظرية ونحن هنا نعني بالافتراض الأول فقط. منذ نشأت الفلسفة القديمة للطبيعة وكان التفكير مستمراً أو دون إمكانية الفهم للذرة، وتضمن المد المكاني وعدم قابلية فهم الديناميكا المتضمنة، وكان يجب على نموذج مكون المادة أن يشرح كلتا الخاصيتين، فمنذ القرن الثامن عشر شرحت جميع النماذج الذرية للمادة التمدد المكاني للمادة بدلالة الديناميكا الفيزيائية، لقد طرح كانت ووسكوفيت أسس هذا عن طريق شرح البناء الديناميكي للمادة بدلالة قوى التجاذب والتنافر، وهذه القوى تعمل بين أجزاء المادة بمثل طريقة المكونات شبه النقطية للمادة التي قد تكون النظام المربوط القوي^(١)، وتصنع هذه الفكرة وجهة نظر الميكانيكا الكلاسيكية بدقة كما يلي:

إن الحالة المكانية (الفراغية) للنظام الكلاسيكي للجسيمات N . وهي حاصل للضرب الكارتيزي N من أمكنة أو فراغات حالة الجسيم الواحد والفراغ الطوري R^{6N} ودالة الحالة للنظام هي المسار المعبر $\varphi: R \rightarrow R^{6N}$.

(١) ما يدعو للعجب هو أن هذه الفكرة لم يكن لها أي مؤثرات على السجال الذي دار في القرن السابع عشر بشأن المذهب الذري. انظر:

Kant1781/87,A434-437/B462-465, Falkenburg2000,227-239.

وقد ثبت بغير غموض عن طريق المعادلات الديناميكية للجسيمات N ولكل لحظة t فإن $3N$ لها محاور موضعية x_k^i ويكون للمقدار $3N$ من كميات الحركة لـ p_k^i حيث $(i=1, \dots, N; k=1, 2, 3)$

$$(6.12) \quad \varphi: t \rightarrow (x_1^1(t), \dots, p_3^N(t)).$$

الحالة الجسمية N تحلل إلى حالات الجسيم الواحد، ويتم الحصول عليها عن طريق إسقاط المسار $\varphi(t)$ إلى حالات الجسيم الواحد، في الزمان المكاني العادي تتفكك الحالات الجسيمي الواحد أي أنها لا تتقطع.

الأمثلة العيارية للأنظمة الكلاسيكية المربوطة هي النظام الشمسي والنموذج الذري لرنر فوررد، والقوى الرابطة الخاصة هي الجاذبية وقوى كولوم. إن الامتداد المكاني للنظام المربوط يكون نهائيًا إذا كانت مسارات الجسيم الواحد دورية، وهي تكون الحجم المحيط بها، وإضافة إلى أن وصف النظام المربوط يحتوي على قواعد الجمع للكميات الديناميكية المحافضة للنظام ومكوناته. على وجه الخصوص كمية الحركة p للنظام الناتج من كميات الحركة الجسمية لـ N هي p^i طبقاً $P = \sum p_i$ والكتلة M والشحنة Q لمجموع النظم المكون من جميع الكتل الجسمية المنفردة والشحنات طبقاً لـ: $M = \sum M^i$ حيث $(i=1, \dots, N)$ و $Q = \sum Q^i$.

أيضاً جسيمات ميكانيكا الكم في المفهوم الجسيمي (QM) تكون نظمًا مقيدة، ولكن توصيف الذرات تم وضع الجهد الكولومي الكلاسيكي للنواة الذرية في معادلة شرودنجر للدالة الموجية للإلكترون، وقد أحدث حل الجسيم الواحد بميكانيكا الكم لذرة الهيدروجين نقله، فكانت ميكانيكا الكم للنظام المقيد

عديدة الجسيمات متطلبات فقط لأغراض الفيزياء الذرية لما بعد الهيدروجين (بدءًا بالهليوم) والفيزياء الجزيئية والفيزياء النووية وفيزياء المادة المكثفة.

إن الحالة المكانية لميكانيكا كم النظام الجسيمي N هي حاصل ضرب ممتد N للجسيم الواحد لفراغات هيلبرت H^i و فراغ هيلبرت هو H^N :

$$H^N = H^1 \otimes H^2 \otimes \dots \otimes H^N$$

دالة الحالة المقابلة (مضادة التماثل كليًا) هي الدالة الموجية Φ^V ميكانيكية الكم الجسيمية N ، ويكون الحصول عليها من حالات الجسيم الواحد $\in H^i \Phi_{ki}^{(i)}$ عن طريق حاصل الضرب المكون لها والمتضاد التماثل لغير الميونات) أو المتماثل (للبيوزونات).

$$(6.13) \phi^N = \sum_{k_1, k_2, \dots, k_N} C_{k_1, k_2, \dots, k_N} \phi_{k_1}^{(1)} \otimes \phi_{k_2}^{(2)} \otimes \dots \otimes \phi_{k_N}^{(N)} \pm \text{permutations.}$$

ويتم توضيح الامتداد المكاني للنظام المربوط من كثافة الاحتمال $|\Phi^V|^2$ (r) ويسمح مبدأ التقابل العام الذي تم مناقشته في الفقرتين السابقتين (٤-٣، ٥-٤) لتفسير كثافة الاحتمال هذا كتوزيع شحني شبه كلاسيكي، ونتيجة لـ(ضد) التماثلية فإن Φ^V لن تتحلل إلى حالات جسيم واحدة معرفة جيدًا، وأن مكونات النظام N لجسيم ميكانيكا الكم معقد أو متشابك، وأنه لا يمكن تقسيمه زمنيًا - مكانيًا، وأنهم يميزون عدديًا فقط.

الآن تتميز الفيرميونات والبيوزونات، فالفيرميونات لها لف مقداره أنصاف العدد الصحيح مثل الإلكترون والبروتون والنيوترون، ويكون للبيوزونات وهي جسيمات ذات لف مساو لمضاعفات العدد الصحيح مثل الفوتون وجسيم α - أو ذرة الهليوم غير المؤينة، وطبقًا لمبدأ باولي

للاستبعاد فإن حالات الفيرميونات الديناميكية تتميز بدلالة أعدادها الكمية ولهذا السبب يمكن تعريف حالات الجسيم الواحد الديناميكية لنظام ميكانيكا الكم المربوط في فراغ فوك، وأنها ببساطة حالات أو مستويات مميزة للمعامل الرقمي الإشغالي^(١)، وبالنسبة إلى البوزونات فهذه ليست حالتها، والعديد منها يحتل المستوى الكمي نفسه محدثاً سلوكاً تجميعياً اتساقياً كما في ضوء الليزر أو في تكتيف بوز - اينشتين، وأن الفوتونات وعدداً من البوزونات الأخرى لا تكون نظاماً مربوطة، ومع ذلك توجد نظم مربوطة للبوزونات (بعضها) على سبيل المثال من فروض ديناميكا الكم اللونية لنظم الجليونات المربوطة وهي الجسيمات التي تحدث القوى الرابطة بين الكواركات، إضافة إلى أي نظام ميكانيكي كمي مربوط يتكون من اثنين من الفيرميونات ليكون البوزون^(٢) ومن ثم فإن تصرف السلوك الإحصائي المختلف للفيرميونات والبوزونات لا يحدث تمييزاً كبيراً بدلالة مكونات المادة وتفاعلات الكمات^(٣).

لكي نعرف الجسيمات "منفردة" والتي تخص نظاماً ميكانيكياً كمياً مقيداً (أو نظاماً معقداً بصفة عامة) يجب تحطيم عدم الترابط (بفك التقارن) أو فك تشابك النظام عن طريق حصر أحد أجزائه وهذا ليس حقيقياً فقط لعلاقات EPR المشهورة في نظام الفوتونين المتشابكين ($\gamma - 2$ فوتون) ولكن أيضاً

(١) انظر الفقرة ٦-٤-٤.

(٢) هذه حقيقة خاصة لإكسينونات قد تكون موجودة في الجوامد.

(٣) لقد جاء (Redhead 1988, 15-16) بعد حجج مع وضد الأخذ بالفيرمونات والبوزونات كعلامات تمييز لمكونات المادة أو تفاعلاتها.

بالنسبة إلى أنظمة ميكانيكا الكم المقيدة، لا توجد قياسات غير محطمة لوضع الإلكترون في الذرة، فقط عند مستوى الذرات ككل التي لها إمكانية لتمرکز أجزاء منفردة للمادة عند سطح البلورات بواسطة وسيلة الميكروسكوب الإلكتروني، وما يشاهد هنا هو عوده للتوزيع الشحني شبه الكلاسيكي والتي يحدثها النظام عديد الجسيمات الميكانيكي الكمي في المحيط الماكروسكوبي.

ومع هذا، يخضع النظام المقيد الميكانيكي الكمي لقوانين الحفظ مثل ما في النظام المقيد الكلاسيكي، وأن كمياتها المحفوظة هي الطاقة وكمية الحركة وكمية الحركة الزاوية واللف والشحنة للنظام المقيد ومكونات أجزائه، ويحدث قواعد الجمع لقيمتها المتتابعة للذرة ومكونات أجزائها، وتحدث هذه القواعد الجمعية قواعد فيزيائية أخرى مثل علاقة أينشتين⁽¹⁾ للكتلة - والطاقة $E = mc^2$ ، وعلى وجه الخصوص تربط قواعد الجمع التالية لكميات الحركة P ، p^i (والكتلة M) m^i وطاقة الربط E_B والشحنة الكهربائية Q ، Q^i للذرة أو النواة الذرية وأجزاء مكوناتها n ($i=1, \dots, n$):

$$(6.14) \quad p^i, P = \sum$$

$$(6.15) \quad \frac{1}{c^2} E_B, M_i - M = \sum$$

$$(6.16) \quad Q^i \cdot \sum Q =$$

النظم المربوطة الكلاسيكية والنظم الكمية المترابطة لها الخصائص المشتركة التالية، البناء الزمني المكاني للنظام المربوط يوضح بدلالة ديناميكية مكوناته، يرتبط النظام وأجزاء مكوناته بقوانين الحفظ المعرفة جيداً

(1) Einstein et al.1935

وبقواعد الجمع التي لها مكون عملي معرف جيداً وأنها محققة بتعريف جيد بعلاقات الجزء -والكل للنماذج المكونة للمادة، وأنها في الفيزياء الذرية والنوية تعتمد من حيث المبدأ على الكتلة - الطاقة والشحنة التي تكون محفوظة طبقاً للصيغتين (6.15) (6.16) ⁽¹⁾ حتى لو أن الجسيمات الكمية تفتقد انفرادياً للزمان - المكاني، هذه العلاقة الجزئية - الكلية معرفة جيداً ومختبرة، إضافته إلى أنه في النموذج الكواركي تصبح قاعدة جمع كمية الحركة حاسمة، ولكن قبل الرجوع لهذا، دعنا نعبر عن خصائص مكونات المادة بدلالة مفهوم جسيمي آخر عام:

(Mc) مكونات المادة؛ هي:

(MESQ) تجميع الكتلة m والطاقة E واللف s والشحنة q_i .

(BOUND) قابل لتكوين نظم مربوطة.

(SUM) موضوع قواعد الجمع التي تستج من قوانين الحفظ للكتلة

واللف وعموم الشحنات وكمية الحركة.

(PART) أجزاء ديناميكية للامتداد الزماني - المكاني ككل.

لقد احتوى الطريق لنموذج الكوارك مثل قواعد الجمع (SUM) وعلاقتها بمجموعات التماثل للتفاعلات القوية والكهروضعيفة، طبقت أيضاً قوانين الحفظ الدقيقة على كمية الحركة الزاوية واللف وهي مصاحبة مع تمثيل مجموعات التماثل $O(3)$ و $SU(2)$ على التوالي، وقواعد الجمع المقابلة

(1) إنه بالإمكان التعبير عن هذا في الحدود الخاصة بالمناطق المجرد لمجموع الجزء الديناميكية غير المتصلة للمادة أنظر الملحق (هـ).

تنشأ من جبر الميكانيكا الكمية لكمية الحركة الزاوية، فقد عرف هايزنبرج في عام ١٩٣٢ قواعد الجمع الجبري التناظري فيما يسمى بالأيزوسبين (نظير اللف)^(١) وقد فهم نظير اللف كتمائل مصاحب مع عدم الاعتماد على شحنة التفاعلات القوية للبروتون والنيوترون، وهذا كان أول تماثل ديناميكي للجسيمات بون الذرية على التناقص مع التماثلات الحركية لمجموعة بوانكاريه.

٦-٥-٢ نموذج الكوارك

أخيراً، صاحبت التماثلات الديناميكية أو التماثلات الداخلية مع القياس اللا متغير لنظريات المجال الكمي^(٢)، والآن لها علاقة بعموم الشحنات نكهة ولون للنموذج المعياري الساري لفيزياء الجسيمات، وهذا بدوره عاد وتصاحب مع مجموعة التماثل $U(1) \times SU(2) \times SU(3)$ وانبنى على نظريات المجال الكمي لتفاعلات الكهروضعيفة والتفاعلات القوية، نظرية سلام - وينبرج (ديناميكية النكهة الكمية) والديناميكا الكمية اللونيّة^(٣) الآن

(١) انظر Pais 1986,423-425

(٢) يشرح (Lyer2004) عن الذي أهمله من كتاب فيزياء الجسيمات.

(٣) يشرح نظرية Salam-Weinber بالتركيب التماثلي المعقد، ولكي يتم شرح الكتل غير الصغيرة للكوارك والليبتون فقد تم تكسير المفهوم التماثلي والمتعلقة ببوزونات هييجز، ومع هذا فإن وجود بوزونات هييجز لم تؤكد عمليات حتى يومنا هذا (حتى تأليف الكتاب هذا- تعليق من المترجم).

ملحوظة مهمة: تم التأكد من الكشف عن البوزونات هييجز- في منتصف عام ٢٠١٢ في المركز الأوروبي لبحوث النووية بجنيف CERN وساهم في ذلك آلاف الفيزيائيين والرياضيين من مختلف أنحاء العالم.

تصاحبت التفاعلات الكهروضعيفة للكواركات مع نكهة الشحنة المعممة، بالإضافة إلى أنه افترض أن كلا من النكهات فوق وتحت وغريب ومألوف وقاع وقمة أنت في ثلاثة ألوان، وفي تطابق مع تجميعة الخصائص الديناميكية (MESQ) للمفهوم الجسيمي السابق (MC)، لقد عزا النموذج المعياري للكواركات ما يلي من الكتل واللف والشحنات:

الكتل: m_f (حيث f هي الست نكهات، $f = u, d, s, c, b, t$).

اللف: $s = 1/2$

الشحنات: (الشحنة الكهربييه) $q_c \in \{ \pm 1/3, \pm 2/3 \}$

النكهة: $q_f \in \{ u, d, s, c, b, t \}$

اللون: $q_c \in \{ \text{red, blue, green} \}$

لقد ظهر نموذج الكوارك خطوة خطوة، وفي كل مرحله المختلفة كان يأتي لتحقيق مزيد ومزيد من المعايير الجسيمية، ومع ذلك بالمقارنة للمستوى العالي للنماذج المكونة للمادة فإن النموذج الكواركي احتفظ ببعض الملامح الخاصة حتى من هذا.

لقد ظهرت أول نسخة في عام ١٩٦٩، وقد صاحبت الكواركات عرضًا يتعذر تبسيطه لتمثلية $SU(3)$ لنظرية مجالي كمي غير معروفة للتفاعلات القوية (تم التعبير عنها في النموذج المعياري الساري وينبني الهادرون $SU(3)$ في نموذج الكوارك الخاص لعام ١٩٦٤ على النكهات الثلاث الخاصة بتفاعلات الكهروضعيفة؛ أي على الكوارك العلوي والسفلي والغريب وليس على التماثلية اللونية $SU(3)$ للتفاعلات القوية) ففي الستين

السابقة كانت هذه المجموعة التماثلية ناجحة جدًا في تطبيق الهادرونات، فقد شرحت الانبثاث من حظيرة الجسيمات التي ظهرت في الخمسينيات من القرن العشرين والبدائيات الأولى للستينيات باستحضار ترتيب تصنيفي أو تنظيمي لعدد وافر من أنواع المسارات الجسيمية وأحداث التشتت التي وجدت في التجارب وفي النتائج المرصودة للأشعة الكونية⁽¹⁾ والأعداد المتزايدة من الجسيمات الثقيلة (الهادرونات) وتجميع الخصائص الديناميكية لها تعود وتعكس عرض البناء الذي يقابل تمثيل مجموعة التماثل $SU(3)$. في عام ١٩٦١، صنفت الهادرونات التي عرفت خلال ١٩٦٠ طبقاً للتعدد المقابل لتمثيل التماثل $SU(3)$ للأعداد الكمية المحفوظة مثل نظير اللف (أيزوسبين) ودرجة الغرابة، وقد خدمت قوانين الحفظ المقابلة وقواعد الجمع لنظير اللف والقيم الكمية الأخرى في تحليل المسارات الجسيمية وأحداث التشتت الناتجة من الأشعة الكونية أو في المعجلات الجسيمية.

بمجرد أن تصاحبت التماثلية $SU(3)$ مع محاولة شرح التعددية الهادرونية فقد أحدث التصنيف نموذج الكوارك عام ١٩٦٤، وقد افترض أن التعددية هذه ناتجة من تركيب الكواركات متشابهة اللف والندية والكتلة نفسها تقريباً واختلاف الشحنة الكهربائية (الكسرية)؛ أي أن أنواع الهادرونات التي وجدت في تحليل المسارات الجسيمية وأحداث التشتت التي فسرت بمدلولات النموذج التقريبي لتمثيلات معينة لـ $SU(3)$ القابلة للاختزال، لقد شرح نموذج الكوارك المبكر هذا التماثل بدلالة الثلاثة كواركات التي تقابل تمثيلات

(١) تم الشرح هذا عن طريق التوحيد (Friedman 1974) بالأحرى عن طريق النهج الاستنتاجي، وقد خطت طرق القياس في (الفقرة ٣-٣-٣).

$SU(3)$ غير القابلة للاختزال، ومن ثم ففي نموذج الكوارك المبكر جزء- من كل للعلاقة الكلية بين الكواركات والهادرونات المبنية فقط على فصل التمثيل غير قابل للاختزال والقابل للاختزال للمجموعة المتماثلة. إن الأجزاء المكونة وكل المكون منها يتصاحب مع تمثيلات $SU(3)$ غير القابلة للاختزال والقابلة للاختزال على الترتيب، ومن ثم في ذلك الوقت اعتبرت الكواركات فقط جسيمات في مفهوم مبدأ المجموعة النظرية (GT)، وكانت قاعدة عملهم فقط هي قوانين الحفظ (CONS) وما يقابلها من قواعد الجمع (SUM) لبعض الشحنات العامة، وما هو أكثر فقد عزوا تلك الخصائص الديناميكية الفردية كشحنات كهربية كسرية، وبالتالي على أساس التماثلية فقط فإن نموذج الكوارك لم يكن مقبولاً. وافترقت المجموعة الدقيقة للمفهوم النظري للكوارك لأي أساس إجرائي بمعناه في المفهوم الإجرائي للجسيم (OP)، ولم يوجد قياس لمثل هذه الجسيمات.

لقد سجل أول حدث تجريبي لإثبات وجود تركيب شبة نقطي للنيوكليون في عام ١٩٦٨، وكان الأساس النظري المبني عليه هذه المشاهدة هو سلسلة النماذج شبة النقطية للتشتت وعوامل التشكل في المجال غير النسبوي والنسبوي المشروح في الفصل الرابع (فقرة ٤-٣، ٤-٤) فقط اعتمدت الدوال البنائية الكهرومغناطيسية $(W_{1,2}(q^2, v))$ لتشتت عميق غير المرن للإلكترون- نيوكليون (التي لها علاقة بعوامل التشكل الكهرومغناطيسي للبروتون أو النيوترون) اعتمدت على قيمتين: النقل الرباعي لكمية الحركة (q) أو مربعها) وما يرتبط بها من طاقة منقولة لها، وهذه تعبر عن المعرفة التجريبية التي لها علاقة بالموضوع في عام ١٩٦٨

وقد أوضحت أن البناء الدالي للنيوكليون لا يعتمد على القيمتين باستقلال ولكن يعتمد فقط على نسبتهما وقد أوضحت الدوال البنائية المقاسة قياساً لاغيري (اللا تغير الخاضع لقياس الطاقة) في تناظر أمامي مستقيم لتشتت رذرفورد⁽¹⁾.

لقد طور بجوركن وفايمان في عام ١٩٦٩ النموذج البارتوني للنيوكليون حتى يمكنها شرح النتائج العملية، وأخيراً كان هناك مزيد من الإضافة لنموذج الكوارك- بارتون الذي يحدد مكونات النيوكليون شبه النقطي التي أوجدت في عام ١٩٦٨ مع كواركات نموذج عام ١٩٦٤ وطبقاً لكلا النموذجين فإن الهادرونات تتكون من اثنين إلى ثلاثة كواركات، فالميزونات (وهي الهادرونات ذات الكتلة الأقل بالمقارنة لكتلة النيوكليون) تتكون من كوارك وضد الكوارك، أما الباريونات (وهي الهادرونات ذات الكتلة التي لا تقل الواحدة منها عن كتلة النيوكليون) تتكون من ثلاثة كواركات، ولكل هادرون تكون مكوناتها الكواركية مجموعة المضاعفات العددية لشحناتها الكسرية، والهادرون المألوف بانتساع هو النيوكليون أي المكون للنواة الذرية (سواء بروتون أو نيوترون المتحد من مفهوم نظير اللف)، وأنواع الهادرونات الأخرى إما موجودة في الأشعة الكونية أو مولدة في تجارب التشتت في فيزياء الطاقة العالية، وجاء اختراق النموذج العياري الساري في عام ١٩٧٤ عندما تم اكتشاف الجسيم الرنيني وحصره للدالة

(1) Bloom et al. 1969, Breidenbach et al.1969,

كلا المطبوعتين في (Cahn and Goldhaber1989) وأحد الملامح الفينومولوجية (الظاهراتية) لمساحة المقطع المقاس كان زاوية تشتت كبيرة في تناظر دقيق مع التشتت الخلفي المكتشف في معمل رذرفورد.

(J/Ψ)، وحتى هذه فقد أرجع حفظ الكمية لجسيم فتنة؛ حيث تم التنبؤ بها كنعكسة كوارك رابعة في امتداد نموذج الكوارك^(١).

في ظل عدم استطاعة هايزنبرج التوافق على مفهوم نموذج الكوارك في عام ١٩٧٦ حتى ولو أنه فتح طريقاً حاسماً لذلك بوضع نظير اللف كأول حركة ديناميكية أو تماثل داخلي، فقد فسر المقياس اللامتغير للدوال البنائية للنويكليون بدلالة مجرد تماثل آخر للجسيمات الأولية (أو كل نظرية مجال متقبلة في مجال يبحث فيه) ففي بحثه الشهير عن ماهية الجسيمات الأولية؛ انتقد النظرة البارزة في علاقة جزء- الكل، الذي أكد تضاد البرهان الثاني التالي "لكانط" أنه في التحليل الأخير يظل نموذج الكوارك مبنياً على تفسير علاقة جزء- الكل في الحدود المكانية، وقد ناقش تلك الرؤية الإشكالية لسببين، الأول عدم تطبيق مثل تلك الحدود البديهية على الجسيمات دون الذرية والثاني ادعائه بوجود أن يكون بالإمكان تحليل النظام المركب إلى الأجزاء المكونة ذات كتلة سكون كبيرة جداً بالمقارنة للطاقة اللازمة لتحلل النظام^(٢). كان اعتراضه الأول غير مقنع حقيقة، فقد أهمل البناء الديناميكي للنماذج المكونة للفيزياء، كما في أي نموذج آخر لنظام مربوط في نموذج الكوارك تكون علاقة جزء- الكل مفهومة بدلالة الكميات الديناميكية وقواعد الجمع.

وكان اعتراضه الثاني أكثر جدية، فقد تنبأت نظرية الكم النسبوية بتخليق الجسيمات (أو كمات المجال الحقيقي) من الطاقة المنتقلة لتجربة

(١) انظر: Riordan 1987, 210 and 294-321, Pickering 1984, 184 and 253-279

(2) Heisenberg 1976, 5.

التشتت. إن البروتونات لها كتلة سكون حوالي واحد جيجا إلكترون فولت (1 GeV) ولكن الطاقة المنتقلة في التشتت غير المرنة العميق للبيتون - مع النيوكليونات تكون مطابقة لرتبة (100 GeV)، ففي التجارب التي تقيس دوال البناء النيوكليوني فإن الطاقة المنتقلة تحدث رذاذاً هادرونياً أي تنتج العديد من الجسيمات التي تكون أثقل بكثير من البروتون^(١) وهكذا في تجارب التشتت والتي أعطت نموذج البارتون للبروتون (أو النيوترون) لم تكن تتحلل إلى مكونات جزئية معدودة، على الأصح خلقت جسيمات جديدة وخرجت منها ولا تعتبر كمكوناتها. ومن ثم، فقد ظل اعتراض هايزنبرج مرتبطاً بفقد القواعد العملية لمفهوم الشحنات الكسرية.

إن حل المشكلة قبلت الآن بصفة عامة في فروض القيد، فالفروض الظاهرية التي تم التوصية بها أولاً على الخلفية النظرية، وأنها ترتبط بخاصية ديناميكية اللون والتي تعزى إلى الكواركات كرقم كمي إضافي لبرهان أن مبدأ باولي للاستبعاد بطريقة أخرى منتهك، وطبقاً لهذا فإن في نموذج الكوارك يأتي لكل نكهة كواركية ثلاثة ألوان. وهذا الأخير يكون حدوث الشحنات العامة للتفاعلات القوية باسم "الكم الديناميكي اللوني"، ومع هذا، فإن مستويات ربط الكواركات تأتي فقط في انفراد طبقاً لنموذج الكوارك والتركييب الظاهري لمضاعفات الهادرون، لذلك فلكي نوضح عدم وجود الكواركات الحرة أو غير المربوطة فقط افترض أنه لا توجد حالات كواركية م. ا. عدا حالات "لا لونية" (فردية) تكون مستقرة ويكون الجهد $V(r)$ هو جهد تفاعلات الكوارك موصوفة ظاهرياً عن طريق المصطلح التالي^(٢):

(١) إن طاقة هذا الهادرون الرذاذي هو أحد كميات حدث التشتت الذي يتأسس قياس مساحة المقطع التفاضلي.

(٢) انظر: Perkins 1987, 20، α_s هي ثابت التقارن للتفاعلات القوية ، k هو ثابت.

$$(6.17) \quad \frac{4}{3} \frac{\alpha s}{r} + kr, -V(r) =$$

حيث يكون الحد الأول في الطرف الأيمن هو حد شبيهه - الكولوم (السائد عند مسافات قصيرة) ويعبر الحد الثاني عن ثابت القوة (السائد عند المسافات الأكبر) طبقاً للصيغة (6.17) فإن الكواركات تكون غير متشابكة داخل النيوكليون؛ أي في حالاتها المربوطة، ومن ثم فقد أوصت افتراضات القيد أن للكواركات السلوك الديناميكي المتناقض التالي: يكون لها تصرف تقاربي حرّ في الحالات المقيدة بينما تربطها معاً الجهد $V(r)$ أو طاقتها الرابطة، تزداد بزيادة المسافة r ⁽¹⁾. ولكن بقي استنتاج حاسم للفجوات بين الكواركات والنيوكليونات، وما زالت في حالة نقاش وجدال ما إذا كان قيد الكوارك حقيقياً يفهم من كم الديناميكا اللونية، وحتى يومنا هذا لم يتم توضيح كيفية حدوث قيد الكوارك ديناميكياً في الأنظمة المربوطة.

لقد أخذ افتراض القيد قدرة تفسيرية كبيرة، فقد شرح الأحداث المتدفقة (جيت) المميزة؛ أي أحداث التشتت الفردي ذات حزمتين أو أكثر من المسارات الجسمية والتي تشبه النفثات وتتعلق بالرذاذ الهادروني ويشرحون كالتالي: نتيجة النوع الاستثنائي للقوة التي تحدث القيد، فإن مسافة الكواركات المربوطة تزداد بزيادة طاقة حالاتها، لذلك، بزيادة طاقة تشتت تجربة التصادم فإن احتمالية الحدث المتتابع التالي يزداد، ويتخلق حالة الكوارك-ضد الكوارك بإزاحة داخلية كبيرة، وتكون طاقة الحالة من الكبير بحيث يمكن تخليق زوج من الكوارك وضد الكوارك. ويعاد ارتباط الكوارك الأخير مع

(1) في عام ٢٠٠٤ نال كل من D.J.Groos, H.d.Politzer and F.Wilzeek في تطوير

الأفكار الأساسية للديناميكا اللونية الكمية كنظرية تتمتع بحرية مقارنة.

ضد الكوارك المتكون والعكس بالعكس، يحدث حالتين جديدتين مقيدتين ذات طاقة منخفضة، وهذه تظهر كاثنتين من الميزونات غير المستقرة آتية من الحالة المتكونة للكوارك والكوارك المضاد مضمحلة إلى اثنتين منفصلين مكانياً من الرذاذ الهادروني الذي يركز بحده ويوجه في اتجاهين متضادين⁽¹⁾. من التحليل السببي للمسارات المنفردة صانعة كل رذاذ أو نفثة فإن نكهات الكوارك لكل مثل هذا القطب للحالة الابتدائية للكوارك وضد الكوارك يمكن تعريفها أحياناً على نحو غير ملتبس، في هذه الحالة كل أنماط الاضمحلال الممكنة لجميع الحالات الممكنة من الكوارك وضد الكوارك عدا الذي يمكن استبعاده على نحو له مغزى، وبالتالي فالنوع المتبقي للعلمية يجب أن يكون هو الذي يحدث فعلياً ويسبب الحدث النفث المنفرد المشاهد. بعد مضي عدة سنوات على هذا الطريق أعلن حدث تجريبي لكوارك القمة ليكتمل بذلك تجريبياً نموذج الكوارك⁽²⁾.

في الواقع، قد يعتبر التحليل السببي لمثل هذا الحدث النفث (جيت) على نحو غير ملتبس كمشهد في حس عام مذكور في الفصل الثاني (فقرة 2.5) وهذا الحدث يكون في حالة التباس إذا وإذا فقط اتضح أنها لا ترتبط بالخلفية أو الضوضاء التي تتواجد حول أحداث بعض الأنواع

(1) تنتج الأحداث ثلاثية الجسيمات الثانوية من عمليات مشابهة، وهنا في تناظر مع أشعة الفرملة (bremstrahlung) في الديناميكا الكهربائية الكمية يفترض تأثير رتبتي عال إضافي للديناميكا اللونية الكمية، يسبب إنتاج بعض الحالة الجليونية التي تضمحل إلى رذاذ هادروني ثالث أو نفث.

(2) Abe et al.1995, Abachi et al.1995.

انظر أيضاً:

Liss et al.1977, Perkins2000,134-138.

الأخرى، (لا يوجد العديد من مثل هذه الأحداث التي تكون لها مغزى ولكن هذا لا يذكر إلا أن النقطة الرئيسية لمثل هذه الأحداث في إعادة تكرارها).

بالنسبة فقط إلى أحداث الصفائح الذهبية يتحقق فيها مشاهد موثوقة لكلا جزئي الحالة، أولاً: في تحليل نتائج المسارات الجسيمية للهادرونات الثانوية التي وضحت أن مكون الكواركات للحالة الابتدائية للكوارك وضد الكوارك يمكن تحديدها على نحو غير ملتبس، وهذا يعني أن المقادير المقاسة لكل من الحدين النفاثين (جيت) يمكن بغير التباس تكون متعلقة بالنوع الخاص بالكوارك ذي الكتلة m واللف s والنكهة q_f . ثانياً: صورة الكمبيوتر المؤثرة لمثل هذا الحدث النفاث الذي يتم الحصول عليه من تسجيل عملية التشتت المحددة (الواقعية) والتي تحدث عند لحظة معينة في تجربة تصادمية محددة محدثة قصة سببية محبوكة عن ماذا نحن ذاهبون داخل منقطة التفاعل، ترتبط قضية كل حدث غير ملتبس لكل كوارك منفرد، والذي طبقاً لنظرية راسخة تماماً هو أحد المكونين لمركب نظام الكوارك وضد الكوارك⁽¹⁾.

حتى لو أن الكواركات لم تأت بذاتها ولكن فقط في حالات مربوطة، فإنها تعتبر أجزاء ديناميكية للنيوكليونات في فهم مكونات المادة (MC) ينتج

(1) ومع هذا فإنها محل جدال في خطوة هايزنبرج بسبب أن هذه الأحداث النفاثة فيها يتم ملاحظة الميزونات الناشئة من تشظى أزواج الكوارك والكوارك المضاد الابتدائية ولا تكون أجزاء مكونة للأخير، وطبقاً لمحاولة البرهان هذه فإن زوج الكوارك ومضاد الكوارك يأتي كسبب لقصته السببية منفرداً، انظر Fox2006,chap.19 هذه النقطة تكون واضحة العلاقة لمفهوم المسافة الموجودة في افتراضات القيد والذي أكد فيها هايزنبرج بعدم القبول إدراكاً بالحدس والبدئية وخاصة التناظر.

التكامل الشحني ونظير اللف للنيوكليونات من جمع الشحنات الكهربائية وشحنات النكهة للثلاث كواركات طبقاً لقواعد الجمع البسيط (SUM) لعموم الشحنات للكواركات والنيوكليونات. إضافة إلى وجود قواعد الجمع لكمية الحركة. ويمكن أن يعبر عن الدوال التركيبية $w_n(q^2, \nu)$ بدلالة المجموع الوزني لتوزيعات كمية الحركة للكواركات وتحمل الأوزان في هذا المجموع الوزني معنى احتماليًا، فإنها لا شيء ولكنها مربع مقدار التشتت من التشتت غير المتسق للجسيمات المختبرة عند الكواركات المختلفة داخل النيوكليونات^(١). ففي الواقع يتم التعبير عن الاحتمال بأنه عند كوارك معين (q_f) (أو نوع معين لنكهة كوارك) داخل نيوكليون (أو مصحوبًا معه) يحمل مقدارًا نسبيًا $(x = p_f/P_{nuc})$ من كمية حركة النيوكليون؛ حيث x هي المتغير القياسي للدوال التركيبية^(٢)، وبهذه الطريقة فإن الدوال التركيبية للتشتت غير المرن العميق لليبتون مع النيوكليون يتم تفسيره بدلالة توزيعات كمية حركة الكوارك التي تخص النكهات الكواركية الثلاث من الستة والتي تسمى كواركات فوق، وتحت، والغريبة.

لكن ظلت بعض الملامح الغريبة لنموذج كوارك - بارتون باقية، على سبيل المثال القيم المميزة للكتلة والنكهة للكواركات غير متشابهة (وهذا نتيجة انتهاك CP، هذا ما يسمى بالكوارك المختلط في النموذج المعياري ويعبر

(١) الكواركات: هي فيروسات، يتم تمييزها عن طريق مستوياتها الكمية بدلالة أنواعها الثلاثة من الشحنات، هذا إلى حد بعيد نفع للتحدث عن كواركات مختلفة داخل النيوكليونات تتمركز داخل النيوكليون للتصميم المكاني لتجربة التشتت انظر ٤,٥ وما بعده.

(٢) انظر: Perkins 1987, 171-181

عنها بواسطة مصفوفة كوباياش - ماشكاوا) وعند طاقات التشتت العالية جداً تشير الانتهاكات القياسية في الدوال التركيبية وقواعد الجمع الكمية الحركية المقابلة إلى أنه يجب أن يوجد مزيد من البارونات تزيد عن الكواركات الثلاثة المتوقعة (المسماة تكافؤية) طبقاً للنمط الساري لنموذج الكوارك - بارتون، تحدث الجليونات بحرًا من الكواركات (أي أزواج من الكوارك وضده) وتأثيرات تجميعية برتب أخرى أعلى والتي تضاف إلى المحتوى الديناميكي^(١) للنوكليون. كلا التأثيرين يوضحان طبيعة شبيهة الموجة وطبيعة شبيهة المجال لمكونات النيوكليون، وفي الواقع لا يوجد شيء غريب في المحتوى الكمي، ولكن تكون الملامح التي أصابت الحقيقة طبقاً لافتراض القيد هي أن الكواركات تكون تقريباً مستقلة داخل النيوكلونات، وعلى الضد مع المكونات عالية المستوى للمادة فيفترض أنها تكون حرة تتبع خطأً تقاربياً في حالاتها المربوطة، ومن ثم حتى لو أنها دائماً تختص بالنظم المركبة فيكون لها تقريباً (كمياً) خاصية جسيمية مستقلة (INDEP) وقد حاول أكثر من واحد عدم ربطهم وهم في حالاتهم الحرة التقريبية خطأً وقد أصابهم تجمع قوي محدثاً تشظيلاً في النهاية.

٦-٦ ماذا تبقى من أنواع الجسيمات؟

لقد كشفت الثورة الكمية المعنى الأصيل لحد "الجسيم" بتقسيمه إلى عدة أنواع من الجسيمات الكمية، ولكن ظل المفهوم الكلاسيكي للجسيم لم يستسلم تماماً، فقد ظل عدد كبير من الجزيئات أو جسيمات الغبار الماكروسكوبية

(١) انظر: Perkins 2000,162-192, Povh et al. 1999,107-111, and sec.8.3

مرتبطاً بالنماذج التقريبية للمفهوم (CP)، حتى في حالة هذه الجزئيات الماكروسكوبية قد تكون مثالية صرفة فإنها تتصرف كلاسيكياً ومع هذا فإن الخط الفاصل بين المفاهيم الكلاسيكية والكمية يكون متشاكلاً (فازي)، فالفلورينات أي جزئيات C_{60} تمر خلال شق مزدوج وتولد أنماطاً تداخلية كما لو كانت إلكترونات أو فوتونات.

المفهوم الجسيمي هذه الأيام يختلف كثيراً عما كان في الأيام الأولى للفيزياء الذرية، فلم يثبت حد "جسيم" طويلاً ولكن كان له العديد من الاستعمالات التي اعتمدت على المحتوى النظري والتجريبي ويؤخذ بالذهن قائمة بالمفاهيم الجسيمية تم تطويرها سابقاً، وقد نسأل بعد كل هذا ما ملامح الجسيم السائدة؟ هل يوجد أي سبب جوهري وراء الاستعمالات المحيرة لحد "الجسيم" في الفيزياء السارية؟ أو لنضع ذلك في كلمات أخرى:

هل يوجد أي مفهوم جسيمى عام قد يعتبر "كسبب جوهري معمم" للمفهوم الجسيمى الكلاسيكى، مثل ما قيل فى خط فلسفة بور للتنامية واقتراحات هايزنبرج لاستعمال التناظر للمفهوم الجسيمى؟

لقد استعمل الفيزيائيون حدًا رئيسيًا كمصطلح غير صوري بلغة معتادة ترمز لعدة ظواهر ومفاهيم فيزيائية. فلا ترجع "جسيم" فقط لظواهر ذرية و نووية وفيزياء الجسيمات محدثة المفهوم الإجرائي للجسيم (OP). وأيضاً ترجع للوسائل الرياضية للنظريات الكمية المتنوعة مثل مفاهيم الدوال الموجية في (QM) والفوتونات (LQ) وكمات المجال الأخرى (FQ) والجسيمات الافتراضية (VP) وشبية الجسيمات (QP). في حالة كمات المجال الحقيقية وأشباه الجسيمات فإن العلاقات بظواهر أشباه الجسيمات

التجريبية والمفهوم الجسيمي العملي يكون بعيدًا عن الوضوح لكنه لا يزال هناك، و فقط يكون مفقودًا في حالة الجسيمات الافتراضية التي لها هذا المحتوى العملي، وهناك يكون حديث الجسيم مجرد الإخبار عن حكاية تخيلية حول ما ذهبت به الافتراضية داخل الصندوق الأسود للتشتت (حتى لو أن هذه قصة دقيقة مع دقة رياضية داخلية بالغة ونهاية تجريبية محظوظة تقع في تنبؤات احتمالية انتقالية).

وعلى نهاية الطرف الآخر مجموعة من المفاهيم الجسيمية النظرية (GT) غير نوعية للجسيمات ولكنها تطبق لحلول معادلات المجال.

توضح هذه الاستعمالات المتنوعة التشابه الفصلي في مفهوم فيتجنستين. ولكن التجميع لهذه الفصيلة للمفاهيم الجسيمية يكون بغير الوسائل التحكمية، وفي الفصائل البيولوجية يعتمد التشبه لأعداد الفصائل على مجموع الصفات الموروثة. وينشأ كل ذلك في اتجاه أو آخر إما من مفهوم الجسيم الكلاسيكي أو من قوانين القياس المصاحب، وما زالوا مربوطين معًا بدلالة الكميات الفيزيائية الشائعة الكتلة و/أو الطاقة والشحنة أخيرًا ويوجد المزيد من العلاقات، الأعداد الكمية للفصيلة المربوطة مع بعضها بتقديم إضافات اللف عن طريق تكميم الخواص الديناميكية ما عدا الكتلة عمليًا، فهذه الكميات التي تقابل رصدًا جسيميًا أو قياسًا موضعيًا تبعًا للمبدأ الجسيمي العملي، فيمكن للحالات السابقة ذات الخصائص الديناميكية أن تتمركز ويكون هذا التمرکز غير معتمد على بعضه البعض وتشارك جميع المفاهيم الجسيمية (عدا الجسيمات الافتراضية) خاصية عدم الاعتماد وإحصائيًا عدم وجود علاقات متبادلة.

إن عدم الاعتماد هي خاصية جسيمية صرفة^(١)، فهي تضمن عدم الاعتماد إحصائياً للجسيمات غير المرتبطة، حتى لو تغيرت إحصائياً في الانتقال إلى فيرميونات وبوزونات نظرية الكم، أما فيما يتعلق بمكونات المادة التي تكون النظم المقيدة، وهي تعكس اندهاشاً بأن الكواركات حرة تقاربية خطية وغير معتمدة في مستوياتها المربوطة وطبقاً لهذا فإنها تعتبر جسيمات، ويتضمن مفهوم المجموعة الجسيمية النظرية (GT) عدم الاعتمادية أيضاً، حتى لو كان فقط في تطبيق المجالات غير المرتبطة، الجسيمات التي تأتي من حالات (GT) بدلالة الخصائص الديناميكية للكتلة واللف الندية وبعض عموم الشحنات وتتعلق بهذه الخصائص الديناميكية للتماثلية وقوانين الحفظ لنظريات ما وراء المفاهيم الجسيمية المتنوعة، أما بالنسبة إلى التمرکز (الموضعية) ونظرية المجموعة سواء غير متضمنة ولا تحول دونها (لا تعوقها).

من ثم، فعندنا السلسلة التالية لعموم المفهوم الجسيمي الكلاسيكي:

$$(CP) \rightarrow (QM), (LQ) \rightarrow (FQ), (QP) \rightarrow (GT). \quad (6.18)$$

على اليسار توجد الجسيمات الكلاسيكية، وعلى اليمين توجد المجالات، وفي الوسط هي الأعضاء الأربعة لفصيلة الكم (لا توجد علاقاتها بالضبط هنا، ولكن بوضوح عممت كمات المجال وأشباه الجسيمات لكل من كمات الضوء وجسيمات ميكانيكا الكم). ولم يكن بينها مفهوم الجسيم الافتراضي، وهو فقط عضو الفصيلة الذي حاد. الجسيمات الافتراضية لم تكن متمركزة

(١) التي لها معان متنوعة لم يتم تناولها بالتحليل هنا سيتم مناقشتها في الاستنتاجات العامة في هذا الكتاب (الفصل الثامن الفقرة ٨-٥).

ولا معتمدة على بعض ولا تعمل بأهمية حفظ الطاقة، وبالتالي لم يعتبروا عادة منتمين للجسيمات الفيزيائية. يجب أن نميل للتفكير بالشيء نفسه لأشبه الجسيمات، ولكن بالوضع التناقصي للجسيمات الافتراضية وأن سلوكها يكون في عدة اعتبارات مثلية للجسيمات الفيزيائية تقريباً، ونتيجة لهذه الأسباب جميعها يجب أن تكون الجسيمات الافتراضية متضمنة في مفهوم الجسيمات الفيزيائية، ولكن يتضمن أشباه الجسيمات، ومن ثم يجب أن نفرق المفهوم الجسيمي العام عن مفهوم الجسيمات الفيزيائية جاعلين هذا التفريق يبيد الخصائص التالية لتكون مثلية للجسيمات.

(GP) الجسيمات العامة؛ هي:

(MESQ) تجمعات الكتلة m والطاقة E واللف s والشحنات q_i .

(DISC) عدم الاتصال؛ أي أنهم يأتوا في كمات.

(PP) الجسيمات الفيزيائية هي إضافة:

(INDEP) غير معتمدين على بعضهم.

(CONS) موضوع لقوانين الحفظ، و (على نحو مشجع)...

(LOCPD) موضعياً (تمركزياً) عن طريق العدد الجسيمي.

لقد نوقشت خصائص (MESQ) (أو بعض قوائم الخصائص الديناميكية قصرت أم طالت) الموزعة عن طريق مفاهيم جميع الجسيمات في هذا الفصل، وقد أسهمت الـ (DISC) عن طريق جميع مفاهيم الجسيم الكمية مثل الخاصية الرياضية التي يعبر عنها بمضاعفات ثابت بلانك أو بعض الشحنات

الأولية، ومع هذا، تأتي الجسيمات الكلاسيكية أيضاً في هيئة كمات معينة للكثلة والشحنة وتكون (DISC) فقط في نظرية المجال الكمي حالة بديهية مكتسبة، وهنا تتبني على قواعد الاستبدال (التعديل) لمعاملات التخليق والإفناء.

لقد قيد مفهوم الجسيم الافتراضي (VP) كلاً من (MESQ) و (DISQ). وشاركت مفاهيم الجسيمات الفيزيائية على الأقل في إضافة على الأقل (INDEP) و (CONS)، ولقد عبرت هذه الأنواع الأربعة معاً بكثير من الاعتناء للخصائص عن الميتارياضيات (ما وراء - الرياضيات) والبناء الجبري الذي يهتم الفيزياء السارية وطريقة الكشف عن تكوين النظرية. إن (MESQ) و (CONS) يقتربا بعلاقة بالمبادئ الموحدة التي تمت مناقشتها في الفصول القليلة الأخيرة وعلى وجه الخصوص المناقشات البعدية والتمائليات وقواعد الانتقاء الفائقة^(١).

ففي (MESQ) تعتبر الجسيمات تجمعية ناهيك عن حاملات لهذه الخصائص، وهذا في اتجاه المفهوم الإجرائي للجسيم ولا يمكن قياس الحاملات الميتافيزيقية لهذه الخصائص. عملياً، تم تصوير الجسيمات كتجميعات لخصائص ديناميكية معينة والتي تتجه بثبات معاً تحت ظروف تجريبية معرفية جيداً، وفي المفهوم المقترح هنا للجسيم العام يظل تصوره كعناصر لوكين التجريبية أو مجموعة حزم من الخصائص، هذا المفهوم يكون ميتافيزيقياً معتدلاً، ولكن ليس ممتنعاً. حتى مفهوم الجسيم التحرري يجب أن يكون ميتافيزيقياً فإنه يبنني على الاعتقاد الواقعي أنه توجد دقائ

(١) انظر الفصل الرابع (فقرة ٤-٢) والفصل الخامس (فقرة ٥-٤-٣).

تظهر كرزوم أو حزم مستقرة من خصائص الظواهر، وقد تم التأكيد في هذا الفصل، فقرة (٦-٣) أن هذا يكون تراكبًا ميتافيزيقيًا لمفهوم الجسيم العملي، وتستطيع التجمعات المستقرة فقط للخصائص الديناميكية أن تحدث إعادة إنتاج للتجارب وهذا الافتراض يحتوي المذهب الواقعي أو الحقيقي للخصائص المقترحة في فقرة (٦-١) ولكنها ما زالت هي الأقوى، وتتطلب ارتباط الخصائص الديناميكية للجسيمات دون الذرية لتقيد معًا بخاصية الرزم مع حالة الأنواع الطبيعية^(١)، وبوضوح فإن هذه الوضع الضعيف للميتافيزيقا المعتاد للعناصر، ونتيجة للفقد الزماني- المكاني الانفرادي وعدم التمييز لجميع الجسيمات الكمية فإن الحاملات الميتافيزيقية للخصائص تتلاشى ولكن تترك بعض غراء (وسيط لاصق) ميتافيزيقي يجعلها ملتصقة معًا، وهذا ما بقي مستعصيًا للمفهوم المعتاد للعنصر في فيزياء الجسيمات.

ومع هذا، لم يتسق هذا اللاصق الميتافيزيقي المربوط بأساس تجريبي للمفهوم الجسيمي الذي ظهر في الفصل الثاني، وانعكس ذلك عن طريق (LOCPD) وجاء التنبؤ بترتيبات حتى لو أنهم لم يعملوا حقيقة في المجال الكمي^(٢). وهنا كانت الخاصية الكلاسيكية متمركزة موضعياً بصفة عامة، وأخذ في الحسبان الإمكانات الإجرائية للإلكترونات الموجودة والفوتونات والكميات الكمية الأخرى بوسائل العدادات الجسيمية، وهنا مرة أخرى فإن

(١) تُعد الأنطولوجيا المجازية موضوعًا مرتبطًا بالمقاربة الأنطولوجية. انظر على سبيل

المثال: Seibt2002

(٢) لأن الترتيبات تفهم في المعتاد كعلة موضعية قوية بينما تكون الظواهر الكمية وأسبابها غير موضعية.

الفكرة الأساسية تكون في الشيء المتمركز عن طريق قوانين الحفظ (CONS) فوق كل الطاقة المحفوظة. وإجراءً، فإن الجسيم المخلف مساراً يكون لا شيء سوى تكرار التمرکز للكميات الديناميكية المحفوظة فهذا يكون عددًا وافرًا؛ حيث لا تستطيع سوى تفكير قابلية التكرار هذه إلا كمؤشر لوجود شيء ضمنى أو أساسى، ولكن هذا ليس كثيرًا جدًّا وقد يعتبر المفهوم الجسيمي لاعبًا لدور أساسى في مبادئ مخططات "كانت" للجوهر. فطبقًا لكانت يمكن تفسير الجوهر في العلوم الفيزيائية بدلالة الكميات المحفوظة^(١).

وبقية أخرى لا يستغنى عنها في الميتافيزيقا المعادة للعنصر تتمثل في خاصية عدم الاعتماد (INDEP)؛ ففي الميكانيكا الكلاسيكية تتضمن أن الجسيمات عبارة عن أشياء موجودة تمثل نفسها، تتشابه مع الطريقة نفسها التى تصور فيها كل من "ديكارت أو لايبنتس" بشيء من الاختلاف للعناصر. بالنسبة إلى معرفتي بهذه الخاصية الحاسمة لعدم الاعتماد (INDEP)، فإن مظاهرها المتنوعة وتقييدها الكمية تم إهمالها تمامًا في المناقشة الفلسفية لمفهوم الجسيم. فمن أحد الجوانب تقرب علاقتها للخصائص الإحصائية من أنواع متعددة من الجسيمات. ومن الوجهة الأخرى فإن مفهومها الواسع فى كونها غير مزدوجة فإنها تكون جسرًا لما بعد-النظري بين مفاهيم الجسيم والمجال^(٢). ففي المفهوم الجسيمي الكلاسيكي (CP) للفصل السادس (فقرة ٦-١) الذى نص على خاصية عدم الاعتماد كما يلي فى معظم الفهم العام.

(١) انظر:

Kant 1786, A116 (Akad.4.54-542) and von Weizsacker 1971, 383-404.

(٢) نستطيع أن نفكر بأن غير الأشباه النقطية للتفاعلات تُعد جسرًا آخر لما وراء النظرية بين الجسيم ونظريات المجال وهي الخاصية (POINT) من المفاهيم الجسيمية التى =

(INDEP) عدم الاعتماد يعني أن الجسيمات (UNCOUP) قد تكون غير متفاعلة أو مستويات غير متقارنة و(UNCORR) شروطها الابتدائية غير مرتبطة بعلاقة متبادلة.

في الميكانيكا الكلاسيكية يستنتج المظهر الثاني لعدم الاعتماد من المظهر الأول وفي الحقيقة فإن خاصية عدم الاعتماد تقترب أيضًا علاقتها بالملاحم التركيبية للطرق التجريبية المشروحة في (فقرة ٢-٢) كما في أهداف التحليل السببي والمجرد ولكن كلا من (UNCOUP) و(UNCORR) هما أكثر من مجرد إضافة، فإذا كان عدم الاعتماد للأنظمة والأشياء الفيزيائية غير متحقق بدرجة معينة في الواقع التجريبي فإن تجارب الفيزياء ستصبح غير ممكنة ولا يمكن الدفاع عن مفاهيم الديناميكا الفيزيائية. ومع هذا، ففي المجال الكمي هو والمفهوم الجسيمي الكلاسيكي تنهار خاصية عدم الاعتماد بتوؤة. أيضًا، ومع المفاهيم الجسيمية الكمية تصبح مختلفة. فمبدئيًا تعتبر الجسيمات غير متفاعلة أو غير متقاربة، وهذا بالافتراض (UNCOUP) يكون حاسمًا لمجموعة المفهوم الجسيمي النظري (GT) دون أن يكون لها أي نظير إحصائي (UNCORR). وعلى نحو مضاد في المفهوم الإجرائي للجسيم (OP) عدم الاعتماد يعني فقط أن يحصر الجسم الفرد

تمت مناقشتها فيما قبل بعاليه، ومع هذا فإن معناها يعتمد بشدة على النظريات الأساسية؛ وهي تحتوي على المفاهيم الموثوق فيها جدًا للموضعية والسببية، وهذه النقطة سوف تأتي في البند التالي من هذا الفصل، وإنه من السهل كثيرًا توضيح عدم الاعتمادية في الحدود البعد- نظرية التي تسمى بدلالة سلوك التفاعلات الحرة والسلوك الإحصائي لعدم الارتباط بعلاقة متبادلة موضحة.

ويكون غير مرتبط بعلاقة متبادلة في مفهوم (UNCORR)، مشيرًا إلى عدم الاعتماد الإحصائي للأحداث المفردة بأن تصنع أداءً كمياً موحدًا ولكن هذا ليس كل شيء، ففي نظرية الكم يصبح كلا المظهرين لخاصية عدم الاعتماد الكلاسيكية في نهاية الأمر في حالة إشكالية تحتمل النقاش. في أول لمحّة يبدو العكس فهو الحالة؛ حيث تكون نتائج القياس الكمي إحصائيًا في حالة عدم اعتماد إذا كان القياس غير متكرر، إلا أن هناك إضافة إذ توجد قيود عديدة على (UNCORR) و / أو (UNCORR):

١- تحل إحصائيًا فيرمي وبوز محل الإحصاء الكلاسيكية، وهذا يعني أنه يوجد بعض المستويات الكمية الممكنة أقل من المستويات الكلاسيكية، إضافة إلى عدم التماثلية أو التماثلية لدالة الميكانيكا الكمية عديدة الجسيمات الخاصة بالنظام المربوط المحدث للتأثير الديناميكي يسمى بما يطلق عليه دون تبادل الطاقة إلى طاقة نظام عديد الجسيمات.

٢- في النظام الكمي المعقد نتيجة قوانين الحفظ الخاضعة لشروط تجريبية معينة لم يطل الحصر الجسيمي غير المرتبط بعلاقة متبادلة والمثال المعروف جيدًا هو ترابطات EPR^(١)، والآخرون هم ماحون الكم والتي أخذت تجاربهم الطريق حديثًا ونوقشت في الفصل السابع (فقرة ٧-٥).

٣- ما بعد نظرية الاضطراب للرتبة الأولى تكون نظرية المجال الكمي في احتياج لإعادة تطبيع، وبسبب مفهوم عدم الاعتماد فإن الجسيمات غير المتفاعلة لا يطول الدفاع عنها.

(1) Einstein et al. 1935, Aspect et al. 1982.

ومع ذلك، فإن شبيهة الجسيمات في فيزياء المادة المكثفة قد برهن كيف نشأ من التأثير التجمعي في الجوامد، وقد ظهر شبيهه جسيم لشبه عدم الاعتماد جديد، وبوضوح فإنه أساس للقيود السابقة (UNCROUP) و(UNCORR)، أيضاً.

قابلة التمركز (موضعيًا) تكون حاسمة للمكون الإجرائي للمفاهيم الجسيمية (CP) و(QM) و(LQ) و(FQ) و(GT). وقد انتهكت عن طريق الكواركات وبصفة عامة في المجال النسبوي. ومع هذا، فقد أوضح نموذج الكوارك مثل مفهوم شبيهه الجسيم (QP) أنه لم يعتبر اليوم طويلًا بقابلية الموضوعية كضرورة للخاصية الجسيمية في حالة الكواركات، وأن قواعد الجمع للخصائص الديناميكية وكمية الحركة وسلوك التشتت شبه النقطي في مجال طاقة معينة والحكايات السببية المصاحبة لأحداث (الجيت - النفاثة) تعتبر كافية.

وحتى في حالة أشباه الجسيمات فإن حالة كمية الحركة الحادة تكون كافية ويوضح تركيب مستويات شبه الجسيم أنه في المجال الكمي قد صنف عدم الاستمرارية بأعلى من قابلية التمركز. وأن الفونونات وأشباه الجسيمات الأخرى تكون غير مستمرة بمثل طريقة الفونونات، فإنها تكون متمركزة (موضعيًا) في كمية الحركة المكانية (الفراغية) وتحت ظروف معينة فقط تصبح أشباه الجسيمات تقريبًا موضعية في نطاق مكاني، وبالمثل فإن الفونونات تصبح فقط تقريبًا موضعية في العداد الجسيمي، ومع ذلك نتيجة خاصية عدم الاعتماد وقوانين الحفظ التي أوجدت قواعد الجمع بما قد يعتبر جسيمات فيزيائية، وتحت شروط حدودية معينة وجدوا في مستويات موضعية

تقريبًا أو (في حالة الكواركات) كأجزاء مكونة غير مستمرة لأنظمة مربوطة قابلة للموضعية.

وكما تم ذكره ففي أي نظرية كمية تفضل مستويات كمية الحركة، ودون تفاعلات، فإن الجسيمات الكمية تكون بالأحرى موضعية في فضاء كمية الحركة عن كونها في محاور زمنية - مكانية، القياسات الموضعية هي تفاعلات مع العدد الجسيمي، ودونها يتقدم مستوى ميكانيكا الكم تجاه الموجة المستوية ودون معدة القياس الماكروسكوبي الموضعي لا يمكن إعادة تحديد لنوع الجسم نفسه خلال القياسات المتتالية لمسار الجسم^(١) إضافة إلى أن تمركز الجسيمات في نطاق مكاني - زمني محدد يكون على ميزة بنظرية الكم النسبوية^(٢).

بالتأكيد اعتنت الفيزياء دون الذرية بالتجميع غير المترابطة (غير متصلة) وغير المعتمدة والتمركزة (موضعيًا) لكل من الكتلة - طاقة واللف والندية وبعض الشحنات العامة ولكن لا توجد نظرية بقبول شامل لهم، الشيء الموجود (إذا وجد) له سمات أساسية للمجال مفضل على الجسيم، ولكن يجب الحرص لشدة النظر لأي نظرية في طبيعة وجود المجالات الكمية غير المتفاعلة، بقدر ما أستطيع رؤية قواعد التحويل فإن معاملات المجال تحول دون وضوح أي تفسير فيزيائي للمجال الكمي نفسه، وما يبقى كون التفسير الاحتمالي المعتاد لنظرية الكم، وتطبق للمصفوفة - s؛ أي

(١) انظر: الفصل السادس (فقرة ٦-٦).

(٢) انظر: Clifton and Halvorson 2002

للتفاعلات وحدها^(١)، بالإضافة إلى بقاء التأثيرات الجمعية للجسيمات الافتراضية، ويمكن قياس أوارها في ديناميكية تركيب مكونات المادة^(٢)، ويكون مجال الكم الأساسي غير موضعي؛ لأن تركيبه النسبوي يكون غير مقارن مع المستويات الموضعية. تأسست مناقشة المفاهيم الجسيمية في أقسام الفصل السابق على التقريبية، فمفهوم الجسيم الافتراضي يكون جزءاً تاماً للطريقة التقريبية، وتحتوي جميع المفاهيم الجسيمية الأخرى على عدم الاعتماد، ولكن لا يوجد شيء فيزيائي أو نظام في الكون يكون في عدم اعتماد حقيقي، ويكون فرض عدم الاعتماد تقريبياً والذي كان مصححاً في آخر تحليل، مثل مسائل إعادة تطبيع نظرية مجال الكم وتوضيح فيزياء المادة المكثفة وهذا يعمل فقط بالنسبة إلى مسائل عديدة للرتبة الأولى في نظرية الاضطراب، ومع هذا، وفوق ذلك لا تعمل نظرية المجال كل عمل، ولا يكون للمجالات النسبوية مستويات موضعية، وربما يحيل الجمع العملي والبيهي للفيزياء الحالية الشخص المهم إلى أي نظرية في طبيعة المذهب التعددي، وعند هذه النقطة فإن الخاصية المزدوجة الموجية الجسيمة تحتاج إلى إعادة الدراسة.

(١) يُحايي هذا مع غيره من السمات الإجرائية الأخرى لنظرية مجال الكم الأنطولوجيا العلاقاتية. انظر: Fallkenburg2002a، ويتعين عند هذه النقطة البدء في مناقشة الجوانب الأنطولوجية لنظرية مجال الكم. انظر:

Brown and Harre 1988, Auyang 1995, Cao 1999, Kuhlmann et al.2002.

(٢) لقد أصبح هذا مهماً في نموذج كوارك-بارتون عند طاقات التشتت العالية؛ حيث ما يسمى بحر الكواركات والجلونات تساهم في اللف وكمية الحركة للبروتون والنيوترون.

ازدواجية الموجة - الجسيم

يستخدم العديد من الفيزيائيين هذه الأيام المصطلحين "الجسيم" و"المجال" بالترادف بدرجة أو بأخرى. وهذه نتيجة واضحة لتحويلات مفهوم الجسيم المناقش بالفصل الأخير. بدأت فيزياء الجسيمات من المفهوم الكلاسيكي للجسيم ووصلت إلى المفهوم النظري للمجموعات والذي يتعامل مع الكميات الديناميكية المحفوظة للمجالات. فالجسيمات الكمية التي نوقشت في الفقرة (٦-٢) والفقرة (٦-٤) ليست جسيمات ولا مجالات بالمعنى الكلاسيكي، ولكنها كانت ذات ملامح شبه موجية وشبه جسيمية. ووصفت أنظمة ميكانيكا الكم بدلالة الموجات المستوية والحزم الموجية المتموضعة بشكل أكثر أو أقل حدة. وقد تكون المجالات الكمية إما في حالة عددية تمامًا أو في حالة طورية معرفة جيدًا، ولكن لا تكون كلتا الحالتين في الوقت نفسه. فبالنسبة إلى الفوتونات تكون الحالات المتلازمة بأقل قدر من الصرامة، والطورية تكون أقرب ما يمكن لوصف المجال الكلاسيكي.

إن السمات الزمكانية والديناميكية الغامضة للجسيمات الكمية غالبًا ما يتم التعبير عنها بدلالة "ازدواجية الموجة-الجسيم". على حين قد يظن بعض فلاسفة العلم أن هذا أمر مهجور، فإن ازدواجية الموجة-الجسيم في فيزياء الكم مفهوم معاصر تمامًا. حتى إن العديد من الفيزيائيين يفضلون استخدام

مصطلح "موجسيم" "wavicle" ليُشير إلى جُسيمات ما دون الذرة وسماتها الشبيهة بالموجة. إلا أن هذا ليس مفيداً؛ لأنه يحجب المعنى الدقيق لازدواجية الموجة الجُسيم بدلاً من الكشف عنه.

إن ازدواجية الموجة-الجُسيم مفهوم غير صوري. إنها لا تنتمي إلى أي نظرية كم مُحددة. والأحرى أنها تُعبر عن الطريقة التي يتحدث بها الكثير من الفيزيائيين عن مرجعيات زائفة لأي نظرية كم. من هنا فإنه مفهوم بعد-نظري يُستخدم لتفسير نظريات الكم المُعاصرة، أو هو مفهوم فلسفي. لكنه ينتمي إلى ممارسة فيزيائية. والهدف من هذا الفصل بحث سميانطيقا هذا المفهوم. ووظيفته في الممارسة الفيزيائية أمر مُتفرد. إنه يقوم بربط الجوانب البديهية والإجرائية والمرجعية لمفاهيم الكم المُنفصلة، مع الأخذ في الاعتبار أن وظائف الموجة لنظرية الكم لها فقط معنى احتمالي. وعلى وجه التحديد، فإن مفهوم ازدواجية الموجة-الجُسيم يعبر الفجوة بين التفسير الاحتمالي والعمليات دون الذرية الفردية التي تحدث في أدوات القياس. ولسوف نرى أن هذا يُعزى جزئياً إلى تفسير بورن الاحتمالي لدالة الموجة الميكانيكية الكمية، وجزئياً إلى تفسير بور التتامي لظواهر الكم الفردية.

لقد تطورت دلالات ازدواجية الموجة-الجُسيم مع فيزياء الكم، وتحتم فحص النسخ المعدلة للمفهوم فيما يلي. إن الخلفية التصويرية والإجرائية لازدواجية الموجة-الجُسيم هي الافتراضات الكمية الضوئية لأينشتين، والموجات المادية لدى بروي، وما يُناظرها من الظواهر الكمية (فقرة ٧-١)، وبعد ظهور ميكانيكا الكم جاءت الخاصية الموجية الجسيمية بمظاهر أكثر حداثة لتؤدي دوراً في المشهد، وتلك العلاقات المُتصلة بالتفسير الاحتمالي

لبورن بالنسبة إلى ميكانيكا الكم وعلاقات عدم التحديد لهايزنبرج ومبدأي بور لقاعدة التناظر والتتام أصبحت أكثر تأثيراً (فقرة ٧-٢). وقد استعملت حسابات بورن للاحتمالية الموجية والرصد الجُسمي في الفيزياء العملية حتى يومنا هذا، وقد ميز الاتجاه البراجماتي بين الموجات والجسيمات كما يلي: تم تحضير الموجات في فيزياء الكم ولكن الجسيمات يتم رصدها أو عددها، وتعتمد هذه النظرة على اللاتماثل بين العمليات التجريبية لإعداد أنظمة الكم وعددها، وقد نوقشت اللاتماثلية لتجربتين رائعتين هما بالتحديد: تداخل شعاعي ليزر يولدان فوتوناً واحداً فقط (تجربة بفليجور - مانديل ١٩٦٧) والاستقطاب المُتتالي للفوتونات الفردية في التراكب المتغير فقرة (٧-٣).

وفي البصريات الكمية الحديثة، أعيد اعتبار التجربة الفكرية الشهيرة باستخدام الشق المزدوج في مناظرة بور - أينشتين والضوء المجهرى لفابنمان. في عام ١٩٩١ اقترح "سكلي و إنجليرت ووالثر" تجربة الشق المزدوج مع معلومات المسار (الذي مهد طريق التجربة) ومحاكاة كمية، وكانت فكرتهم في تخزين مسار المعلومات عن طريق وسائل التعقيد الكمي مقابل تراجع الشق الطولي لأينشتين وادعاء فابنمان بأنه يستحيل قياس المسار خلال الشق الطولي المزدوج دون أي انتقال لكمية حركة واقعية وإيجاد طريق حول مبدأ عدم التحديد لهايزنبرج، ونتج عن هذا المناظرة حول التساؤل عما إذا كان مبدأ تناميّة بور يكون رئيساً أكثر من علاقة عدم التحديد لهايزنبرج. وكمحاوله لفض هذا السجال فقد تم تطوير ما يسمى بعلاقات الازدواجية فقرة (٧-٤) وعن طريق التجارب الحديثة التي حققت مقترحاً سكلياً لتجربة التداخل مع معلومات المسار والمحو الكمي في عدة

طرق: استعمال مقياس التداخل لماخ- زهنر (مجموعة ou عام ١٩٩٠) ومقياس التداخل الذري مع موجات الضوء الموقوفة (مجموعة Burr, ١٩٩٨a,b)، (Rempe, Durr عام ٢٠٠٠) والشق الطولي المزدوج بـضوء رُبع موجي مُستقطب دائرياً (والبورن وآخرون ٢٠٠٣) فقرة (٧-٥). اتضح في نهاية المطاف أن ازدواجية الموجة-الجسيم ليست مهجورة، بينما أخفقت الأفكار الميتافيزيقية التقليدية حول الجسيمات الميكروسكوبية. ويكمن أحد الأسباب في وجود حالات للكشف عن الجسيمات يستحيل أن نصيغ لها قصة عليّة واضحة المعالم. ويتمثل السبب الثاني في أنه لم يعد ثمة مفهوم غامض للعليّة، ولكن تعددية للمفاهيم العلية فقرة (٧-٦).

٧-١ جسيمات الضوء وموجات المادة

تاريخياً، ترجع ازدواجية الموجة-الجسيم إلى لوي دي بروي. بحث دي بروي في التركيب المفهومي للجسيمات والموجات التي توحد المادة والضوء. في أطروحته عام ١٩٢٣، قدم بروي فرضية أن المادة لها خصائص شبيهة بالموجة مماثلة بشكل كامل للجوانب الجسيمية للضوء^(١). وعلى حين اعتُبرت الجوانب الجسيمية للضوء مثبتة جيداً منذ بُرهان أثر كومبتون في تجربة الارتداد بوث وجايجر^(٢)، فإن الجوانب الموجية للمادة ليست كذلك.

(١) انظر Wheaton 1983, 286-301.

(٢) انظر الفصل الثالث فقرة (٣-٢-٢) و Wheaton 1983, 279-281، وأيضا

Greenstein and Zajonc 1997, 23-35، وملاحظاتي في نهاية الفقرة (٣-٢-٢).

ومع هذا، فإن عددًا من الفيزيائيين لا يزالون يحاولون تجنب هذه الافتراضات. وخاصة نظرية بور-كرامارز - سلانتر (BKS) لظاهرة كومبتون التي تستحق الاهتمام. فقد تجنبت الفروض الكمية للضوء على حساب التخلي عن حفظ الطاقة للعمليات المنفردة⁽¹⁾، وحقبة فإن وجود جسيمات الضوء وموجات المادة قد استقر أمره فقط في سياق وجود عديد من التجارب وعلى سبيل المحاولات نحو التوجه النظري، ومع ذلك، فإن فروض دي بروي للموجات المادية قد خطت خطوة حاسمة تجاه ميكانيكا الكم. وقد أخذت في الاعتبار الميكانيكا الموجية لشروندجر وتفسير بورن الاحتمالي لمربع سعة الدالة الموجية، وبعد ظهور ميكانيكا الكم عام ١٩٢٧ ومشاهدة دافيون وجيرمر لأهداب التداخل في تجربة حيود الإلكترون والتي أعطت في النهاية دعماً لفروض موجات المادة، وفي العام نفسه عبر بور عن ازدواجية الموجة-الجسيم بدلالة التتام في محاضراته الشهيرة- كومو-como⁽²⁾.

لقد أوضح التطور التاريخي أن ازدواجية الموجة-الجسيم وضعت خطوة للأمام على الأرضية البديهية والعملية، وقبل ظهور ميكانيكا الكم كان يوجد فقط الأساس الصوري لازدواجية الموجة-الجسيم لفروض الكم

(1) Bohr et al.1924.

عمل بور على هذه النظرية بعد أن حصل أينشتين على جائزة نوبل عن فرضية كم الضوء. انظر:

Jammer1966,183-187; Wheaton 1983, 281; Beller 1999.

تم بحث دور نظرية BKS في تطور فكر بور في Pringe 2006.

(2) Bohr 1928. انظر الفقرة ٧-٢-٢.

الضوئي لأينشتين وإدماجها في قوانين الحركة النسبوية وفروض دي بروي لموجات المادة، والقوانين القاطعة هي علاقة بلانك - أينشتين⁽¹⁾ $E = hv$ ، وعلاقة أينشتين - دي بروي⁽²⁾ $p = \hbar k$ وتصل هذه القوانين خصائص الجسم الكلاسيكية بخصائص الموجة الكلاسيكية، فهي تصل الطاقة بالتردد وكمية الحركة بالطول الموجي، وفي الحاضر ترتبط بميكانيكا الكم والديناميكا الكهربائية الكمية، وبالتالي فإنها قد تعتبر أساساً صورياً غير خلافي لازدواجية الموجة-الجسيم حتى يومنا هذا.

عملياً، تم التأكد على ازدواجية الموجة-الجسيم عن طريق الظواهر التجريبية لشبه الجسيم وشبه الموجة التي طبق عليها تلك العلاقات، لقد أثبتت ظاهرة كوميتون للضوء للخصائص الجسيمية التي تم التنبؤ بها عن طريق قوانين الحركة النسبوية حتى لو أن ظواهر الحيود الكلاسيكية أشارت إلى موجات الضوء. بالنسبة إلى المادة، فقد أشارت قياسات طومسون e/m والمسارات الجسيمية الملاحظة في الغرفة السحابية على أن أشعة الكاثود وأشعة α - ألفا كانت نتيجة جسيمات شحنية كتلية بينما شاهد دافيسون وجيرمر نمط الحيود عندما أرسلوا شعاعاً إلكترونياً خلال بلورة رقيقة من النيكل⁽³⁾ ومن ثم، فإن القاعدة التجريبية للازدواج الموجي الجسيمي هو إثبات تجريبي بأن المسارات الجسيمية أو أهداف التداخل قد تتولد من نوع المصدر الإشعاعي نفسه أو شعاع الجسيمات. لأي نوع توضح ظاهرة شبه-جسيمية

(1) Planck 1901, Einstein 1905

(2) Einstein 1917, de Broglie 1923.

(3) Division and Germer 1927.

في التصورات المبكرة للازدواجية الجسيمية- الموجبة انظر شكل (1-2) في الفقرة (1-5) الذي يوضح الانحراف المغناطيسي لحيود الإلكترون.

أو ظاهرة شبه موجية تكون معتمدة على الأجهزة التجريبية. ففي الغرفة السحابية أو الغرفة الفقاعية يولد شعاع الإلكترونات أو جسيمات ألفا α - مسارات جسيمية وأحداث تشتت، وفي عداد جيجر لأشعة جاما (γ) أو فوتونات عالية الطاقة تتولد طققة متتابعة، وفي المتعدد الفوتوني منخفض الشدة الضوئية تتولد نبضات كهربية متتابعة، وفي ظاهرة كومبتون يعطي الفوتون ارتدادًا للإلكترون فأفدًا طاقة ويخرج بتردد أقل وطول موجي أطول، ولكن عند الشق الطولي المزدوج يحدث حيود لأنواع الجسيمات المشحونة نفسها أو شعاع النشاط الإشعاعي أو الفوتونات محدثًا أهدابًا تداخلية تشاهد على الشاشة.

تأخذ كل النصوص التي تدور حول الازدواجية الموجية- الجسيمية للمحتوى التجريبي بأن الطريق الذي تتصرف فيه الأنظمة الكمية معتمدة على الطريق الذي تقاس به، وتحت ظروف تجريبية معينة تتصرف الإلكترونات أو الفوتونات بطريقة شبه جسيمية وتحت ظروف معينة أخرى تتصرف بطريقة شبه موجية، فنشأت علاقات بلانك - أينشتين وأينشتين-دي برولي $E = h\nu$, $p = \hbar k$ التي تتعلق بتلك الظواهر شبه الجسيمية وشبه الموجية بدلالة الكميات الفيزيائية التي يمكن قياسها.

٧-٢ الازدواجية الموجية - الجسيمية في ميكانيكا الكم

في ميكانيكا الكم والديناميكا الكهربية الكمية يعبر عن الكميات الفيزيائية بدلالة المشاهدات التي تقابل المعاملات في فضاء هيلبرت وفضاء فوك وهكذا. وتؤثر هذه المعاملات على الدوال الموجية أو شكل المجال وهي تخضع لقوانين التحويل مثلما في علاقات هايزنبرج لعدم التحديد. لقد

صاحبت ميكانيكا الكم الطول الموجي لدى بروي للجسيمات الكتلية مع دالة شرودنجر الموجية، وفي الديناميكا الكهربية، تعتبر الفوتونات كمات مجال لمجال ماكسويل الحر؛ حيث تكون كمية حركة أو طاقة الفوتون مصاحبة بعدد موجي لشكل مجال خاص، وكلا النظريتين تعبر عن مظاهر موجة الإلكترونات أو الفوتونات في حدود عملية لنتائج قياس منفردة؛ ففي الممارسة الفيزيائية يكون الربط فقط بين المستوى البديهي للدوال الموجية والمستوى العملي للرصد الجسيمي المنفرد في التفسير الاحتمالي المعتاد لميكانيكا الكم والديناميكا الكهربية الكمية وهكذا.

وبالتالي يجب مبدئيًا أن يتم شرح المفهوم الفيزيائي للازدواج الموجي-الجسيمي بدلالة التفسير الاحتمالي لنظرية الكم، وكان أساس ذلك في الأوراق البحثية المعدة لبورن في تفسير ميكانيكا الكم. ومع هذا، فقد أضاف كل من بورن وبور وهايزنبرج عدة أفكار أخرى، ولم تنته هذه الأفكار المناظرات الفلسفية فقط لميكانيكا كم ما بعد التفسير الاحتمالي فقط، ولكنها أصبحت مؤثرة في مجتمع الفيزيائيين، وذلك بالطرق التي قد يفهم منها الإزدواجية الموجية الجسيمية وضم مفهوم بور التتامي وشرح هايزنبرج لها بدلالة التناظر الكلاسيكي.

٧-٢-١ الاحتمالية الموجية لبورن

تعتمد الرؤية العملية الدقيقة لنظرية الكم على التفسير الاحتمالي لبورن وامتداده بواسطة فون نيومان حتى الوصول إلى القيم المتوقعة في ميكانيكا الكم. وطبقًا للتفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم^(١)، وطبقًا للتفسير الاحتمالي

(1) Von Neumann 1932.

لميكانيكا الكم فإن الدالة الموجية لشروندجر Ψ تكون لا شيء دون السعة الاحتمالية التي يكون مربعها $|\Psi|^2$ وهو كثافة الاحتمال، وتتنبأ بتوزيع احتمال نتائج القياس منفردة، وفي حال القياس الموضعي فإنها تنتبأ بالتوزيع الفضائي (المكاني) لحصر الجسيمات، ويكون التفسير الاحتمالي لنظرية المجال الكمي في تناظر تام (مماثل) وقد هبطت فقط نظرية المجال الكمي في سياق الفشل في النتائج التجريبية بدلالة مصفوفة S ، ولا تغير عناصر المصفوفة S - بشيء إلا من ساعات الاحتمالات الانتقالية.

عندما أوصى بورن بالتفسير الاحتمالي لدالة موجة شروندجر Ψ مع هذا ظل مرتبكاً حول العلاقة بين ملامح شبيهة الموجة وشبيه الجسيم في الظواهر الكمية، ففي ورقته المشتملة على التفسير الاحتمالي في ميكانيكية الكم قد أوضح المفاهيم الكلاسيكية للجسيمات والموجات (أو المجالات) وأدخلها للذهن عندما عبر عن الازدواجية الموجية - الجسيمية كالتالي:

المجال المرشد الذي يعبر عنه بالدالة القياسية Ψ [....] ينتشر طبقاً لمعادلة شروندجر التفاضلية، ومع ذلك فإن الطاقة وكمية الحركة تنتقل كما لو كانت كريات تحلق حولها⁽¹⁾.

هنا ميز بورن دالة شروندجر الموجية Ψ بدلالة شبه طيف (شبح) المجال المرشد للجسم أو التخطيط الموجي طبقاً لجامر المستمد من رؤية أينشتين للعلاقة بين الموجات الكهرومغناطيسية وكمات الضوء.

(1) Born 1926b,803. من ترجمتي.

"المجال المرشد" هنا هي الترجمة الحرفية للكلمة الألمانية "Führungsfeld".

اعتبر أينشتين مجال الموجة كنوع من "مجال شبح" [Gespen-sterfeld] والتي ترشد موجاته الفوتونات شبيهة الجسيم إلى مسارها مع فهم أن مربعات السعة (الشدة) تحدد احتمالية وجود الفوتونات أو كثافتها في الفهم الإحصائي المكافئ⁽¹⁾.

بالإضافة إلى ذلك فقد اعتبر بورن أن الطاقة وكمية الحركة المنقلة تكون متناظرة إلى تقدم اتجاه الجسيمات على طول مساراتها، وتم تناول تفسير هذه الأفكار بموضوعية في التقريب المتغير في مخبئات بوم⁽²⁾ (Bohm)، ومع هذا فإن هذه النتائج التي تمت تغطيتها سابقاً كما اتضح بعاليه لم تدعم مثل هذا التأمل، وطبقاً لهذا فإن Ψ نفسها لا معنى لها ولا توجد مسارات جسيمية ويكون مذهب التحديد على المحك، والذي له معنى فيزيائي فقط هو مربع السعة $|\Psi|^2$ حيث إن سعة الاحتمال Ψ تكون موجة وتسمى احتمالية الموجة:

[....] كما أظهرت وجة نظر بورن، فإن "الموجات" التي مثلت الحسابات الموجية الجسيمية بانتشار خلال فضاء هي "احتمالية موجات" مربع السعة للموجة عند أي نقطة في الفضاء معطية احتمالية وجود جسيم هناك⁽³⁾.

لقد جاء بورن بهذا التفسير لدالة شرودنجر الموجية في نموذج عملية التشتت، في هذا النموذج تكون Ψ هي الوصف الرياضي للموجة الحادثة

(1) Jammer 1971,41.

(2) Bohm 1952.

(3) Hughes 1989,302, 1954، لمارجينو "الكمون" لمارجينو 1954.

وبدت $|\Psi|^2$ معبرة عن تحديد احتمالية أخذ الجسيمات لكمية حركة - عند زاوية تشتت معينة، وفي هذا النموذج تم تزويد الازدواجية الموجية الجسيمية بأدوات كما يلي - النموذج يكون حاضراً في تشتت الجسيمات المشحونة على الذرات. (وهي تقابل تشتت رنرورد الكلاسيكي)^(١) فتوصف الجسيمات الداخلة عن طريق الموجة المستوية التي تحيد عند الذرة وتوصف نتائج التشتت بدلالة الجسيمات الخارجة التي تنحصر عند بعض زوايا التشتت، وبهذه الطريقة تتمنذج الجسيمات المنتشرة عن طريق حيود الموجة، وتتقدم الموجة طبقاً لمعادلة شرودنجر وهي تتنبأ بالتوزيع الاحتمالي للجسيمات المنتشرة، ففي النهايات الطرفية لتحديد عدة جسيمات يكون للمقدار $|\Psi|^2$ معنى تجريبي للتردد النسبي أو معدل العد الجسيمي، ولم توضح ورقة بحث بورن العلاقة بالضبط بين المفاهيم الاحتمالية والتردد النسبي، ولكن وضحت بدقة مع وجه النظر بأن $|\Psi|^2$ هي الارتباط النظري للتردد التجريبي النسبي لنتائج التشتت المنفردة أو للقياسات الناتجة.

وعلى النقيض لهذا المعنى الفيزيائي لـ $|\Psi|^2$ فإن أفكار المجال المرشد والكريات المتقدمة تكون افتراضية (خالية)، ويمكن عملياً أن ننسى كل التخمينات حول الموجات المرشدة الرائدة أو المسارات الجسيمية؛ حيث لا يمكن قياسها، وهذا يقابل البناء الاحتمالي لميكانيكا الكم كما أكدها بورن في اتصالاته الأولية حول ميكانيكا كم التشتت.

(١) انظر الفقرات (٤-٢ : ٤-٤).

إذا ما نظرنا من منظور ما لدينا من ميكانيكا الكم فما من كمية في أي حالة فردية تكون سبباً في تثبيت نتائج تعارض ما؛ ولكن من الناحية التجريبية أيضاً ليس لدينا حتى الآن سبب للاعتقاد في أن ثمة خصائص داخلية للذرات تمثل شرطاً لنتائج مُحدد عن التصادم^(١).

وعلى أرضية التفسير الاحتمالي تكون الازدواجية الموجية الجسيمية هي ازدواجية احتمالية الموجات ورصد الجسيم، ومن وجهة النظر الإجرائية فإن خصائص شبيه الجسيم وشبيه الموجة للإلكترونات أو الفوتونات أصبحت بحق واضحة جداً، ففي قياسات دون الذرية الموضوعية المنفردة، يمكن قياس مسارات الجسيم وأحداث التشتت وخصائص شبه الجسيم للإلكترونات والفوتونات فقط وجسيمات دون ذرية أخرى. تتضح خصائص شبه الموجة فقط في احتمالية رصد مجموعة جسيمية عديدة. وبالنسبة إلى عدد كبير من القياسات الموضوعية فإن الموجات الكمية ومربعات سعاتها تتنبأ بالترددات النسبية (تكرار) للعد الجسيمي، ومن ثم فإن خصائص شبه الموجة للإلكترونات أو الفوتونات تقاس عند مستوى المجموعة الموحدة وتقاس خصائص شبه الجسيم عند نتائج القياس المنفرد، ولكي نلاحظ نمط الحيود خلف الشق المزدوج أو البلورة الرفيعة نحتاج للعديد من الرصد الجسيمي وقد ينشأ ذلك إما من شعاع ضوئي عالي الشدة لضوء الليزر والإلكترونات وهلم جرا ..، أو من شعاع ضوئي منخفض الشدة في تجربة الحيود والتي تجري خلال زمن طويل.

انظر (1) Born 1926a, 51; translation from Wheeler and Zurek 1983, 54.

الاستشهاد الكامل في الفقرة ٦-١

بالتالي أوصى تفسير بورن الاحتمالي لدالة موجة ميكانيكا الكم بالرؤية ازدواجية الموجية الجسيمية التالية. من الناحية الإجرائية ثمة جسيمات. يوجد بديهيًا مجالات وموجات. وتتنبأ الموجات بالتوزيع الاحتمالي للجسيمات. يوجد رصد جسيمي منفرد في تجارب التشتت. يوصف التشتت في ميكانيكا الكم ونظرية المجال الكمي بدلالة الدوال الموجية أو صيغ مجال الكم، ويتقابل الاثنان في مساحة مقطع التشتت.

هذه الرؤية قد يعبر عنها بدلالة المفاهيم الجسيمية غير (الصورية) والتي طورت في الفصل الأخير. وأحدث العد الجسيمي المفهوم الإجرائي للجسيم (OP) في فقرة (٦-٣)، وكان للروابط البديهية المتنوعة طرق لوصف المستويات الكمية بدلالة الدوال الموجية وصيغ المجال ومؤثرات المجال وهلم جرا ..، والتي تحدث المفاهيم الجسيمية الكمية في الفصل السادس (فقرة ٦-٢، و٦-٤) بدلالة التوقعات غير الصورية التي تكون هذه المفاهيم الجسيمية، وببساطة فقد أخبرتنا ازدواجية الموجة-الجسيم أن الجسيمات الكمية تكون هي (LOCPM) التمرکز (موضعيًا) عن طريق القياس الموضعي، و(WAVE) في المستويات تتراكم وتتداخل.

وتتصل الفجوة بين خصائص شبيه الجسيم وشبيه الموجة للأنظمة الكمية عن طريق التفسير الاحتمالي. وإجرائيًا تناظر موجات الكم عددًا كبيرًا للعد الجسيمي ومع هذا، فلم يستطع المستنبطون تفسير كوبنهاجن لميكانيكا الكم في شرح ازدواجية الموجة-الجسيم عن هذا الطريق، فقد أدخلوها في طريق ساعد على الكشف والذي عاد لمسارات علاقات بلانك-أينشتين وأينشتين - دي بروي $E=h\nu$ و $p=hk$ وإلى تطبيق علاقات هايزنبرج لعدم التحديد لعمليات التشتت دون الذرية المنفردة.

٧-٢-٢ رؤية بور التتامية

لقد عبرت محاضرة كومو لبور عام ١٩٢٧ عن ازدواجية الموجة-الجسيم بدلالة المتممة أو التتامية، وأصبح هذا المفهوم هو حجر الزاوية لتفسير كوبنهاجن لميكانيكا الكم^(١). ولكي نفهم ماذا يعني هذا، فلنأخذ خطوة خلفية إلى المكون العملي لعلاقات بلانك-أينشتين وأينشتين-دي بروي $P = \hbar k$ و $E = h \nu$ وقد تم التأكيد عليه بواسطة الظواهر الكمية مثل المسارات الكمية وحفظ الطاقة-كمية الحركة في ظاهرة كوميتون مقابل أنماط الحيود المتولدة عن طريق الأشعة الضوئية وأشعة الإلكترونات.

أطلق بور التتامية على مثل هذه الظواهر، وقد اعتمدت رؤيته التتامية لميكانيكا الكم على قاعدة المقابلة^(٢). وطبقاً لهذا، فإن ظواهر الكم التتامية تقابل المفاهيم الكلاسيكية أو نماذج الظواهر التي تتبادل الاستبعاد والتكامل لبعضها البعض.

واعتقد بور أن الفهم الكامل لظواهر الكم تكون فقط بدلالة المفاهيم الكلاسيكية والنماذج، وطبقاً لذلك فإن الشروط التجريبية التي تخضع لها مشاهدة مسارات الجسيمات وأحداث التشتت مكملة للشروط التي تخضع لها ظهور أهداف التداخل.

لقد تغير مفهوم بور التتامي مع الزمن، مع هذا، فمنذ البداية تضمن عدة مستويات مفاهيمية^(٣)، ففي كتاباته الأخيرة جعلها توضح أن أجهزة

(١) ومع ذلك طبقاً لهوارد ٢٠٠٢ لما يسمى حالياً بتفسير كوبنهاجن يرجع إلى هايزنبرج بينما كانت رؤية بور الشخصية لا تعدو الرؤية التتامية complementarity .

(٢) انظر: Meyer-Abich 1965, Fagkenburg 1998, Pring 2006

(٣) ثمة تحليل دقيق نجده في Scheibe 1971, 29-35. وانظر أيضاً: Meyer-Abich 1965; Murdoch 1981; Folse 1985=

تجارب التبادل الاستيعادي ولدت ظواهر تنامية، وبدا هذا بأن يكون آخر مرحلة مفاهيمية^(١). أدخل بور في محاضرة كومو الشهيرة المفهوم كما يلي :

ومن ثم فإن طبيعة نظرية الكم نفسها هي ما يُجبرنا على النظر إلى تناسق الزمكان ودعوى العلية، الاتحاد الذي يُميز النظريات الكلاسيكية بسماتها الخاصة، كسمات تكاملية وإن كانت حصرية للوصف [....]^(٢).

وبعد ذلك في محاضرة كومو، استنتج بور هذه التنامية للمحاور الزمانية المكانية والعلية من ازدواجية الموجة - الجسيمية في الفهم الموجود في (فقرة ٧,١) . بدأ الاستنتاج مع علاقات بلانك-أينشتين وأينشتين-دي بروجلي $E = hv$ و $p = \hbar k$ وأكد بور أنهم ربطوا الكميات E و p لصورة الجسيم الكلاسيكية وكميات v, k لصورة الموجة الجسيمية :

في هذه الصيغ تدخل عموم الفكرتين للضوء وأيضاً للمادة في تضاد حاد، بينما تتصاحب الطاقة وكمية الحركة مع مفهوم الجسيمات، ومن ثم قد تتميز طبقاً لوجهة النظر الكلاسيكية عن طريق محاور زمانية مكانية محدودة

= يُقدم جرينشتاين وزاجونك Greenstein and Zajonc 1997 تفسيراً نسقياً مختصراً في سياق بصريات الكم.

(١) بور ١٩٣٧ وكتابه اللاحقة؛ انظر : Scheibe 1971, 31-32; or Redhead 1987, 50

"التنامية: هي علاقة موجودة بين ظواهر كمية تبادلية خاصة. مع أن الظواهر التكاملية لا تحدث مترامنة، وإمكانية تبادليتها تكون ضرورية للوصف التام لواقعية ميكانيكا الكم". ومع هذا؛ فقد افترض هذا فعلاً في محاضرة كومو الشهيرة، الأقل بشكل ضمنى.

(2) Bohr 1928, 90.

وترجع دورة الذبذبة والطول الموجي لقاطرة موجية توافقية مستوية لامتداد لا نهائي في المكان والزمان⁽¹⁾.

أشارت هذه الملاحظات إلى اعتبار بور للعلاقات $E = hv$ و $p = \hbar k$ كأصل للازدواجية الموجية-الجسمية، كما تم التوصية بذلك في (فقرة ٧,١). وفي رؤيته اعتمدت الازدواجية الموجية الجسمية على وجود الظواهر الكمية شبه الموجية وشبه الجسيمية التي تشكل الأساس الخاص بكل العلاقات.

وفوراً وبعد إدخال مفهومه للتنامية مع المطلب حول محاور الزمان المكانية والعلية التي تمت تغطيتها سابقاً فإن بور شرح رؤيته للازدواجية الموجية الجسمية، وقد لخص الظواهر التي تدعم النظرية الكلاسيكية للموجات الكهرومغناطيسية وفروض الكم الضوئي لأينشتين ووجود الكريات الكهربائية وفروض دي بروي للموجات المادية كما يلي :

في الحقيقة، مرة أخرى هنا لا نهتم بالتناقض ولكن بالصورة التنامية للظواهر والتي تقدم فقط تعميماً جمعياً طبيعياً لوصف النمط الكلاسيكي⁽²⁾.

لقد أشارت شروحات بور لاعتباراته للعلاقات بين صور الموجة والجسيم كتنامية مبدئية. ودونت هنا على أن رؤية بور لصور الموجة والجسيم التنامية تكون أكثر فهماً من ازدواجية الموجة-الجسيم المجردة،

(1) Bohr 1928, 92.

(2) Bohr 1928, 91.

وهنا اعتبر بور أوصاف الموجة والجسيم للجسيمات دون الذرية الحرة تكاملية. وكان هذا على نهج علاقات بلانك-أينشتين، وأينشتين-دي بروي.

فالتنامية تعني أن هذه الصور تتبادل الاستبعاد والتكميل لبعضها البعض، ومع هذا فقد استنتج من هذه التنامية العلية والمحاور الزمانية والمكانية، واتبعت باعتبارات دي بروي وبور للرزم الموجية وحسابات تشتيتاتها، وباعتبار مساعدات كشفية استنتجت علاقات التشتت للزمن والتردد ν على التوالي للمحاور الكارتيزية (المكانية) x,y,z ومركبات متجهة الموجة $K_{x,y,z}$ كما يلي:

$$\Delta t \Delta \nu = \Delta x \Delta k_x = \Delta y \Delta k_y = \Delta z \Delta k_z = 1 \quad (7.1)$$

ويضمها مع $E = h\nu$ و $P = \hbar K$ ، فقد حصل على عدم الحدة للطاقة - الزمن وعدم الحدة لكمية الحركة - الموضع وأنها تشبه الربط المنخفض لعلاقة هايزنبرج لعدم التحديد⁽¹⁾

$$\Delta t \Delta E = \Delta x \Delta p_x = \Delta y \Delta p_y = \Delta z \Delta p_z = 1 \quad (7.2)$$

وهذا هو الأصل المسمى بعلاقة عدم تحديد الطاقة - الزمن، ولكن تبقى العلاقة المستنتجة السابقة فقط مساعدة في الكشف، فعلاقات (٧,١) تختص بالنموذج الموجي الكلاسيكي، وأضاف بور إليها علاقات ميكانيكا الكم لبلائك-أينشتين وأينشتين-دي بروي بروح مبادئه المقابلة، فعدم حدة (عدم وضوح) طاقة-الزمن في العلاقة (٧,٢) لم يكن لها ترابط واضح بصوري في ميكانيكا الكم، وعلى النقيض في علاقات التشتيت المتناظرة لمركبات كمية الحركة والموضوع فإنها لا تقابل علاقة عدم التحديد لمشاهدات ميكانيكا الكم غير المحولة^(٢) وقد لخص بور المكون الفيزيائي لـ (٧,٢) كما يلي :

(1) المعادلات (١) ص ٩٢، و(٢) ص ٩٤؛ Bohr 1928,92-94;

(٢) لا يوجد مؤثر زمني في ميكانيكا الكم. والعلاقة الصورية الوحيدة هي: $\Delta E \Delta \nu > h$

[....] طبقاً لنظرية الكم فإن العلاقة العكسية العامة الموجودة بين أقصى حدة المتجهات الزمان المكان والطاقة - كمية الحركة المصاحبة للمفردات، تعتبر هذه التفصيلات كمصطلحات رمزية بسيطة لطبيعة التتامية لوصف الزمان مكاني ومطالب العلية⁽¹⁾.

بضمها مع اعتباراته الأخرى، هذا يشير إلى ضم أو مصاحبة حفظ الطاقة-كمية الحركة مع العلية، وكما نكر من قبل في رؤيته لتمثيل الطاقة-كمية الحركة للأنظمة الكمية تكون مصاحبة للوصف الكلاسيكي الجسيمي.

في ظاهرة كومبتون يكون للفوتون تصادم محلي حقاً مع الإلكترونات محدثاً ارتداداً مشاهدًا للإلكترون وطاقة مفقودة ملاحظة للفوتونات، وأكد بور أيضاً في محاضرة كومو بأن الدليل التجريبي لهذه الظاهرة دحض نظرية الـ BKS في عام ١٩٢٤ التي حاولت أن تتخذ العلية بافتراض أن حفظ الطاقة ينتهك بالنسبة إلى أحداث تشتت ويتحقق فقط عند المستوى الاحتمالي⁽²⁾. وبالتالي فقد افترض أن علاقة هايزنبرج لعدم التحديد $\Delta p \Delta q \geq \hbar/2$

وعلاقة التشتت (٧،٢) تنطبق على أحداث التشتت المنفردة:

=التي يمكن اشتقاقها في نظرية الكم لربط خط الاتساع والعمر الزمني لمستويات الكم غير المستقرة. ويتطلب الاشتقاق نظرية المجال الكمي. لمزيد من المناقشة التفصيلية

انظر Messiah1969 sec.4.2.4

(1) Bohr 1928, 95.

تم ايضاح معنى "الرمزية" لدى رؤية بور في المرجع: Pringe 2006.

(2) Bohr 1928, 90.

لقد أعطى هايزنبرج للعلاقة (٢) كمصطلح لأقصى دقة في قياس مركبات المحاور الزمان مكاني وكمية الحركة-طاقة للجسيم في آن واحد. فمن إحدى وجهات النظر أنه يمكن قياس محاور الجسيم بأي درجة مرغوبة في الدقة عن طريق استعمال المعدة الضوئية، على سبيل المثال، معدة بإشعاع لطول موجي قصير كاف لأن يستعمل للإضاءة، ومع هذا فطبقاً لنظرية الكم فإن تشتت الإشعاع يكون مرتبطاً دائماً بتغير محدد في كمية الحركة والتي تكون الأكبر-الأصغر للطول الموجي للإشعاع المستخدم، ومن وجهة النظر الأخرى يمكن تعيين كمية حركة الجسيم بأي درجة مرغوبة في الدقة عن طريق قياس [.....] التي امدت بأن الطول الموجي للإشعاع يكون من الكبر بحيث يمكن إهمال تأثير الارتداد ولكن حين إذ يصبح تعيين المحاور المكانية الزمانية للجسيم المقابلة أقل دقة^(١).

ومن ثم، فإن تفسيرات بور للازدواجية الموجية الجسيمية كخصائص مزدوجة للجسيمات المنفردة، ففي رؤيته تكون هذه الخصائص المزدوجة كما تم التعبير عنها عن طريق العلاقة $E = hv$ و $p = \hbar k$ وعن طريق هايزنبرج لعدم التحديد ونتيجة ذلك قياس الموضع يغير كمية الحركة لامتداد غير معروف والعكس بالعكس، ووصلوا عن هذا الطريق إلى التنامية للمحاور الزمانية المكانية والعلية (أو حفظ كمية الحركة - الطاقة).

(1) Bohr 1928, 94.

من ثم فإن علاقة المنظومة بين الازدواجية الموجية - الجسمية في فهم علاقات بلانك-أينشتين وأينشتين-دي بروي هي وعلاقة هايزنبرج لعدم التحديد وبين حسابات بور التتامية قد يمكن جمعها فيما يلي:

توصف الظواهر الكمية التتامية بدلالة الكميات الفيزيائية التتامية. وتختص هذه الكميات بأوصاف التتامية الكلاسيكية للجسيمات والموجات التي تتضمن معاً في علاقات ازدواجية موجة-جسيم $E = hv$ و $p = \hbar k$.

ترتبط هذه الكميات في نظرية الكم عن طريق علاقة هايزنبرج لعدم التحديد وعلاقة عدم التحديد المساعدة الزمن-الطاقة، وقد أحدثت عدم التحديدات هذه أوصاف تتامية للواقع الفيزيائي بدلالة إما التمثيل للمحاور المكانية-الزمانية أو تمثل كمية الحركة-الطاقة، والتي تعود لتشير لتتامية المحاور الزمانية المكانية والعلية، وقد تصاحبت الأخيرة مع حفظ كمية الحركة-الطاقة في تأثير كومبتون في عمليات التشتت المنفردة، واعتبر بور هذا الحساب التتامي ليكون "تعميم طبيعي" للوصف الكلاسيكي للأشياء الفيزيائية⁽¹⁾.

وبعد كل هذا، فإن التتامية تكون مفهومًا عنقوديًا معقدًا، وطبقا لبور فإنها تنطبق على عدة مستويات مفهومية معبرة عن علاقات بين⁽²⁾:

إضافة إلى ذلك، يُمكن بالتفصيل توضيح أنه اعتبر التكاملية بين Bohr 1928, 91 (1) الزمكان والتوصيف العلي كتعميم عقلاني لتفسير كانط للواقعية الفيزيائية. انظر برنجه ٢٠٠٦.

(٢) هناك تتاميات أخرى لا تتعلق مباشرة بازدواجية الموجة الجسيم ينبغي إضافتها (انظر بور ١٩٢٨ وبرينجه ٢٠٠٦): فهناك إمكانية تعريف الموضوعات الفيزيائية=

[١٠] خصائص الموجة والجسيم للجسيمات دون الذرية كما تم التعبير عنها في:

$$\text{أ) العلاقات } E = hv \text{ و } p = \hbar k.$$

ب) علاقات التشتيت من (٧,٢) في الصورة الموجية، و

ج) علاقة عدم التحديد لهايزنبرج في الصورة الموجية.

[١] الملامح الموجية الجسيمية للظواهر التجريبية:

أ) الظاهرة الكمية لشبيهه الموجة وشبيهه الجسيم مثل أهداب التداخل ومسارات الجسيم.

ب) المعدات التجريبية الدقيقة مثل الشق المزدوج وغرفة ويلسون.

ج) الموجة الكلاسيكية المقابلة والصور الجسيمية التي يعبر عنها بدلالة:

[٢] الكميات المكانية-الزمانية والديناميكية:

أ) المحاور الزمانية المكانية وكمية الحركة-الطاقة.

ب) العمليات المكانية-الزمانية وقوانين الحفظ الديناميكية.

ج) "المحاور المكانية الزمانية" و"العلية".

=وقياس خصائصها، والميكانيكا الموجية لشروندجر ونظرية هايزنبرج في المصفوفات: "وفي الواقع فإن كلتا الصياغتين لمشكلة التفاعل يُمكن القول: إنهما تكامليتين بالمعنى عينه لفكرة الموجة والجسيم في وصف الأفراد الحرة" (بور ١٩٢٨، ص ١١١)؛ وما إلى ذلك.

لقد ابتعد بور عن تفسير علاقات عدم التحديد وأوجه التتامية وازدواجية الموجة-الجسيم المهمة في الحدود الاحتمالية. كما تتطلبها تفسيرات بورن العملية لميكانيكا الكم⁽¹⁾، وخاصة، فهم بور لعلاقات عدم التحديد لهايزنبرج كسبب لتغيرات كمية الحركة غير المتحكم فيها نتيجة القياسات الموضعية والعكس بالعكس الذي ينبئ على تطبيق الصور الكلاسيكية للجسيم والموجة في الاعتبار المساعدة في العمليات دون الذرية المنفردة، ولقد عرض هايزنبرج بنفسه هذا النوع للسبب المساعد في ورقة بحثه على علاقات عدم التحديد عندما ناقش قياسات الموضع للإلكترون بواسطة وسائل الميكروسكوب الجامي⁽²⁾. وقد ظهرت في مناظرة بور-أينشتين وفي اقتراحات فاينمان للميكروسكوب الضوئي⁽³⁾.

(1) لا يذكر بور في محاضرة كومو سوى تفسير بورن الاحتمالي إلا أنه يزعم أن "الميكانيكا الموجية مثلها مثل نظرية المصفوفات تمامًا [...] تمثل صياغة رمزية لمشكلة الحركة في الميكانيكا الكلاسيكية المتوافقة مع متطلبات نظرية الكم، وأنه لا يمكن تفسيرها إلا عبر استخدام صريح للمسلمة الكمية، (Bohr 1928,586;) وأيضًا ما أكدته في هذا الصدد).

وانظر أيضًا Heisenberg 1930b, 21-23 and 198. Heisenberg 1927, 147-175 (2) وعلى النقيض من محاضرة بور في كومو، استفاد بحث هايزنبرج من التفسير الاحتمالي في الحساب الإحصائي لمسار جسيم (Heisenberg 1927, 186-188).

(3) Bohr 1949; Feynman et al.1965, 1.4-1.9.

انبثقت عن هذه التجربة الذهنية التجارب المؤخرة لتحديد الاتجاه لبصريات الكم؛ انظر: Scully et al. 1991، والفقرتان (٧-٤، ٧-٥).

لقد جعل كتاب هايزنبرج لعام ١٩٣٠ "المبادئ الفيزيائية لنظرية الكم" أفكار بور أكثر دقة، فأكد هايزنبرج أن ازدواجية الموجة - الجسم تعتمد في تفسير الظواهر الكمية بدلالة التشابهات الجزئية الكلاسيكية، فقد أوضح أن الصور الكلاسيكية أو نماذج الجسيمات والموجات لا تزال تنطبق على الظواهر الكمية، ومع هذا، فقد دون هايزنبرج أيضاً أنه عندما يطبق حد "الجسيم" على سبب مسار الجسيم، فلا يطول في معناه الحرفي، فشرح في متن كتابه لعام ١٩٣٠ المفهوم الجسيمي في الفيزياء دون الذرية كما يلي:

ظهور مسار قطرات الماء في غرفة ويلسون تمثل مباشرة المسار للجسيم المفرد، وهنا دائماً ما يفهم الجسيم أو الكرية على أنها شيء يتحرك مثل نقطة كتلية في الميكانيكا الكلاسيكية^(١).

وهنا أدخل مصطلح "جسيم" بدلالات التماثل، بالنسبة إلى هايزنبرج يكون الجسيم شيئاً ما والذي يتحرك مثل نقطة كتلية كلاسيكية، وهذا التعريف يكون عملياً، والمسار الجسيمي يكون ظاهرة مشاهدة في غرفة ويلسون، والظاهرة تحقق تقريباً قانون قوة لورنتز الكلاسيكي. والجسيم دون الذري أو الحالة الكمية التي تحدث الظاهرة نفهم بدلالة المسار والقانون من الوجهة الميكانيكية التي تصفه، وفي هذا الطريق فإن المفهوم الجسيمي الكلاسيكي لا يزال يطبق على الظاهرة الكمية للمسار في غرفة ويلسون، ولكن التطبيق

(1) Heisenberg 1930a,4; وترجمتي

علمًا بأن النسخة الإنجليزية أكثر إيجازًا هنا. إذ لا تحتوي على أي شرح لمفهوم الجسيم؛ أنظر: Heisenberg 1930b,4.

فقط يكون له خاصية التماثل، وينظر للمسار كما لو كان نتيجة أنه يقابل نموذجًا كلاسيكيًا من الوجهه الميكانيكية والشيء نفسه يكون حقيقياً للظاهرة التتامية التي تظهر خاضعة للشروط التجريبية الأخرى التي تسمى في تجارب الحيود، وأنها تقارن مع الموجة الكلاسيكية، ولكن كما أظهرها هايزنبرج فإن مقارنة الشيء الكمي مع الجسيم الكلاسيكي أو الموجة تكون ضعيفة دائماً، ولا يعطي التناظر الكلاسيكي وصفاً نظرياً مضبوطاً.

أصبح الآن من الواضح أن الشيء لا يمكن أن يُشكل حركات موجية وأن يكون مكوناً في الوقت نفسه من الجسيمات - فالمفهومان مختلفان إلى حد بعيد. [...] وكحقيقة واقعة، فمن المؤكد تجريبياً فقط أن الضوء يسلك أحياناً كما لو كان يتمتع ببعض سمات الجسيم، إلا أنه ما من تجربة تُثبت أنه يتمتع بكل خصائص الجسيم؛ ويمكن قول الأمر نفسه بالنسبة إلى حركة المادة والموجة. إن حل الصعوبة يكمن في أن كلتا الصورتين الذهنيّتين التي تشكلت لدينا عن طريق التجربة - واحدة للجسيمات، والثانية للموجات - ليستا كاملتين ولها فقط صلاحية التماثلات التي لا تكون دقيقة إلا في حالات مُحددة⁽¹⁾.

لم يكن في استطاعة الصورة الجسيمية الكلاسيكية ولا الصورة الموجية الكلاسيكية أن تقنص كل الظواهر التجريبية للإلكترونات أو الجسيمات دون الذرية الأخرى، إنها تستطيع فقط قنص جزئ مهم، الصور التتامية للموجات والجسيمات يتم احتياجها حتى يتم شرح التجارب، ومع ذلك

(1) Heisenberg 1930b,10; similarly, Heisenberg 1930a,7.

فإن الصورتين غير مكتملتين لاعتبارين، الأول في أنه لم تثبت التجارب أن الضوء أو المكونات دون الذرية للمادة لها جميع خصائص الجسيم أو الموجة الكلاسيكية، والاعتبار الثاني هو أن الصور التتامة للجسيمات والموجات غير مكتملة أيضاً، وأنهما لم يعطيا فهماً كاملاً للضوء أو المادة، وقد توقفا عند التناظر، وبالتالي تحقفا بشكل تقريبي فقط بقدر ما قابلت الظواهر الكمية الظواهر الكلاسيكية ونماذجها، وهنا يبعد هايزنبرج عن متطلب إعطاء التناظر الكلاسيكي حساباً متكاملأ في حقل الكم، وعلى نحو معارض إلى حد بعيد فقد أكد أن كلاهما غير مكتمل.

لقد أصبح واضحاً اليوم أن الظواهر الكمية التي تقابل صورة الموجة أو الجسيم الكلاسيكية لم تعالج الحقل الكمي، ويوجد عدة ظواهر كمية دون أي مقابلة. أو تناظر كلاسيكي، وتوافقت بدقة رؤى هايزنبرج حول ازدواجية الموجة - الجسيم مع هذه الحقيقة.

٣-٧ صياغة الموجات ورصد الجسيمات

التفسير " التقليدي " أو تفسير "بورن- فون نيومان" لميكانيكا الكم هو في كونه احتمالياً^(١)، وأنه يشكل أساساً في مهنة الفيزياء ويتم تعلمه في الجامعات ويتشارك فيه جميع الفيزيائيين من غير خلاف بالنسبة إلى فيزياء الكم، وبوضوح لم يتمثل التفسير الاحتمالي مع تفسير كوبنهاجن لميكانيكا الكم، فالأخير يعتمد على محاضرة كومو لبور وكتاب ١٩٣٠ لهايزنبرج في

(1) Born 1926a,b; von Neumann 1932.

ميكانيكا الكم ومناظرة بور- أينشتين⁽¹⁾، لقد وضح في البند السابق اتجاهان مختلفان في نقطتين، تفسير كوبنهاجن التي وافقت التفسير الاحتمالي ولكنها تهمل بعض نتائجها الحاسمة، وفوق الكل فإنها تهمل فكرة أن ازدواجية الموجة - الجسيم وعلاقات هايزنبرج لعدم التحديد التي مبدئياً لها أرضية احتمالية، وقد ركز بور وهايزنبرج على احتمالية تطبيق هذه المفاهيم للعمليات الكمية المنفردة بدلالة التناظر والمقابلة والتامة، ومن ثم وظف تفسير كوبنهاجن الجسر الموحد للمبادئ التي تمت مناقشتها في فقرة (٥-٤) ناهيك عن مفاهيم بورن الاحتمالية.

وبالعودة للتفسير الاحتمالي لم يعد يعتني بمثل جسر المبادئ الذي يعبر حقاً عن العلاقات النظرية المتداخلة وبالأحرى مظاهر نظرية الكم نفسها .

لقد شرح تفسير احتمالية بورن ل $|\Psi|^2$ و فرض تصور فون نيومان كيف تكون علاقة بديهيات الميكانيكا الكمية مع الظواهر التجريبية، فأرجعت الدوال الموجية المختصة بالتركيب البديهي والعد الجسيمي إلى المحتوى العملي للنظرية، وتملاً الفجوة بينهما فقط عند مستوى الأداء الموحد للعديد من العد الجسيمي.

لقد ذهبت في الفصول السابقة إلى أنه دون المبادئ التوحيدية فإن المحتوى التجريبي لميكانيكا الكم ونظرية مجال الكم يكون جد ضئيل. وعلى وجه الخصوص فإن تفسير بنية ما دون الذرة وتأسيس مقاييس الكميات

(1) Born 1928; Heisenberg 1930; Einstein et al. 1935; Bohr 1935; Bohr 1949.

وفقاً لهوارد ٢٠٠٢، وأيضاً هايزنبرج؛ فقد كانت آراء ما بعد الحرب بشأن عملية القياس حاسمة لما سُمي في نهاية المطاف تفسير كوبنهاجن.

الفيزيائية يتضح أنه يرتكز على استخدام ضمني لمبدأ التناظر التعميمي بمعناه لدى بور وغيره من المبادئ التوحيدية^(١). لقد زعمت أن ثمة الكثير من الاستخدام الضمني لشيء شبيه بمبدأ التناظر التعميمي لدى هايزنبرج، خصوصاً حين يتم تطبيق دالة موجة ميكانيكا الكم على الأنساق الفردية. وفي هذا الصدد نجد أن تفسير كوبنهاجن يحمل معنى أكثر تجريبية من التفسير الإجرائي الضيق لبورن-فون نيومان، وفي واقع الأمر فإنه يدخل في الكثير من اعتبارات الموجات المساعدة^(*) heuristic لفيزياء الكم. علاوة على ذلك فإن تطبيق الموجه المساعد لمبدأ عدم اليقين لهايزنبرج لعمليات تشتت فردية دون ذرية هو أمر معتاد تماماً؛ حتى إن كان الفيزيائيون يعلمون أن الدقة تفترض أن له معنى احتمالياً. لا تقدم الكتب المدرسية ولا الأبحاث هذا الأمر في صورة صريحة. وباستثناء مبرهنة إرينفست فإن المبادئ الجسرية التي يتم توظيفها في تطبيق وظائف موجة ميكانيكا الكم على الأنساق الفردية أو

(١) انظر الفقرات من (٤-٢ : ٤-٥)، و(٥-٤، ٤-٥).

(*) قام فيلسوف العلم المجري إمري لاکاتوش بتقديم إطاره النظري لمنهج العلم؛ فذهب إلى أنه في برنامج البحث العلمي ليست كل النظريات العلمية سواء، فهناك أولاً النواة الصلبة **hard core** للبرنامج، وهي لا تخضع في حد ذاتها للتكذيب ولا تقبل التنقيذ، فهي فرضيات عامة جداً تمثل صلب برنامج البحث. ثم هناك الفروض المساعدة التي تمثل الحزام الواقعي الذي يتعرض للاختبار التجريبي ويحتمل التعديل والتصويب. ثم هناك فضلاً عن النواة الصلبة والحزام الواقعي؛ الموجه المساعد على الكشف heuristic الذي يُعين القواعد المنهجية ويرسم مسار عمل العلماء. للمزيد عن إمري لاکاتوش انظر: يمى طريف الخولي، فلسفة العلم في القرن العشرين، الهيئة المصرية العامة للكتاب ٢٠٠٩، ص ٤٥٢-٤٦٣. (المترجمان)

من أجل تأسيس نماذج شبه كلاسيكية لم يتم شرحها قط. ويبدو أن الفيزيائيين لا يحتاجون مثل هذه الشروحات. ولكن لماذا؟ ماذا يعتقدون بشأن وظيفة موجة ميكانيكا الكم التي يبحثونها في تجاربهم؟

لقد وجد الكثير من القائمين على التجريب طريقة غير متقنة لشرح ازدواجية الموجة الجسيم على النحو التالي. لقد ادعوا في تجربة فيزياء الكم أنهم قاموا بتحضير الموجات وقياس الجسيمات، ومن ثم، تحدثوا عن احتمالية موجات ميكانيكا الكم الزائف كما لو كانت حقيقية وأشياء فيزيائية منفردة التي تستطيع أن تؤثر في التجارب، حتى إنهم تكلموا في الطريقة نفسها حول صيغ المجال الزائف للمجالات الكمية، وحقاً فإن هذا يذكر بالمعيار الحقيقي لهاكينج والذي تمت مناقشته في سياق مناظرة المذهب الحقيقي ومفهوم شبه الجسيم (QP) في الفصلين الثاني والسادس (فقرة ٢-٣، وفقرة ٦-٤). هل الموجات الكمية حقيقية لأن الفيزيائيين استطاعوا نثرها؟ سأعود للسؤال الحاسم الأخير^(١)، ودعني لحظة لمجرد التعرض لحالة الطريقة الزائفة لموجات الكم الذي ركز فيها الفيزيائيون، وهي الفلسفة الضمنية للجسيم الفيزيائي وهي بالتالي ذات قيمة بحيث تجعلها ضمنية.

أكد "فولفجانج كيتيرله" الحاصل على جائزة نوبل ذات مرة على هذه الفلسفة البراجماتية لفيزياء الكم في حديث مبسط حول تكثيف condensate بوزيه-أينشتين. فقد أخبر العامة أن فهم ميكانيكا الكم أمر في غاية الصعوبة، ولكن بعد سنوات عديدة من الممارسة الفيزيائية فإن المرء يصير معتاداً على

(١) انظر الفقرة (٧-٦) والمُحصلات العامة بشأن السجال حول الواقعية في الفقرة (٨-١).

إعداد الموجات واكتشاف الجسيمات^(١). في هذه العبارة اللطيفة يتم فهم كل من الإجراءات التجريبية للتحضير والقياس بوصفها عمليات تجريبية، إلا أنها تُعتبر مُختلفة.

٧-٣-١ ما الذي يصنع الفرق؟

بنظرة أقرب من هذا التفسير لازدواجية الموجة-الجسيم يظهر أنه يتأسس على البديهيات والجوانب الإجرائية لنظرية الكم التالية:

(أ) التفسيرات الاحتمالية العادية لنظرية الكم، (ب) اللا تناظر لمحاور الزمان المكاني ومستويات كمية الحركة، و(ج) اللا تناظر الناتج للإعداد والرصد:

(أ) التفسيرات الاحتمالية العادية لنظرية الكم. لكي نحصل على تعريف محدد للعد الجسيمي والذي يقابل جسيمًا وكثلة معينة وطاقة ولُفاً وأخيرًا الشحنة لا بد من إعداد تعريف محدد لمستوى الكم $|\Psi\rangle$ وقياس المشاهد [٠] في هذا المستوى، وينجز الإعداد والقياس عادة عن طريق الأجهزة التجريبية المتنوعة، وتعطى نظرية الكم القيمة المتوقعة $\langle \Psi | O | \Psi \rangle$ والاحتماليات $|c_k|^2$ لقياس القيم المميزة O_k للمشاهد O ، وتقابل هذه الاحتماليات الترددات النسبية لقيمة العد الجسيمي المفرد O_k ، مأخوذاً في نهاية العديد من القياسات اللا نهائية للعد الجسيمي،

(١) عن الخطاب الملقى في اللقاء السنوي للجمعية الفيزيائية الألمانية بهانوفر في مارس

ومن ثم يوجد عملياً عدد معين من العد الجسيمي لنوع معين نسبة إلى تسوية (تطبيع) المستوى الكمي المعد. وفي تجارب تشتت الطاقة العالية يكون هذا الرقم من العد نسبة إلى شدة الشعاع الجسيمي (المسمى الفيض الجسيمي)⁽¹⁾. وهذا هو التردد النسبي. وهو يقابل الاحتمال الانتقالي بين المستويات الكمية. وبديهيًا، يوصف هذا بدلالة القيم المتوقعة للمؤثرات التي تؤثر على الدوال الموجية وصيغ المجال أو على مصفوفة S.

(ب) لا تناظرية محاور الزمكان وحالات كمية الحركة. في فراغ هيلبرت، يتساوى تمثل المستوى الكمي في محاور الزمكان أو في فضاء كمية الحركة، وهذا مجرد اختبارات محددة للاختيار من الأساس، ويكون مستوى كمية الحركة القاطع (الحاد) مرتبطاً بتحول فورير لتراكب العديد من المستويات اللانهائية في التمثيل الموضوعي، والعكس بالعكس. وفي هذا الاعتبار، يكون تمثيل محاور الزمان مكان وكمية الحركة متماثلة تمامًا. ومع هذا فإن في قوانين الكم الديناميكي يفضل مستويات كمية الحركة، طبقاً لمعادلة شرودنجر لميكانيكا الكم غير النسبوية يمتد عرض أي رزمة موجية ذات توزيع مكاني محدود وكمية حركة محدودة بينها في الموجة المستوية لكمية الحركة القاطعة (الحادة) p أو العدد الموجي $p = \hbar k$ ذات التوزيع المكاني غير المحدود يكون مستقرًا، وتفضل أيضًا أن تحسب مصفوفة S لتفاعل المجالات الكمية بدلالة مستويات كمية الحركة الداخلة والخارجة، في الفرق التمييزي

(1) انظر تعريف مساحة المقطع الكلية لتفاعل جسيم في الملحق (ج).

للأعداد المائلة للشواغر والأطوار وقوة المجال في مجاور الزمان المكان المعطى، وكمية الحركة تكون ملاحظة معروفة جيداً للمستوى الكمي للجسيم الحر عند الخط التقريبي (عند المالاتهائية). بالنسبة إلى جميع الأغراض العملية قد تعتبر المستويات الموضوعية موجودة بعد القياسات الموضوعية فوراً، لكنها لم تكن مستقرة طبقاً لمبادئ النسبية المحددة أو المستويات الكمية المحلية غير المحددة تكون مستحيلة حتى (غير ممكنة)⁽¹⁾، ومن ثم يكون التمثيل الطبيعي بدلالة مستويات كمية الحركة حتى لو أن الجسيمات تكون متمركزة تقريباً عن طريق القياسات الموضوعية وتصفهم نظرية الكم بدلالة الموجات والرزوم الموجية التي تتقدم في مستويات كمية الحركة قبل العد وبعده.

ج) اللا تناظر الناتج للإعداد والرصد. كنتيجة مباشرة لعدم تناظر محاور الزمان ومستويات كمية الحركة المفضلة والأعداد والعد لمستويات الكم تكون أيضاً غير متناظرة، وبالنسبة إلى الأغراض من الطرق التجريبية والمستقرة فتعد مستويات الكم المعاد إنتاجها، وتخص هذه النظرة النافذة معرفة الخلفية النظرية الآمنة لجميع تجارب فيزياء الكم. وبعد خطوات الإعداد يتوقع وجود موجات مستويات مستقرة (تقريباً) لمستويات كمية الحركة القاطعة، وفي الغالب لفترة زمنية قصيرة بعد العد، (تقريباً) يفترض أن توجد مستويات مجالية محددة، وبالتالي فخطوات إعداد الفيزياء دون الذرية كانت هدفاً عند إعداد الجسيمات أو الإشعاعات الجسيمية للنوع الدينامي المعطى في مستويات كمية

(1) Clifton and Halvorson 2002.

الحركة والطاقة المعرفة جيداً⁽¹⁾، حينئذ تقاس فقط الجسيمات أو مستويات الكم المحلية تقريباً، وقد يحدث هذا عن طريق وسائل اللوح الفوتوغرافي وشاشة الوميض والميكروسكوب الإلكتروني الذي يقوم بعملية المسح لتركيبة شحنة السطح أو العداد الجسيمي، حقيقي أن الإعداد والقياس يسيران على خطى الخطوات التجريبية، وفي التطابق مع الفرض المنصور لميكانيكا الكم⁽²⁾، فكلاهما يقلل الدالة الموجية لبعض من الحالة المميزة للجزء الملاحظ، ونقلها الموجة المعدة إلى حالة كمية حركة معرفة- جيداً إلى عرض كمية حركة صغيرة جداً، والرصد الجسيمي يقللها إلى رزمة موجية محلية تقريبية، ومع هذا فإن كلتا الخطوات لها أهداف مختلفة، فيهدف الإعداد إلى إنتاج مستويات كمية حركة للإلكترونات والفوتونات ... إلخ لشعاع الجسيم المعجل أو الليزر الحاد قدر الإمكان. إن الرصد والقياس الجسيمي يهدفان إلى تمركز الجسيمات لكثلة وشحنة ولف معرف جيداً في منطقة زمانية مكانية معرفة - جيداً⁽³⁾.

حقيقة تتطابق اللا تناظرية والرصد مع الظواهر الكمية الماكروسكوبية التي درست في العقود القليلة السابقة، تفقد هذه التجارب جميع

(1) وحتى بالنسبة إلى الذرة الممسوكة في مصيدة ومن ثم تكون متموضعة، لا يمثل الموضوع أمراً مهماً. فما يهم هو تحديداً مستويات طاقتها.

(2) Von Neumann 1932.

(3) إذا ما قيست فقط كمية الحركة أو الطاقة، فإن هذا لن يكون ممكناً إلا تقريبياً فقط. ومع ذلك، فعادة ما تعطي الأجهزة التجريبية أخطاء قياس أكبر عشرة أمثال علاقة عدم التحديد.

ملاحظ التناقض كلما أخذت خصائص احتمال الازدواجية الموجية الجسيمية في الحسبان، وهذا على وجه الخصوص يربط ترابطات EPR الشهيرة^(١)، من مظهر التجربة أن يتم إعداد الدالة الموجية لحالة فوتونين متشابكين؛ حيث إنه بعد فترة زمنية يتم رصد جسيمين؛ أي تقيس العدادين الجسيمين مركبات اللف أو مستويات الاستقطاب للفوتونات عند الإزاحة شبه - الفضائية واتصال الفروع المختلفة للتجربة عن طريق الكاشف الترابطي. تتنبأ نظرية الكم بأن متباينة بيل ستتتهك في مناطق حركية معينة، ومع هذا لكي نثبت هذا فمن الضرورة رصد عدد كبير لأزواج فوتونية مترابطة في استقطابين مختلفين وكل هذا معرف جيداً، وفي هذا السياق الحالي نقطة واحدة فقط هي التي تهم، فقط تم تنبؤ نظرية الكم بدلالة ضرب ممتد الدالة الموجية التي تصف مستوى الجسيمين المتشابكين، ويكون لمربع سعة الموجة معنى احتمالي تقليدي؛ أي أنها تتنبأ بالتردد النسبي للقياس الناتج، إضافة إلى تنبؤها بتحقيق قانون الحفظ المقابل عند مستوى العمليات المنفردة أو الحصر الزوجي. (هذا ما ركز عليه بورن فعلاً) في عام ١٩٢٦ عندما دون بطريقة مماثلة حفظ مقادير الطاقة وكمية الحركة "تنتقل كما لو كانت كريات حقيقية تطير في كل جهة"^(٢). إن نتائج القياس الحاسمة التي أثبتت أن متباينة بيل المنتهكة أمكن الحصول عليها عند المستوى الاحتمالي وأعطوا بدلالة الدوال المترابطة للترددات النسبية للعدد الجسيمي المترابط .

(١) انظر: Einstein et al.1935; Aspect 1982 .

(2) Born 1926b, 803.

ومثال آخر هو قياس تكثيف بوز-أينشتين^(١). وقد ادعى كيتل أنه يمكن في فيزياء الكم إعداد الموجات ورصد الجسيمات وقد حصل على جائزة نوبل عن التجربة، وسوف نناقش المزيد من الأمثلة فيما سيلي.

وبعد كل هذا يبدو الحساب الناتج للازدواج الموجي-الجسمي بتطبيقه فقط عند مستوى العمليات دون الذرية المنفردة، وتظهر النظرة القريبة بأنها تأتي في حدود عملية تمامًا، وهي تتبني على إمكانيات تجريبية لأشياء جسيمية متولدة ومستويات شبه موجية كمية وظواهر، بالإضافة إلى أنها دعمت عن طريق التفسير الاحتمالي المعتاد لنظرية الكم، تقاس خصائص شبه الجسيم لظواهر الكم عن طريق العداد الجسمي أو الشاشة التي تحصر الفوتونات المفردة أو الإلكترونات، وتصبح خصائص شبه الموجة واضحة من حيود الإلكترون أو شعاع الفوتون عند البلورة أو الشق المزدوج الذي يحدث نمط التداخل المشاهد، وكي تتجز تجربة الشق المزدوج نحتاج إلى ضوء ليزر وحيد الطول الموجي متنسق أو شعاع إلكتروني ذي توزيع كمية حركية صغيره جدًا والذي يأتي قريبًا من موجة مستوية، وبهذه الطريقة يكون استحضار الموجة في مستوى كمية حركة حادة معرفًا جيدًا.

حينئذ ترصد الشاشة الموضوعية خلف الشق المزدوج الفوتونات أو الإلكترونات غير المرتبطة، وبهذه الطريقة تُحصّر الموجة وتعد الجسيمات في المفهوم الإجرائي (OP) للفصل السادس فقرة (٦-٣)، وطبقًا للتفسير الاحتمالي لنظرية الكم في نهاية لا نهائية للعديد من الأحداث المتكررة نسبيًا للعد الجسمي المقابل لمربع سعة الموجة الحادثة، وإذا أُجريت مثل هذه

(١) انظر: Dürr 2006.

التجربة لساعات وساعات لوحظ أن العد الجسيمي يصنع نمط تداخل شق مزدوج مماثل، والأكثر دهشة أن أهداب التداخل ظهرت فقط عند المستوى الاحتمالي، من عديد الرصد الجسيمي المنفرد⁽¹⁾ وأنها عرفت جيداً بأن ذلك يختلف مادياً من مجموع نمط حيود الشق الواحد.

في مثل هذه التجربة تستحضر الإلكترونات والفوتونات كموجات عن طريق جهاز الشق المزدوج في حين أنه عند الشاشة فإنهم يتموضعون أو يتم عددهم كجسيمات، وفي نمط التداخل الذي يظهر بعد رصد العديد من الجسيمات، وتظهر خصائص شبه الجسيم وشبه الموجة عند المستوى الاحتمالي، حقيقة في جميع التجارب التي تطبق الظواهر الكمية الماكروسكوبية والنظام الكمي تحت الفحص يكون إعدادها في حالة كمية لشبيهة الموجة المعرفة- جيداً والتي تتقدم في طريق معرف جيداً متطابق مع بعض قوانين الديناميكا الكمية. ولكن يمكن الحصول على نتائج القياس فقط عن طريق العد الجسيمي في القياس عالي الدقة على الأقل، وأن مربع سعة الدالة الموجية يتنبأ باحتمالية عد الجسيمات في المستويات المعطاة. وأن شبه الموجة أو الملامح غير المحلية للظواهر الكمية أصبحت واضحة فقط في التكرار النسبي للعد الجسيمي، ومن ثم فإن القول الفصل في إعداد الموجات وعد الجسيمات معبر عن الملامح غير الموضوعية لنظرية الكم على الخلفية الآمنة للتفسير الاحتمالي وتكون تجربة الشق المزدوج بالإلكترونات المفردة أو الفوتونات حالة نموذجية لمثل هذه التجارب.

(1) تجربة الشق المزدوج ذات الإلكترونات المفردة الواردة على سبيل المثال في:

ومع هذا، تعد الموجات أو مستويات كمية الحركة الحادة عن طريق جهاز تجريبي بطريقة قياس غير مباشرة، ومن وجهة النظر العملية الصرفة فإن ذلك أحدث احتمالات مشروطة، ولكن بدأت عدة خطوات تحضيرية لإنتاج أكثر من احتمالات مشروطة، تسمى نوعًا ما لوجود متفرقات من دون الذرات الزائفة، وقد استوضح ذلك الآن في صورة تجريبية مثيرة بفوتونات مفردة؛ وقد استبعدوا فكرة مسار الجسيم أو المسار.

٧-٣-٢ فوتون واحد من مصدري ليزر

في فهم معين لتجارب مثيرة للضوء الكمي الحديث يتم إعداد جسيمات مفردة تسمى شعاع الإلكترونات أو الفوتونات منخفضة الشدة ولكي نحصل على عد جسيمي منفرد يتم تخميد شدة الشعاع بشدة. وحتى تخمد أكثر يبقى إلكترون أو فوتون واحد فقط في موجة المادة أو مجال الإشعاع، وقد يستعمل أيضًا قاذف الإلكترون أو ليزر قصير النبض والذي يظهر الرزم الموجية في مستويات متسقة، وأنها تستطيع حتى إعداد مجال فوتوني في مستوى رقمي حاد، ويمكن أولاً تحضير الفوتونات المفردة في المستوى الرقمي الحاد فقط عن طريق توليد زوج فوتوني مرتبط (EPR) ورصد الفوتون الآخر^(١)، وهذا التحضير كان مصحوبًا بوضوح مع القياس، ويمكن اليوم توليد فوتونات مفردة دون أي تعقيد وقياس لاحق^(٢)، ويمكن أن يظهر لنا أن في هذه الحالة

(1) Grangier et al.1986.

لمناقشة المصادر المختلفة للضوء الفوتوني المفرد انظر: Greenstein and Zajonc

.1997, 32-35

(2) Keller et al. 2004.

الجسيمية يمكن إعدادها للموجات، وتنتشر الرزم الموجية للإلكترون المفرد بعد القياس الموضعي تجاه الموجه المستوية، ومع هذا، فإن المستوى الرقمي الفوتوني الحاد يكون معرفاً بما يتعلق بصيغة المجال لمستوى الموجة وتبقى في مستوى رقمي حاد كلما أمكن بغض النظر عن تغير التحضير وعن عدم همل القياس وحدث أي عملية امتصاص أخرى. هل تكون هذه الحالة ضد المطلب السابق بأن ترصد الموجات؟ ولنضعها في حدود مختلفة: هل يكون بالإمكان أن تعد تجربة الفوتون المفرد جسيماً مناسباً بمسار معرف جيداً وبتاريخ على غير ملتبس يربط الإعداد بالرصد؟ (وهذا ما يفترض من النظريات المتغيرة المخفية).

ومع هذا، فإن هذا الافتراض لا يمكن الدفاع عنه أو الاحتفاظ به بالنسبة إلى تجربة فليجور - ماندل، التي أنجزت في ١٩٦٧^(١). لقد أجريت تجربتان منفصلتان لتداخل الليزر في زمن اتساق مقداره 20µs خلال إمكانيتهما بالاحتفاظ بطوريهما في حالة اتساق وأعيدت القياسات مع نبضات الليزر لهذه الفترة من عمل تجربتي الليزر كليهما وتم تسجيلهما وتحليلهما. وقد أظهرت هذه النتائج التداخل، حينئذ، أضعف الليزر كثيراً في كل قياس باحتمالية كبيرة جداً؛ لأنه يتبقى فوتون واحد في مجال الإشعاع للتجربة، وما زالت تظهر النتائج ضعفاً ولكن بأهداب تداخل ذات مغزى، وهذا يعني

(1) Pfleeger and Mandel 1967.

وانظر: Greenstien and Zajonc 1997, 43

(العنوان الملائم "فوتون واحد من مصدري ليزر" لهذه الفقرة مأخوذ من هناك) والمناقشة هناك من ص ٤٣-٥٣.

أن الموجات أو صيغاً تتولد عن طريق التداخل الليزري، محدثة مستوى متشابهاً $\Psi_1 \otimes \Psi_2$ حتى لو كان عدد الإشغال لمجال أو مجالات الفوتون التداخلي يساوي واحداً (1) فقط، تشرح نظرية مجال الكم هذه النتيجة بدلالة تراكب صيغ المجال التداخلي لعدد الإشغال صفر (0) و(1). ويتكون التراكب من فوتون واحد آت من مصدر الليزر L_1 ولا يأتي فوتون من الليزر الآخر L_2 ، والعكس بالعكس:

$$\Psi_1 \otimes \Psi_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} (|1_1\rangle|0_2\rangle + |0_1\rangle|1_2\rangle). \quad (7.3)$$

وهذا يكون واضحاً في صورة الموجة. أما في صورة الجسيم فقد كان ثمة يأس كامل في تفسير النتيجة. فعلياً ليس ثمة رواية عليّة واضحة المعالم للفوتونات المفردة التي يتم رصدها على الشاشة والتي تصنع في المدى الطويل نمط تداخل. وفي صورة الجسيم الكلاسيكي يُفترض أن كل فوتون سواء أتى من ليزر L_1 أو من الليزر الآخر L_2 ، ولكن حينئذ لا يمكن حدوث تداخل. وقد أوضحت الظاهرة الكمية أنه يجب إعداد جميع الفوتونات بطريقة ما في كلتا تجربتي الليزر. إنهما ليسا خليطاً ولكنهما في حالة تراكب (3-7). وأن خليط الفوتونات الناشئ إما من الليزر الأول أو من الليزر الثاني لا ينتج عنه تداخل. ولكن هذا يعني أن الفوتونات المفردة التي يتم تعيينها ليس لها مسار محدد ولا رواية عليّة واضحة المعالم. ولا يمكن تفسير النتائج التجريبية إلا على خطوط التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم. ومن ثم، فإن تجربة بفليجور - مانديل تقوم بتحضير الموجات وتعيين الجسيمات بالمعنى الموضح عليه.

إن الطبيعة الموجية للفوتونات لم ينتج عنها فقط ظواهر التداخل. فقد ظهرت أيضًا في تجارب الاستقطاب. ففي نظرية مجال الكم، يكون الاستقطاب درجة داخلية من الحرية في وصف الفوتونات المفردة. وفي النظرية الكلاسيكية للإشعاع يكون الاستقطاب خاصية موجية مُصاحبة للطور النسبي لمركبات قوة المجال الكهربائي. ثمة تجربة بسيطة وإن كانت مدهشة لاستقطاب الفوتونات المفردة مشابهة لاستقطاب الموجات الكهرومغناطيسية الكلاسيكية بالمستقطبات المنقاطعة. فعند أدائها بالضوء الأبيض التقليدي العادي، يتضح أن الضوء يتكون من موجات وليس جسيمات. وعند أداء التجربة بالفوتونات المفردة، فإنها تكشف عن السمات غير الموضوعية لمجال الكم.

دع الضوء الأبيض الصادر من مصدر ضوء حراري عادي يمر خلال ثلاثة مستقطبات متتالية P_1, P_2, P_3 والتي تتقاطع كل واحدة مع الأخرى عند الزاويتين 45° و 90° ، عند الشاشة خلف P_3 ، نشاهد ما إذا كان الضوء يمر خلاله أم لا، وخلف المستقطب P_1 يستقطب الضوء في الاتجاه العمودي، وخلف P_2 فإنه يستقطب عند 45° نسبة إلى P_1 وخلف P_3 فإنه يستقطب أفقيًا إذا أزيلت P_2 فإن المستقطبين المتبقين يكونان عموديين على بعضهما ولا يمر الضوء في P_3 ، وحينئذ لا يرى شيء على الشاشة. حتى في الحالة الكلاسيكية من المذهل أن ترى الضوء يظهر على الشاشة ويختفي عندما يوضع المستقطب الثاني بالداخل والخارج .

يتحقق الكم المتناظر مع الشعاع الضوئي منخفض الشدة الآتي من الليزر قصير النبض والذي يبعث فوتونات مفردة، لقد نوقشت ظاهرة الكم المقابلة أولاً في متن كتاب ديراك عن ميكانيكا الكم⁽¹⁾، وبدلاً عن الشاشة الضوئية لتجربة الاستقطاب الكلاسيكية فقد وضع عداد فوتوني حالياً خلف المستقطبات المتتالية بحيث يكون شدة الشعاع (أو زمن النبض لليزر النبض القصير) من الانخفاض بحيث يكون متوسط واحد فوتون غالباً عند هذا الزمن في المجال الإشعاعي، ومع ذلك فهذا لا يعني بالضرورة أن مجال ماكسويل المكتمل في مستوى عددي معرف - جيداً ذي عدد إشعاعي واحد (1)، وهذا يعتمد على الإعداد حتى إذا تم التحضير عن طريق أجهزة مناسبة صيغ مجال ذو عدد إشعاعي واحد (1) وأن أي مستقطب يحطم هذا الإعداد إذا لم تتوافق بالضبط مع مستوى استقطاب الفوتون، وبصفة عامة فإن المستقطب P_1 يعد التراكب ناهيك عن المستوى العددي المعروف - جيداً لمجال الفوتون.

بالمقابل لصورة الموجة الكلاسيكية، تتنبأ نظرية الكم بأنه يتم عد الفوتونات المفردة خلف p_- إذا وإذا فقط وضع المستقطب الثاني P_2 في الداخل، وكان هذا مدهشاً في حالة الكم، يكون للمستقطبات تأثير فيزيائي واضح لاختيار فوتونات ذات استقطاب معطى، وتقوم بامتصاص جميع

(1) Dirac 1958, 4-7.

ويمكن العثور على محاكاة حاسوبية ملائمة في:

<http://www.physik.uni-muenchen.de/didaktik/computer/interfer/>

الفوتونات باستقطاب عمودي، وهذا يبدو كونه مقاسًا، ولكن، كيف تستطيع ثلاثة ممتصات أن تدع الفوتونات المفردة تمر وأنها لا تستطيع أن تمرر اثنين منهم؟ والإجابة جاهزة ومعطاة سالفًا. وتعد المستقطبات صيغ شبه الموجة والتي يكون فيها العدد الإشغالي لمجال الكم غير معرف جيدًا، وأنها تعد المجال المختلف تمامًا مع أو دون المستقطب الثاني P_+ ، ومع هذا، يقيس العداد الفوتوني متوسط العدد الإشغالي عن طريق عد الفوتونات المفردة .

يتكون الضوء الكمي من فوتونات ذات عدد موجي k ، والآن لنُدع مستوى الفوتون $\Psi_{k,1}$ يمثل صيغة المجال لهذا العدد الموجي K والعدد الإشغالي واحد (1)، وقبل أن يصل عند نظام المستقطبات فإنه لا يعرف أو لا يعرف استقطابه، وبالنسبة إلى مجال الكم فإن العدد الإشغالي والطور لا يستطيع أن يكونا بحددة أو معرفين - جيدًا في الوقت نفسه. ومع هذا، فإن الخصائص العالية غير الكلاسيكية للضوء منخفضة الشدة لا تؤثر في وصفه بدلالة صيغ مجال شبه الموجة والتي تكون مشغولة بالفوتونات ذات الاستقطاب المعروف - جيدًا. ومع هذا، فإن المستوى المعروف استقطابه جيدًا يكون مستوى معرفًا فرق الطور - جيدًا، ومن ثم فبعد إعداد الاستقطاب الجديد لصيغة المجال فإن العدد الإشغالي لصيغة المجال لا يستطيع طويلًا أن يكون حادًا أو معرفًا - جيدًا. وتصف نظرية مجال الكم تأثير المستقطبات بدلالة مؤثرات المجال لإفناء كمات المجال المستقطب وتخليقه، $a_-, a_+, a_1, a_1^+, a_+, a_1^+, a_-, a_1^+$ ، وتعد المستقطبات P_+, P_0, P_- ، مستويات الاستقطاب Ψ_+, Ψ_0, Ψ_- . ولتدع مؤثرات المجال المقابلة لهذه التأثيرات أن تكون P_+, P_0, P_- .

خلف أول مستقطب P_1 يكون الضوء مستقطباً في الاتجاه العمودي، ويكون في المستوى الكمي P_1 Ψ_1 مختزلاً الدالة الموجية Ψ_E لشعاع الليزر النبضي القصير إلى مستوى معروف - جيداً ومستقطب عمودي والذي لا يطول كثيراً لما يقابل العدد الإشغالي المعروف - جيداً، بدلالة المستقطب الثاني P_2 وهذا المستوى يكون متراكباً لموجه الفوتون أو صيغة المجال Ψ_2 الذي يستطيع مرور P_2 (استقطاب 45° - بالنسبة إلى P_1) وموجة فوتون أو صيغة مجال Ψ_2 والذي لا يستطيع مرورها (الاستقطاب عمودي على P_2). ومن ثم، فإن تأثير P_1 على Ψ_E يكون:

$$P_1 \Psi_k = \Psi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} (\Psi_+ + \Psi_-). \quad (7.4)$$

خلف المستقطب الثاني P_2 يكون مجال الفوتون في المستوى $\sqrt{2}\Psi_1/2$ ، نتيجة اختزال للمستقطبين P_1, P_2 ، يكون هذا المستوى متراكباً من $(\Psi_+ + \Psi_-)/2$ ، مع المستوى Ψ_2 للمستقطب الأفقي عمودياً على Ψ_1 ، ويقابل المستوى الكمي Ψ_2 متراكب الفوتونات التي تستطيع مرورها ولكن تستطيع فقط مرور المستقطب P_2 . وحينئذ يكون تأثير P_2 هو

$$P_2 \Psi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_+ = \frac{1}{2} (\Psi_+ + \Psi_-) P \quad (7.5)$$

وفي النهاية، لندع موجة الفوتون تمر خلال المستقطب الثالث P_3 الذي يكون عمودياً على المستقطب الأول، وخلف P_3 يمكن عد الفوتونات المفردة إذا كانت وإذا كانت فقط بين P_1, P_3 ، فالمشاهدات المقابلة بالضبط للحالة الكلاسيكية الموصوفة سابقاً، مع P_1, P_3 وحدهما، ودون المستقطب الثاني P_2 لا يمر الضوء ولا يعد فوتوناً مفرداً.

وفي هذه الحالة يكون تأثير P. على Ψ_1 هو مستوى مفرغ:

$$P_- \Psi_1 = 0 \Psi_- = \Psi_{k,0}. \quad (7.6)$$

ولكن إذا وضعت P_1 بينهما، فإن بعض الفوتونات يعاد عدها عند الشاشة، وفي هذه الحالة توضع نتائج المستقطب في متراكب مستوى الفوتون للعدد الإشغالي 1 والمستوى المفرغ:

$$P_- \Psi_- = \frac{1}{\sqrt{2}} \Psi_- = \frac{1}{2} (C_0 \Psi_{k,0} + c_1 \Psi_{k,1}). \quad (7.7)$$

من الواضح أن كلا من المستقطبات تختزل الدوال الموجية إلى مستوى استقطاب معرف - جيدًا، كما في القياس. وكل مستقطب يخدم سعة دالة الموجة أو صيغة المجال بمقدار العامل $1/\sqrt{2}$ ، وهذا يكون نتيجة التخميد لشدة الفوتون (أو متوسط العدد الفوتوني والذي يعطى بواسطة القيمة المتوقعة لمؤثر العدد الإشغالي) بمقدار المعامل $\frac{1}{2}$. إن شدة الفوتون الناتجة أو متوسط العدد الفوتوني لتأثير (7.7) يكون $\frac{1}{4}$ تأثير (7.4)، وهذا يعني أنه بدلالة الاحتمالات الانتقالية أو معدلات العد، في المتوسط 3 من ناتج 4 فوتونات في نهاية الفقد الناتج عند العداد الفوتوني. ومع هذا، تم عد الفوتونات بمعدل عد غير منتظم تمامًا، نتيجة الوجود الكلي لمستوى مفرغ لمجال الكم الذي يتنبأ بوجود كلي لتموجات احتمالية مجال الكم، بالنسبة إلى صيغة مجال مفرد وبالنسبة إلى عداد جسيمي غير مثالي بكفاءة تقل عن واحد (1)، تكون احتمالية توزيع العد الفوتوني طبقًا لمعادلة ذات حدين⁽¹⁾.

(1) انظر: Walls and Milburn 1994, 51-52; Busch et al. 1995, 9-10 and 177-180

وبوضع مفهوم الجسيم الكلاسيكي في الذهن، فإننا نجد أنفسنا مدفوعين إلى طرح التساؤل التالي: ماذا يحدث للفوتونات المفردة التي أتاحت لكل منهم إما أن يمتص عند واحد أو آخر من المستقطبات أو المعد خلف المستقطب P_- ؟ وقد دلتنا الكهربية الديناميكية الكمية أن هذا سؤال خاطئ، فالفوتونات غير مميزة، وأنه نتيجة تأثير المستقطبات يكون العدد الإشغالي لمجال الفوتونات غير حاد، وبالتالي ينشأ لدى الفرد عدم دراية حول اختصاص الفوتون عند أي من المستقطبات طالما أنها لا تقاس هناك، ومن وجهة النظر الحقيقية فإن الامتصاص في المستقطبات يحدث على نحو موضوعي نتيجة عدم الاتساق وهذا يعود ليوضح لنا فقط ماذا يحدث عند المستوى الاحتمالي.

في حالة الفوتون المفرد فإن تحضير مستوى الفوتون عن طريق أي من المستقطبات التي قبل الشاشة يجب أن يختلف جوهرياً عن قياس الفوتون، وبطريقة أخرى، فإنه لا يمكن حلها عن طريق وضع المستقطب الثاني⁽¹⁾، تصف التجربة المبنية كما سبق بأنه لم يلاحظ امتصاص الفوتونات "المفقودة" قبل أن يتم عد متوسط الفوتونات المفردة التي تم عدها خلف P_- ، ومع هذا فلكي نقيس امتصاص الفوتونات المفردة عند المستقطبات يتطلب أجهزة تجريبية إضافية وهذه ستكون من بناء أو إعداد تجريبي مختلف، وبالنسبة إلى البناء التجريبي الذي تمت مناقشته هنا فيؤخذ في الاعتبار النص التالي فقط . طالما كان الفوتون الواحد في زمن كونه بمجال الكم، وأينما كان الفوتون في النهاية تم عده فإنه لا يوجد فوتون ممتص عند أي من المستقطبات، وهذا بسبب حقيقة اعتبار حفظ الطاقة عند مستوى عمليات الكم المنفردة⁽²⁾.

(1) فحصت هذه النقطة بمزيد من التفصيل في الفقرات المقبلة بطرق تجريبية حديثة لاختيار البديل بمحاولات كمية. انظر الفقرات من (7-4: 7-5).

(2) تذكر ملاحظة بورن في Born 1926a، والتي استشهدنا بها في الفقرة (7-2).

- لقد أخبرتنا الاحتمالات الانتقالية لنظرية مجال الكم أنه يوجد من ٣ إلى ٤ فوتونات تمتص عند واحد من المستقطبات، وإذا كان احتمال عد الفوتون مساوي (1/2) وهذا يؤثر بوجود P، هناك، وإذا كانت تساوي (1/4) وهذا يشير إلى أن P تكون هناك أيضاً، ومع ذلك فإن هذا النص يصنع فهماً فقط عند المستوى الاحتمالي مع تغير أداء موحد لنظرية مجال الكم، وأنه يستحيل تطبيق هذه الرؤية على العد الفوتوني المنفرد. وبوضوح، لا يستطيع المستقطب أن يخمد شدة الفوتون المفرد بالمعامل (1/2)، وهذا يحول دون أي تفسير للتأثيرات المناقشة سابقاً بدلالة الجسيمات المنفردة ورزم الموجات للفوتونية المتموضعة أو أيًا كانت الأسباب المنفردة للعد الفوتوني المنفرد.

ولكن التأثيرات حقيقية، وطبقاً لمبدأ العلية فإن أسبابها تكون أيضاً حقيقية، وفي الحقيقة فإن الطريق الذي يكون فيه استقطاب الفوتون الذي تم إعداده فله ثقة موصولة بالعية بالنسبة إلى احتمالية الانتقال الذي ينتجاً بالتكرار النسبي للعد الفوتوني، وبدیهياً فقد وصف ذلك بدلالة صيغ المجال ومستويات الاستقطاب والأعداد الإشغالية والتراكبات العملية، وهي وثيقة الصلة بالعية ولهذا الإعداد يمكن أن يعبر عنها فقط بدلالة الاحتمالات المشروطة، إن الفجوة بين البديهية والوصف العملي للفوتونات ما زالت باقية، فعملياً توجد الجسيمات، وبدیهياً توجد المجالات أو الموجات، ولا يوجد ربط غير جدلي بينهما بعد التفسير الاحتمالي. ومع ذلك، فقد اعتبر فيزيائيون أن الموجات التي أعدها تكون من الحقيقة كما كانت الجسيمات لتي تم عدها أو حصرها.

٧-٤ إعادة اعتبار الشق المزدوج

لقد حلم الفيزيائيون لعقود عديدة في تجارب الحيود مع الإلكترونات المفردة أو الفوتونات ولكن ظلت أحلامهم باقية في التفكير بالتجارب من خلال روح أفكار هايزنبرج لميكروسكوب جاما^(١)، وكانت التجارب الذهنية الخاصة بالمناظرة الشهيرة لبور-أينشتين مؤثرة جدًا، وكانت حاسمة في فهمهم بأن هذه المناظرة معتمدة على تطبيق علاقات عدم التحديد لهايزنبرج للجسيمات دون الذرية المفردة، وقد نشأت بعد محاضرة كومو- لبور^(٢)، ولكن توضح أن علاقة عدم التحديد لهايزنبرج لا يمكن تجنبها فقد ابتكر أينشتين التجارب الذهنية الواحدة تلو الأخرى، وسجلت جميعها عن طريق بور بالمناقشات الفيزيائية المقعنة زادت أو نقصت، وكما عرف جيدًا، فقد بلغ أوج المناظرة في التجربة الذهنية الشهيرة EPR والتي لم تكن مقنعة للرصد بواسطة بور^(٣)، طريق تجارب الضوء الكمي الحديث نفسه عاد بالمسار لتجربة ذهنية أخرى للمناظرة، وهي شق أينشتين المرتد، وأحد الأفكار لأينشتين كانت قياس مسار الفوتونات التي تمر خلال الشق المزدوج عن طريق وسائل الشق المرتد، وقد ناقش بور أن الشق المرتد سوف يظهر أهداب التداخل؛ لأنه يجعل قياس كمية الحركة غير محدد في اتجاه الاعتبار

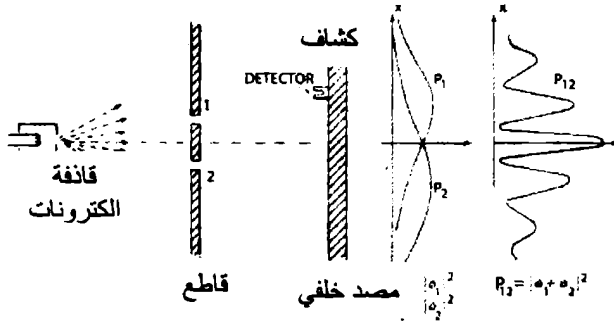
(1) Heisenberg 1927, 147-175 and 1930b, 21-23.

(٢) انظر: Bohr 1949.

(3) Einstien et al.1935. لقد كان رد بور في عام ١٩٣٥ رداً فلسفياً في المقام الأول. ولسبب بسيط أنه كان صعب الفهم فلم يقتنع أى فيزيائى بروية بور.

نفسه بعلاقة عدم التحديد لهايزنبرج⁽¹⁾ لقد طور فاينمان بعد ذلك نسخة أخرى لهذه التجربة الذهنية فأوصى بضم مصدر ضوئي في جهاز التجربة خلف الشق المزدوج التي عندها تنشئت الإلكترونات على أحد الأوجه أو على الآخر، معتمدة على الشق الذي تأتي خلاله⁽²⁾.

لقد أصبح بالإمكان في الضوء الكمي الحديث فقط أن تتحقق تجارب بالإلكترونات المفردة والفوتونات، وفي النهاية أمكن تحقيق أيضًا بعض التجارب الذهنية للمناظرة الشهيرة لبور-أينشتين، فقد قيست تلازمات EPR في مظاهر التجربة الشهيرة عندما توافرت تكنولوجياً.



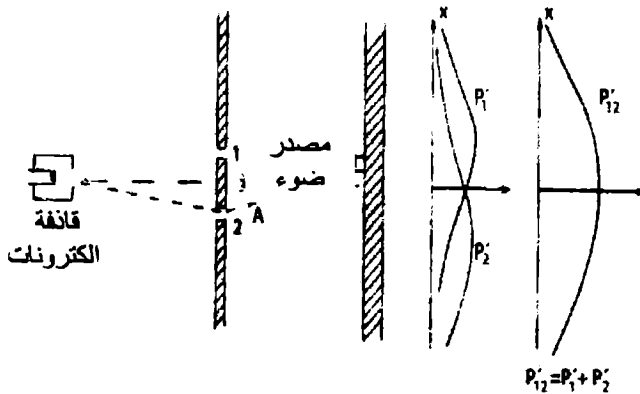
شكل (١-٧) الشق المزدوج لفاينمان دون تشتت الضوء

(Feynman et al.1965, 1-4)

(1) Bohr1949, 215-216.

وبالمناسبة فهذه واحدة من الحجج الاحتمالية القليلة في منطق بور.

(2) Feynman et al.1965, 1-4-1-9.



شكل (٧-٢) الشق المزدوج لفينمان بتشتت الضوء

(Feynman et al.1965,1-9)

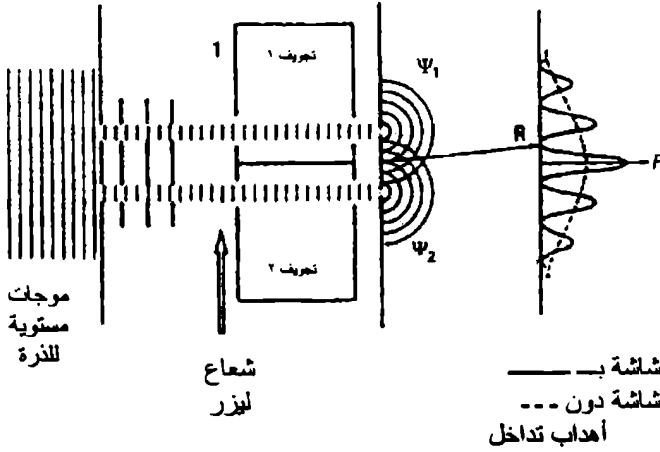
إنتاج الفوتونات المفردة^(١)، وبلانجهج نفسه لتجارب الضوء الكمي الحديث عادت بالمسار لشق الارتداد لأينشتين والميكروسكوب الضوئي لفينمان.

في عام ١٩٩١ اقترح كل من سكلي وإنجلرت ووالتر نسخة منقحة لهذه التجارب الذهنية^(٢)، وهي تعتمد على طرائق الضوء النري وعلى مرور الذرات المفردة وحيودها خلال الشق المزدوج والأجهزة الضوئية الأخرى. (وأحد التوابع للزدواجية الموجية الجسيمية في نرات الضوء الكمي والفوتونات، أو المادة وجسيمات الضوء أو الموجات تكون في تغيير تبادلي).

(1) Aspect et al. 1982.

وانظر الفصل الثاني من: Greenstein and Zajonc 1997.

(2) Scully et al.1991.



شكل رقم (٣-٧) تجربة سكلّي الفكرية

Scully, M.O., Englert, B.-G., Walther, H.: Nature 351, 111-116

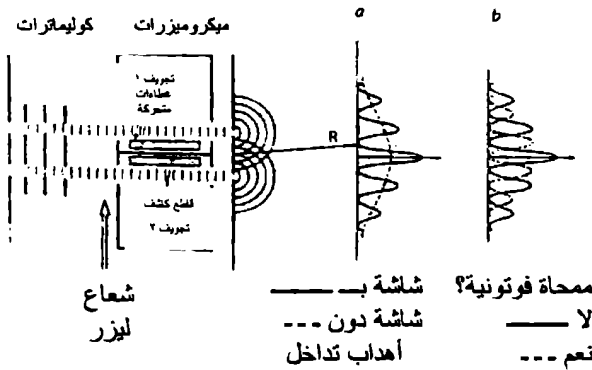
(Copyright 1991)

٧-٤-١ كيفية تخزين ومحو مسار المعلومات

كان المقترح في إثارة الذرة بوسائل الليزر إلى مستوى مثار معرف جيداً ويُعلم مساره عن طريق وسيلة تجويفية ميكروميرزيرية التي تحدث اضمحلالاً لمستوى الإثارة فيها إلى المستوى الأرضي، ويكون إعداد التجربة وترتيبها في مثل ذلك داخل منطقة التجويف بحيث يضمحل المستوى المثار باحتمالية تقترب جداً من الواحد (١) وصولاً إلى المستوى الأرضي عن طريق انبعاث فوتون، فإن انبعاث الفوتون في أحد التجويفين يُعلم مسار الذرة؛ لأن التجويف مع الفوتون يكون في مستوى مجال مختلف عن التجويف الآخر دون الفوتون، وفي هذا الفهم تكون مستويات المجال للتجويفات هي التي تخزن معلومات المسار.

عن طريق الأجهزة الإضافية يمكن أن تمحى هذه المعلومات، ويتحقق المحو عن طريق وسائل العداد الفوتوني في الحائل بين التجويفات، وتعد الفوتونات جميعاً في كلا للتجويفين. وبهذا السبيل تتمر المعلومات المرتبة في التجربة السابقة، ولكي يعاد تحقيق الوضع التجريبي بمعلومات المسار ودون للعد الفوتوني تم وضع غطائين متحركين في للتجويفين اللذين يغطيان عداد الفوتون ويمكن أن يفتحان، وعندما يفلق الغطاءان يتم ترك فوتون الذرة المضمحلة في واحد من التجويفين الذي عن طريقه يمكن الحصول على المعلومات وعندما يفتح الغطاءان يتم عد الفوتون وعن طريق ذلك تفقد المعلومات.

وقد تنبأ سكلّي وإنجلرت ووالثر بأن نمط التداخل للشق المزدوج سوف يتلاشى بقدر ما يتم تخزين معلومات المسار داخل واحد من التجويفين حتى لو لم تقرأ المعلومات، إضافة إلى أنهم قد تنبئوا بأن نمط التداخل سوف يعود للظهور إذا تم محو المعلومات المخزنة حتى لو تم عد الفوتون من التجويفين بعد مرور الذرة.



(شكل ٧-٤) المحو الكمي لسكلّي. أعيد طباعته بإذن من شركة الناشر
ماكميلان المحدودة:

Scully, M.O., Englert, B.-G., Waither, H. : Nature 351, 111-116 (copyright 1991)

المقترح هنا هو التجربة الذهنية، وقد وصفها كل من سكلّي وإنجلرت ووالثر لكي يجعلوا الفكرة الأساسية واضحة؛ أي لكي يحددوا مسارًا للذرة من خلال درجات داخلية من التحرر ثم يدعوها حينئذ تمر بالشق المزدوج. وقد شرحوا مرور الذرة خلال التجويفين والشق المزدوج ومخزون معلومات المسار والطريق الذي فيه تمحى هذه المعلومات في نموذج ميكانيكا الكم. ولكي يتم تطبيق العملية الكمية الخاصة بها وتكون متحررة من أي تشتت عشوائي أو أي اضطرابات أخرى فقد رجعوا إلى حسابات منفصلة والتي تثبت أنه في هذا النموذج تهمل كمية الحركة المنتقلة وتكون الدالة الموجية للذرة غير مؤثرة غالبًا عن طريق انبعاث الفوتون⁽¹⁾. ويكون التنبؤ بما يأتي من التجربة دون المحو الكمي كما يلي:

لكي نتأكد، وجدنا أن أهداف التداخل تختفي بمجرد أن يكون عندنا معلومات المسار، ولكن نستنتج أن هذا الاختفاء يتأصل في الترابط بين معدة القياس والنظم المشاهدة⁽²⁾.

وقد عبروا هنا عن نتيجتهم بدلالة المعلومات الكمية. وقد تطلب لذلك أن تختفي أهداف التداخل بمجرد تخزين معلومات المسار (معتبرين الفوتون المنبعث) في التجويف. ولكي يكون أكثر دقة تختزن المعلومات فقط في مستويات مجال التجويفيين إذا كانوا مختلفين "في طريقة العد" مع أو دون الفوتون المنبعث عن طريق الذرة، وهذا يتطلب أن تكون المجالات في

(1) Scully et al 1991, 113, referring to Englert et al. 1990.

ينشأ هنا عن الزعم بأن علاقة عدم التحديد لهايزنبرج ليست، من ثم، موظفة في ازدواجية الموجة-الجسيم؛ سجالاً في نطاق بصريات الكم؛ انظر ما يلي.

(2) Scully et al.1991, 111.

مستوى معرف-جيداً ذي عدد إشغالي منخفض^(١). إن معلومات المسار المخزونة تجعل أهداف التداخل تختفي، ويتم شرح هذا الفقد في التداخل بدلالة "ترابطات" بين جهاز القياس والذرة.

لقد أوضحت حساب ميكانيكا الكم أن هذه "الترابطات" نتيجة تعقيد مستوى الكم $|\Psi\rangle$ للذرة ومستويات المجال غير المعروفة $|n_1\rangle, |n_2\rangle$ للتجويفيين ١ و ٢ قبل الشريحتين. وقد افترض أن مستويات المجال هذه تختلف في طريقة العد بواسطة الفوتون الواحد في أعدادهم الإشغالية ($|n_1-n_2|=1$) وتكون مستويات المجال الخاصة متعامدة، وهذا كاف لتختفي أهداف التداخل للشق المزدوج عند الشاشة. وأخيراً يوضع العداد الفوتوغرافي والغطاءات المتحركة. ويعمل هذا الترتيب مع الغطاءات المتحركة المفتوحة على إعداد الدالة الموجية التي يرصد فيها الفوتون المنبعث دون أي معلومات للمسار، وهذا النوع من العد يحو معلومات المسار ويعيد إظهار الأهداف عند الشاشة ثم وصف البناء التجريبي للمختلف والتأثيرات التي أحدثت في الأشكال الكمية البسيطة التالية^(٢):

(1) Scully et al.1991,114.

إنهم يؤكدون أن الميزر الميكروي لن يقوم بعمل كشاف لتحديد الاتجاه إذا ما احتوى على إشعاع موجات ميكروية كلاسيكية بمتوسط كبير لعدد الفوتون (N) والتذبذبات المصاحبة للجذر التربيعي للعدد N الأكبر بكثير من واحد صحيح، المرجع السابق نفسه.

(٢) بالمقارنة —: Scully et al.1991,113-115، تم حذف التفاصيل الفنية التالية: الدالة الموجية للحالة الداخلية للذرة التي لم يضاف أية حدود جديدة في تجميعات الدوال السابقة (من ٧-٨ إلى ٧-١١)؛ إن تحديد حالات المجال في الفجوات ١ و ٢ يجب أن =

الشق المزدوج [DS]

يتم إعداد الذرة في مستوى كمية حركة حاد (محدد) أو موجة مستوية $|\Psi\rangle$ وترسل خلال شق مزدوج، وتظهر الشق المزدوج دالة الموجة $|\Psi^{DS}\rangle$ كتركيب من الموجتين $|\Psi_1\rangle, |\Psi_2\rangle$ والتي تنشأ من الشقين، وهذا يحدث حدود التراكب ومن ثم أهداف التداخل عند الشاشة:

$$|\Psi^{DS}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle), \quad (7.8)$$

$$|\Psi^{DS}|^2 = \frac{1}{2}(|\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2 + \langle\Psi_1|\Psi_2\rangle + \langle\Psi_2|\Psi_1\rangle), \quad (7.9)$$

علامة المسار [PM]

الآن وضع التجويفان ١ و ٢ قبل الشق المزدوج وأثيرت الذرة وتم عمل علامة للمسار خلال أنظمة الاثنين (التجويف إضافة إلى الشريحة) عن طريق مستويات مجال الكم العمودي $|n_1\rangle, |n_2\rangle$ يقرن الفوتون المنبعث مستويات مجال للتجويف للمرور خلال الشق الخاص، والترتيب الكامل يعد الدالة الموجية $|\Psi^{PM}\rangle$ التي في مركبات دالة موجة الشق المزدوج $|\Psi^{DS}\rangle$ يكون متشابهاً مع مستويات العداد $|n_1\rangle, |n_2\rangle$. وحيث إن هذه المستويات تكون متعامدة ويختفي أي تراكبات لهم والدالة الموجية المتشابكة تتنبأ بأهداف التداخل المفقود.

تصبح نسقية في النهاية (هنا، تكون حالات المجال مُعطاة ببساطة من خلال أعداد الموضع)؛ وتظهر على الشاشة الكثافة الاحتمالية لمستويات شاشة العداد المعقدة التي تصف ترابطات العد الفوتوني في حائط الفجوة والحصر الذري.

$$|\Psi^{PM}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi_1\rangle|n_1\rangle + |\Psi_2\rangle|n_2\rangle), \quad (7.10)$$

$$|\Psi^{PM}\rangle^2 = \frac{1}{2}(|\Psi_1|^2 + |\Psi_2|^2). \quad (7.11)$$

المحاة الكمية [QE] Quantum Eraser

وفي النهاية وضع العداد الفوتوغرافي والغطاءات المتحركة، ويتمائل الترتيب بالغطاءات المغلقة مع الـ[PM] (علامة المسار)، ولكن حين تفتح الغطاءات فإن عداد الفوتون سوف يعد الفوتونات من كلا التجويفين، ومن ثم فإن الترتيب يحدث إعداد بعض تراكب للفوتون في أحد التجويفين ولا يوجد فوتون في التجويف الآخر، ولا تزال هذه النظرة المبسطة للوضع التجريبي تهمل عد الفوتونات، ولأخذ ذلك في الاعتبار يكون وصف الذرة المعدة بدلالة جمع مستويات الكم التماثلية وغير التماثلية، بإقران أو ترابط مجال الفوتون فقط بالجزء التماثلي لدالة موجة الذرة المعدة وهذا يقلل كفاءة العد إلى النصف $(1/2)^{(1)}$ ، ونتيجة الإقران يكون معامل الكفاءة هذا $|\Psi^{PM}\rangle$ متشابكا مع التراكب $(|n_1\rangle + |n_2\rangle)$ فتمحى معلومات المسار ويعاد إثبات دالة الموجة الأصلية للشق المزدوج (2) .

(1) Scully et al. 1991,115,

(2) لقد تم قياس الجزء غير التماثل للدالة الموجية للذرة المرصودة (غير المقترنة بمستويات مجال الفوتون للتجويفات) المتشابكة مع $|\Psi^{PM}\rangle$ بطريقة الترابطات المضادة نفسها بين الشاشة والعداد الفوتوني والأهداب المضادة المقابلة، انظر Scully et al., 1991,115, والمناقشة في الفقرة 7-5. لقد استقر الحال بالنسبة إلى الدالة الموجية الأصلية للشق المزدوج عن طريق تحريك بسيط بين حائل التجويفات. هذا يتطلب =

$$|\Psi^{QE}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi^{DS}\rangle) = \frac{1}{2}(|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle), \quad (7.12)$$

وتوحي لغة المعلومات الكمية بأن الفوتون المخزون في التجويف مدرك بالحواس كما لو كانت مقروءة عن طريق جهاز القياس، وهذه تكون مصحوبة بفكرة أن انبعاث الفوتون كحقيقة واقعة (يقال، نتيجة زوال التماسك أو الاتساق)، مثل موت قطة شرودنجر، حتى إذا لم يشاهد أحد هذه الأحداث يبدو هذا المذهب الواقعي الضمني على خلاف مع مطلب أن يكون المحو الكمي لمسار المعلومات ممكناً، تعمل المحاة الكمية فقط إذا كان المخزون المكون للمعلومات بطريقة العملية العكسية، وهذا يتطلب لا تقليل القياس لدالة الموجة الميكانيكية الكمية ولا تحطيم التشنت غير المتسق لتداخل مكوناتها، ومن ثم فإن أهمية المطلب هو أن تعليم المسار يكون ارتداداً-حرراً ونقصاً؛ أي تشنت عشوائي أو أي عمليات أخرى متوفرة^(١).

وبالمصطلحات غير الصورية، ربما يكون تتابع الظواهر الكمية الموصوفة أعلى كما سبق أفضل وصف بدلالة تميز الموجات المحضرة

=ترتيباً تجريبياً آخر بعمل فتحة بين التجويفات والقواطع التي يمكن غلقها. وسوف يحدث مثل هذا الترتيب نوعاً آخر من المحو الكمي الذي يشبه تجربة الاستقطاب المشروحة في الفقرة (٧-٣). بما في ذلك ترابطات EPR .

(١) تم تأكيد هذه النقطة عدة مرات في ورقة البحث، انظر، Scully et al.1991 الصفحات ١١٣:١١١ "حيث تم تسجيل حسابات مهمة لكمية الحركة المنقلة، وفي صفحة ١١٤، حيث يؤكدون مرة أخرى بعدم وجود تغيير ملاحظ للدوال الموجية للذرات في كشافات ويلشرويج الميكروميريزية حرة الارتداد"، وذلك قبل أن يصلوا إلى شرح الكم الماحي.

والجسيمات المعودة التي أشير إليها بأعلى في الفقرة (٧-٣)، فقد أعدت الشق المزدوج موجتان متسقتان ومتداخلتان، ويعد تجويفا الموجتين المتشابكتين مع مستويات مجال التجويف المميز جيدًا محتويًا معلومات المسار من غير تداخل طويل، وفي النهاية يقيس العداد الفوتوغرافي مستويات المجال الذي يتشابه مع تقدم سير الذرة بجانب الشق المزدوج ولكن بإهمال معلومات المسار هذه.

لقد أحدثت المحاة الكمية للغز التالي: في الترتيب التجريبي [QE] مع العداد الفوتوغرافي والغطائين المتحركين قد يفتح الغطاءان المتحركان فترة طويلة بعد تخطي الذرة للتجويف. هذا الوضع التجريبي هو المحاة الكمية باختيار متأخر. كيف يمكن إعادة ظهور نمط التداخل إذا كان زمن التأخير بين مرور الذرة وفتح الغطاءات من الكبر بحيث لا تستطيع الذرة التدفق بالمرور في التجاويف؟ بمجرد أن تكون الذرة عند مسافة شبه الفراغ من التجاويف وحينئذ لا توجد إشارة يمكن لها الانتقال بينها. وهذا ما تتطلبه عليه أينشتين^(١). وقد كَيْف كل من اسكلي وإنجلرت ووالتر بعض علامات لإدوين جاينس لترتيبات تجربتهم الوحيدة^(٢):

حينئذ، لدينا مفارقة وأكثر لتمام الثلاثة EPR [أينشتين-بودولسكي-روسين] عن طريق تطبيق آلية المحو أو المسح، بدفع شعاع ذري بحرية إما: (١) حالة بمسار معروف ولا يوجد إمكانية للتداخل في أي قياس لاحق؛ (٢) حالة بوجود كلا

(1) Einstein et al. 1935.

(2) Scully et al. 1991, 114, after Jaynes 1980.

الدالتين Ψ_1, Ψ_2 بطور نسبي معروف. حينئذ لا تشاهد فقط تأثيرات التداخل ولكن يتم توقعها والتنبؤ بها، ويمكن لنا أن نقرر ما الذي نفعله بعد أن ينتهي التفاعل وأن تكون الذرة بعيدة عن التجايف، حتى لا يمكن الاعتقاد في أي تأثير فيزيائي عند الدالة الموجية لمركز الكتلة الذرية.

إن هذا الوضع المتناقض بوضوح يسهل حله حقيقة على أساس التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم، لقد أحدث التشابك في النهاية ترابطات مناسبة؛ أي للعدد الجسيمي المترابط؛ حيث إن التأثير الفيزيائي لتحضير الدالة الموجية المتشابكة يظهر فقط عند المستوى الاحتمالي في حصر أو إعداد العديد من الأزواج الجسيمية المترابطة، وهذا يكون في حالة الترابطات EPR وهذا يكون أيضاً في النقطة الحاسمة في التجربة الذهنية الخاضعة للفحص.

وقبل أن يحل هذا اللغز وقبل التحقيقات الحديثة لمناقشة مقترحات التجربة الذهنية، يجب أن يتم شرح وحل لغز آخر وأنه يتعلق بخلفية فهم المقترح، وتكون فكرته الأساسية في تعليم مسار الذرة عن طريق التشابك مع حالات (مستويات) مجال التجايف في مثل طريق معلومات المسار التي يمكن محوها بعدئذ، ومن ثم كان من متطلبات كل من سَكَلِي وإنجلرت ووالثر أن يتم في هذا السبيل تعليم مسار الذرة دون أي انتقال لكمية حركة مادية. والتساؤل فيما إذا أمكن الاحتفاظ بهذا المتطلب حتى يؤدي إلى مناظرة حول السؤال عن أي من الاثنين التاليين يكون أكثر تأسيساً علاقة عدم التحديد لهايزنبرج أم التنامية؟

٧-٤-٢ هل توجد التتامية دون عدم التحديد؟

إن الخلفية المفاهيمية للتجربة الذهنية المقترحة وتحققها ذات شقين: يتمثل الأول في السجال بين بور-أينشتين، والثاني في ميكانيكا كم التشتت (الاستطارة)، ينبنى المكون الأول على صورة الجسم ويقترح لطريق المساعدة في الكشف على تطبيق علاقة عدم التحديد لهايزنبرج والرؤية التتامية لبور للجسيمات دون الذرية المنفردة، ويخبرنا هذا الأخير عن فهم المجموعة الاحتمالية الموحدة وأنها تتبنى على صورة الموجة.

لقد أهملت مناظرة بور- أينشتين التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم في تأييد المقابلة للتفاعلات دون الذرية المنفردة لتناظرها الكلاسيكي في صورة الجسم، وناقش بور وأينشتين إمكانية دراسة الموضوع وكمية الحركة للجسيمات دون الذرية المنفردة، ومن أجل عمل ذلك طبقا الصورة الكلاسيكية للأنظمة الكمية وتفاعلاتها وناقشا إمكانية الاحتفاظ بعلاقات هايزنبرج لعدم التحديد ومبدأ التتامية لبور في خطوط حسابات بور للزدواجية الموجية الجسيمية. التي تمت مناقشتها في فقرة (٧-٢)، وتقابلها التجارب الذهنية لأينشتين وبراهاين بور والتي يكون تصورهما للفوتونات أو الإلكترونات كما لو كانت جسيمات في الفهم الكلاسيكي ولكن يجب عدم نسيان وجهة نظر هايزنبرج الذي ركز عليها في فقرة (٧-٢)، وتكون رؤية الإلكترون أو الفوتون كجسيم مبنى على تشابهات جزئية فقط، ولشرح تفاعلاتها فيما قبل تصورات النموذج الكلاسيكي المحكومة بقاعدة المقابلة لبور وفي أي حالة فإن التشابهات الجزئية تعطي فقط حسابًا غير كامل في ميدان الكم.

يعتمد الطريق التجريبي في مسماه على الفكرة الكلاسيكية لمسار الجسيم، ولكن تفسيرها يكون من المغزى لأن نوظف المفهوم التتامي لبور وعلاقة عدم التحديد لهايزنبرج في مستوى تفاعلات دون الذرة الفردية وأن نعتقد في توالد الجسيم، ومع هذا فإن هذه الفكرة تكون على خلاف التفسير الاحتمالي لميكانيكا الكم وتراوحت مجال الكم غير المحلي وظواهر شبه الموجة الكمية التي تمت مناقشتها في فقرة (٧-٣) ويكون الطريق للخروج من تشوش المفاهيم هو الأخذ بازواجية الموجة والجسيم وجديفة تفسيرها الاحتمالي، وهذا يعني أن مسار الجسيم يستطيع أن يكون له معنى في هذه التجارب.

وفي بحثهم الرئيس حاول كل من سكلّي وإنجلرت ووالتر أن يبرهنوا على أن التتامية تزيد في أساسيتها عن علاقة عدم التحديد لهايزنبرج، فأدخلوا المفهوم العام للتتامية والذي يقدم المظاهر الاحتمالية لملاحظات التتامية حتى تؤدي دوراً^(١).

لقد ميزت التتامية عالم ظواهر الكم عن عالم الفيزياء الكلاسيكية. [...] واعتماد تعليمنا أن نتقبل التتامية كحقيقة [...] بما يخص نيلز بور. في عام ١٩٢٧، [...] في كومو [...] تم نسبة جميع الأمثلة المستعملة في توضيح التتامية المسندة للموضع (شبيه- الجسيم) ولكمية الحركة (شبيه الموجة) إلى الشيء الميكانيكي الكمي وأن يكون فوتوناً أو جسيماً كتلياً

(1) Scully et al. 1991, 111.

وللمزيد من النقاش حول الموضوعات التالية انظر أيضاً: Busch and Lahti 2005;

Shillady and Busch 2006

[...] ومع هذا، فإن التتامية تكون مفهوماً عاماً، ونستطيع القول: إن المشاهدين تكونان "تتاميتان" إذا كانت المعرفة الدقيقة لواحدة منها تتضمن كل ما يمكن قياسه للشيء الآخر يتساوى في الاحتمال معه [...] وهنا حينئذ يكون "مبدأ التتامية": لكل درجة حرية يكون لأي متغير ديناميكي ثنائي من المشاهدات التتامية، وإلى حد ما يكون النقل بدقة أقل في الحدود العملية: كيف يتم إعداد نظام مادي، فيوجد دائماً قياس يكون ناتجه دون تنبؤ تام.

هنا يتم فهم التتامية في مفهوم بور كازدواجية موجية جسيمية لشيء كمي منفرد والذي يعزى إليه أي من كمية الحركة أو الموضع، وقد قورن هذا مع المزيد من الحساب العام للتتامية التي تتصاحب مع عدم تعديل مشاهدات ميكانيكا الكم وتأتي في حدود تخص الاحتمالية ويطبق حينئذ هذا المفهوم التتامي على التجربة الذهنية لأينشتاين، وتكون نسخة فاينمان لها حينما يمر الإلكترون في الشق المزدوج ويقاس مسارها بوسائل المصدر الضوئي وميكروسكوب هايزنبرج⁽¹⁾. وكانت هذه التجارب الذهنية مطلب كل من سكلي وإنجلرت ووالثر.

يؤكد هذه التتامية في ميكانيكا الكم [...] في هذه الأمثلة [...] علاقة عدم التحديد للموضع - كمية الحركة لهايزنبرج $\delta x \delta p \geq \hbar/2$ تجعلها ممكنة في تغيير ما يربط مرور الإلكترون

(1) Bohr 1949, 225-226; Feynman et al. 1965, 1-4-1-9; Heisenberg 1927; 1930a, 15; 1930b, 21.

(أو الفوتون) دون أن يكون في الوقت نفسه محدثاً اضطراباً للإلكترون (الفوتون) بما يكفي ليحطم نمط التداخل⁽¹⁾.

يتم الحصول على نمط التداخل واختفائه عند المستوى الاحتمالي فقط وطبقاً لرؤية بور نرى أن علاقة عدم التحديد يكون لها الأولوية عن التتامية وقد أخذ سكلّي بوجهة النظر هذه وتتطلب:

وجدنا في هذا العمل سبباً حول عقبة الموضع-كمية الحركة؛ أي أننا نجد طريقاً يبنّي على قياس التداخل مادياً والتقدم الحديث في الضوء الكمي، [...] للحصول على معلومات عن أي- مسار أو شبه-جسيم دون تشتيت أو ما إذا تم إدخال عوامل طور غير محكم إلى أشعة التداخل⁽²⁾.

هنا تم بوضوح نمذجة تشتت الجسيمات دون الذرية في صورة موجية؛ أي في ميكانيكا التشتت وطبقاً لهذا فقد أعطيت نتائج التشتت عن طريق سعة التشتت والتي تم وصفها بدلالة "عوامل طور" الموجات الكريّة المتشكّنة، وعلى وجه الخصوص تشتت الشعاع الجسيمي عند الشق المزدوج محدثاً "شعاعين متداخلين" والذي لهما فرق طور محدد جيداً يعتمد على زاوية التشتت، وهنا طالب كل من سكلّي وإنجلرت ووالثر في مقترحات إنشاء التجربة بعدم إضافة "كثير من عوامل طور غير محكمة" لأن يدخلوا للاستعمال، ومن ثم فسروا علاقة عدم التحديد لهايزنبرج في صورة الموجة والتي افترضوا فيها تفسير الاحتمالية، مثل تعميمهم "مبدأ التتامية".

(1) Scully et al.1991, 111.

(2) Ibid.

وقد ذهب المؤلفون في مناقشة نظام شق - الارتداد لأينشتين ونسخة فاينمان لتجربة الشق المزدوج في أي شعاع ضوئي لقياس مسار الإلكترون وميكروسكوب هايزنبرج⁽¹⁾. فأشار فاينمان بأن تشتت الضوء عند الإلكترون سيدمر نمط التداخل وأن الطريق المطلق يكون حول مبدأ عدم التحديد لهايزنبرج.

إذا كان الجهاز قادرًا على تعيين أي ثقب خلال مسار التجربة وأنها غير قادرة بأن تكون من الضعف بحيث تشوش النمط في الطريق الرئيس، فلا يستطيع أحد أن يجد (أو حتى يفكر في) طريقًا حول مبدأ عدم التحديد⁽²⁾.

كان يطالب بعكس ذلك كل من سكلي وإنجلرت ووالثر:

هل دائمًا تعمل هذه الآلية؟ لا ! فقد وجدنا طريقًا لذلك حديثًا⁽³⁾.

يجب أن نلاحظ هنا أن نموذجين مختلفين تم استعمالهما، ففي الأمثلة السابقة شرح كل من بور وهايزنبرج وفاينمان نتائج التشتت للصورة البديهية للجسيم الكلاسيكي، ففي نظام الشق المرتد شرح كل من سكلي وإنجلرت ووالثر تحقيق علاقة عدم التحديد في هذا النموذج⁽⁴⁾، فقد أوضح النموذجان تغير كمية الحركة لأي قياس موضعي يحدث (معنى علاقة عدم التحديد لهايزنبرج) في حدود مختلفة تمامًا، ففي النموذج الموجي لنظرية التشتت

(1) Scully et al. 1991, 112.

(2) Feynman et al. 1965, 1-9.

(3) Scully et al. 1991, 112., referring to Scully et al. 1989, Scully and Walther 1989, and Englert et al. 1990.

(4) Scully et al. 1991, 114.

لميكانيكا الكم يحدث القياس الموضوعي عوامل طور غير محكمة، وفي النموذج الجسيمي فإنها تحدث حذفاً لكمية الحركة.

إن المتطلب السابق في النموذجين لإيجاد سبيل حول علاقة عدم التحديد له معانٍ مختلفة، فتعني في النموذج الجسيمي البديهي عمل تجربة الشق المزدوج مع قياس مسار حر - مرتد دون حذف كمية الحركة، وتعني في ميكانيكا الكم الحصول على "معلومات أي-مسار أو شبيهه-الجسيم دون تشتت أو بطريقة أخرى إدخال عوامل طور غير محكمة للأشعة المتداخلة"⁽¹⁾، ويشترك النموذجان في السؤال الحاسم فيما إذا كانت كمية الحركة الفعلية المنقولة مصحوبة بقياس المسار من عدمه، ولكن يختلف وصف كمية الحركة المنقولة هذه جوهرياً.

اقترح كل من سنكلي وإنجلرت ووالثر في أي حالة يكون سبيل قياس دون انتقال كمية حركة لأجهزة القياس إلى الذرات التي تمر في الشق المزدوج، وحين قورنت بالتجارب الذهنية لأينشتين وفاينمان وجد أن أساس فكرتهم الجديدة هي أن قياس المسار يكون حرّاً - مرتدّاً (في الصورة الجسيمية) وأنها لا تحدث سعة تشتتية غير محكمة (في الصورة الموجية)، ويعمل المقترح على تحقيق هذا الهدف عن طريق تعليم درجة التحرر الداخلية للذرات، كما تم شرحه في فقرة (٧-٤) .

ومع هذا ففي عام ١٩٩٤ برزت مناظرة حول تساؤل فيما إذا كانت علاقة عدم التحديد لهايزنبرج أو مبدأ التناحية لبور أكثر أساساً. لقد كان

انظر عاليه; Scully et al.1991, 112 (1)

مطلب ستوري ومعاونيها وجوب أن تكون التجربة الذهنية لكل من سكلّي وإنجلرت ووالثر محدثة كمية حركة منقولة فعلية أو تحذف كمية الحركة وعوامل الطور غير المحكمة وذلك لأن:

في أي نظام عد المسار الموجود في الشق المزدوج المثبتة تكون كمية الحركة المنقولة للجسيم عن طريق العد الفعال الصحيح (القادر على حل المسار دون غموض) متعلقة بفاصل الشق في تطابق مع مبدأ عدم التحديد⁽¹⁾.

لقد وظف المؤلفون ورقة بحث عن صورة الجسيم في تعبيراتهم غير الصورية بعد أن عملوا حسابات ميكانيكا الكم التصحيحية في الصورة الموجية، لقد أخذوا قياسات المسار في الحسابات بدلالة طي الموجة الآتية مع عوامل الطور التي تحدث "توزيع السعة لكمية الحركة المحذوفة"⁽²⁾ لقد ضم باقتدار هذا التعبير غير الصوري الأفكار حول الحذف وسعات الموجة، فكان الافتراض الحاسم بأن يكون توزيع كمية الحركة الميكانيكي الكمي مصحوبا بأقصى كمية حركة منقولة p_m . وتعطي الحسابات نتيجة بأن كمية الحركة المنقولة القصوى تكون مرتبطة بالفاصل الشريحي d عن طريق $p_m d \geq \hbar$ بالتطابق مع (نسخة بور) لعلاقة عدم التحديد لهايزنبرج⁽³⁾.

لقد قاوم كل من إنجلرت وسكلّي ووالثر وقالوا: إن هذه الاعتراضات ليست جوهرية، فقد افترضوا في إحدى وجهتي النظر نظامًا تجريبيًا مختلفًا

(1) Storey et al.1994,626.

(2) Storey et al. 1994,627.

(3) Store et al.1994, 627.

وانظر أيضا المناقشة بأعلى لبور ١٩٢٨ في فقرة ٧-٢-٢.

لما يوقن بواسطة ستوري وآخرين، ومن وجهة النظر الأخرى كان مطلبهم أن تكون حساباتهم التفصيلية تثبت حثيثاً أنه لا يوجد ما يتعارض مع عدم وجود كمية حركة منتقلة فعلياً⁽¹⁾. وتم كتابة الدفوع مع الرد سوياً فيما طبعوه⁽²⁾. وانقضت المناظرة.

كان حتى وجود محاولة للتوفيق بين المواضيع عن طريق تميز نوع كمية الحركة الكلاسيكي العشوائي المحذوف من عوامل الطور في سعة التشتت الميكانيكي الكمي عند المستوى الاحتمالي، تتبأ كلا النموذجين الجسيمي والموجي الكلاسيكي بأن العديد من القياسات الموضوعية تعمل على إخفاء نمط التداخل، وهذا هو أساس للاعتبارات البديهية لمناظر أينشتين-بور والذين تبعوهما، ففي النموذج الجسيمي الكلاسيكي للتشتت يرجع هذا لحذف كمية الحركة العشوائي المنفرد غير المحكم. وفي النموذج الموجي يرجع هذا إلى عوامل الطور التي تدخل سعة التشتت، ونتيجة حدود التداخل في سعة التشتت الميكانيكي الكمي يعطي النموذجان عموماً نتائج مختلفة، وكان مطلب كل من وايزمان وهاريسون أن المقابلة وعدم - المقابلة للنموذج الجسيمي الكلاسيكي للتشتت تصنع الفرق في الأنظمة التجريبية في المناظرة⁽³⁾.

(1) Englert et al.1995, 367-368.

وفي واقع الأمر لا يقترح المرجع: Scully et al. 1994، أي قياس للموضع بالمعنى الذي نجده في المرجع: Storey et al. 1994. وكما يؤكد المؤلفون في المرجع: Englert et al. 1995، فإنهم يقترحون وضع تجايف الميزر الميكروى قبل الشق المزدوج لتجنب القياسات الموضوعية المضبوطة.

(2) Storey et al.1995, 368.

(3) انظر: Wiseman and Harrison 1995.

كانوا يطلبون في إحدى وجهات النظر بأن شق ارتداد أينشتاين والميكروسكوب الضوئي لفاينمان قد يتم تفسيرهما بدلالة توزيع كمية الحركة العشوائية الكلاسيكية المحذوفة⁽¹⁾، بينما هذا لا يكون ممكناً بالنسبة إلى النظام التجريبي المقترح بواسطة سنكلي وإنجرت ووالثر.

ومع هذا، فمن وجهة النظر الأخرى طلبوا أن لا يخرج المقترح عن نتائج ستوري التي تعتمد على أطوار عشوائية ميكانيكا الكم وبدا لهم التفكير بأن التتامية قد ينظر إليها فقط كأساسية أكثر من علاقة عدم التحديد إذا تم فهم الأخيرة بدلالة حذف كمية الحركة الكلاسيكية غير المحكمة:

وهكذا وجد مجال سنكلي ومجموعته بالمطالبة بأن تكون التتامية أساسية أكثر من مبدأ عدم التحديد، ولكن وجد مجالاً أيضاً للمطالبة عن طريق ستوري ومعاونيها لإمكانية اعتبار التتامية مؤكداً عليها دائماً عن طريق مبدأ عدم التحديد إذا تم تفسير البديل الأخير بدلالة مزيد من الفكرة البارعة والدقيقة لسعات كمية الحركة المحذوفة⁽²⁾.

ومن ثم لم نتج حقيقة التوفيق المزعوم، وبدلاً من أن تزيد تشويش المفاهيم حول التتامية وعلاقة عدم التحديد، اعتمدت "الفكرة البارعة لسعات كمية الحركة - المحذوفة" على أرضية الميكانيكا الكمية نفسها كما جعلتها

(1) بدلالة مبدأ التناظر لبور، يعني هذا أنه على المستوى الاحتمالي، فإن التشتت عند شق مزدوج يقابل النموذج الكلاسيكي للجسيم، وأيضاً (مثل تشتت رذرفورد المشروح في الفصل الثاني).

(2) Wiseman and Harrison 1995.

مطالب نظام كل من سنكلي وإنجلرت ووالتر ممكنة لتحصل على معلومات المسار دون إدخال أطوار عشوائية كبيرة⁽¹⁾، وطبقاً لذلك فلم يعط انطباعاً أن هذه المحاولة نجحت في توفيق المواضع، وعندما تتجح في النهاية أي طريقة تجريبية في تحقيق المقترح، حينذاك تستخدم درجات الحرية الداخلية لكي تعلم مسار الذرة دون كمية حركة منتقلة، وعبر إنجلرت عن الأمل بأن المناظرة تسير الآن في خطى النهاية⁽²⁾.

٧-٤-٣ العلاقات الازدواجية

حقيقة وجد طريق آخر بظهور مناظرة مسماة بتقييم كل من التنامية ومبدأ عدم التحديد لهايزنبرج وكيف يرون العلاقة حينئذ، وأدخلت ورقة البحث الرئيسة لكل من سنكلي وإنجلرت ووالتر المفهوم العام التنامية كما ذكرت آنفاً، وطبقاً لهذا فقد تم شرح التنامية بدلالة المشاهدات الكمية غير المعدلة واحتماليات قياساتها الخارجة. وتتعلق علاقة عدم التحديد لهايزنبرج فقط بزوج واحد من مثل هذه المشاهدات الكمية، فبتسمية الموضع q وكمية الحركة p ، تتعلق مثل تلك الأزواج الأخرى للمشاهدات الكمية غير المعدلة

(1) Scully et al. 1991; see above.

(2) Englert 1998.

كانت التجربة هي ما ورد في Durr et al.1998a,b,Durr and Rempe2000a التي نوقشت في الفقرة ٧-٤، وقد أعطى إنجلرت ١٩٩٨ تقريراً مختصراً عن التجربة والسجال. من الجلي أنه أدخل وايزمان وهاريسون ١٩٩٥ في زمرة المعارضين للزعم أن المخطط التجريبي المقترح يهدف إلى تمرير المعلومات دون انتقال كمية حركة ضخمة.

بالتتامية العامة في فهم سَكلي ومعاونه ومع ذلك ففي النهاية وعند هذه النقطة بدأ بتلاشي الفارق أو الاختلاف بين تتامية بور ومبدأ عدم التحديد لهايزنبرج. وقد وصفت صورياً التتامية العامة لسكلي ومعاونه عن طريق معاملات فراغ هلبرت محدثة ما يطلق عليه علاقات عدم تحديد هايزنبرج- روبرتسون⁽¹⁾. فلكل زوج من معاملات هيرميتيان A و B تعتبر علاقة عدم التحديد الصورية كالتالي⁽²⁾:

$$\Delta A \Delta B \geq \frac{1}{2} | \langle [A, B] \rangle |. \quad (7.13)$$

حيث إن $\langle A \rangle = Tr p A$ هي القيمة المتوقعة لمعامل هيرميتيان A وأن $\Delta A = \sqrt{\langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2}$ هي انحرافها المعياري، بالنسبة إلى معاملات p و q لكمية الحركة والموضع تعبر العلاقة (7,13) عن المعنى الاحتمالي الصحيح لعلاقة عدم التحديد لهايزنبرج. ومن ثم، فطبقاً لتعريف سَكلي وإنجلرت والثر أنه عند المستوى العمومي لا يوجد اختلاف صوري بين التتامية وعلاقة عدم التحديد لهايزنبرج، هذا وقد سبق توضيح أن المناظرة السابقة حول التتامية وعلاقة عدم التحديد لهايزنبرج لم تستطع أن تكون فعلية، والنقطة التي تبقى فقط هي في تساؤل كمية الحركة المنقلة في تجربة الشق المزدوج وسوف نتأقش أسفل بعد ذلك، ومع هذا فإنه ليس من الضروري دمجها مع سؤال ما إذا كانت نظرة مبدأ عدم التحديد النوعي لهايزنبرج أو التتامية النوعية لبور تكون أكثر أساسية.

(1) Robertson 1929.

(2) Dürr and Rempe 2000b, 1022.

بالنسبة إلى التجارب الحديثة التي تأخذ أي - طريق، تم تعريف علاقات عدم التحديد لهايزنبرج-روبرتسون حتى يعبر عن معلومات متعلقة بظواهر شبه الموجة أو شبه الجسم الكمية المقاسة عن طريق الأجهزة التجريبية المعطاة.

هذه المعلومات أساسًا تكون احتمالية كما أشير إلى ذلك من العلاقة (٧،١٣) وأنها تتعلق بأي طريق تجريبي يكون أكثر عمومية من أي مقترح من سنكلي ومعاونيه عن حكم البنية التجريبية التي أوصوا بقياس معلوماتها عن المسار أو محوها، وأنها لم تصمم لتحضير المستويات الكمية المتوسطة وقياسها ولكن هذه أيضًا ممكنة.

المستويات المتوسطة [1M]

لكي نعمل ذلك لا بد أن نحضر مركبًا من دالتين موجيتين $|\Psi_1\rangle, |\Psi_2\rangle$ متقدمتين على طول فروق مسار ١،٢ بفرق طول يجعلهما متداخلتين ولكن بسعتين مختلفتين C_1, C_2 :

$$|\Psi^{WP}\rangle = c_1 |\Psi_1\rangle + c_2 |\Psi_2\rangle, \quad (|c_1| \neq |c_2|) \quad (7.14)$$

هذا وقد نجح من قبل أحد السابقين في تجارب بطريقة ما في عمل ذلك^(١)، استخدم فيها ماخ-زهنر جهاز قياس التداخل ليقسم شعاع ليزر بشدة منخفضة إلى شعاعين ويجعلهما يتداخلان، ويرسل الشعاع قليل الشدة خلال نظام له مقسمين اثنين للشعاع ومرآتين بالطريقة نفسها التي تمكنها من أخذ مسارين ممكنين حتى يتم عد فوتونات مفردة في النهاية بواسطة عدادين

(1) Mittelstaedt et al.1987.

إن تجربة تحديد الاتجاه ذات معلومات مسار وإمحاء كمي غير كامل يكون لها التأثير

نفسه. انظر. Durr et al.2000a,60-65.

للفوتونات، ويمد كلا المسارين بمثل إزاحة الطور عندما يتحدان عن طريق مقسم الشعاع الثاني، للحصول على نمط التداخل، والآن في أحد فرعي التجربة يقلل الشعاع بالطريقة نفسها حتى تتمكن من عدد من الجسيمات في هذا الفرع يكون أقل من الذي بالفرع الآخر من التجربة، وما شوهد كان كالتالي، لم يختلف نمط التداخل في المجال عندما زاد شدة الشعاع في أحد الفروع وقل في الفرع الآخر، فتلاشت أهداب التداخل تدريجياً وعندما تصبح معلومات المسار مغمورة لم يطل مشاهدتها، ومن ثم لم تتحول الظواهر الكمية بعدم استمرار بين سلوكيات شبيه الجسيم وشبيهة الموجة، وأظهروا انتقالات هادئة بين نوعين من الظواهر، وهذا يقابل قياس وصلة غير محددة تماماً للمشاهدات الكمية المقابلة⁽¹⁾.

لكي نصف مثل هذه الانتقالات الهادئة بين ظواهر شبه الموجة وشبه الجسيم فإن الرؤية أو الوضوح V لأهداب التداخل وإمكانية التنبؤ P أو التمييزية D يتم تعريفهم كأشياء كمية يمكن ملاحظتها⁽²⁾ الرؤية V ببساطة هي التباين النسبي لأهداب التداخل، التي تعطي بدلالة شدة القمة وشدة القاع I_{max}, I_{min}

$$V = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}} \quad (7.15)$$

وقد يعبر عن معلومات المسار بدلالة الفيض الجسيمي النسبي الذي تتنبأ به دالة الموجة للمسارين الممكنين، وهذا أدى إلى التعريف التالي لإمكانية التنبؤ P لمسار الجسيم⁽³⁾:

(1) Busch et al.1995.

(2) Mittelstaedt et al.1987. See also Dürr et al.1998b, Dürr and Rempe 2000b.

(3) Englert 1996.

$$P = |w_1 - w_2| \quad (7.16)$$

حيث w_1 و w_2 هما احتمالية أن يعد الجسم في النهاية عند نهاية المسار ١ أو المسار ٢ على التوالي. ويمكن فهم هذين الاحتمالين بمفهوم المعرفة المبدئية حول مسار الجسم المرجح^(١)، كما لو كانت تسمح الاحتمالية الكمية بالتفسير المتجاهل، ومع هذا فإن هذا يعتبر تضليلاً، فطبقاً لميكانيكا الكم ونظرية المجال الكمي لا توجد مسارات جسيمية، ومن ثم فإنه بحدوث قاطع فلا مسار للجسيم ولا احتماليته ولكن مجرد احتمال عد الجسيمات بالطريقة المعطاة للموجات التي تم إعدادها، وهذه الاحتمالات تكون لا شيء ولكن بمربع احتمالية السعات $|c_1|^2, |c_2|^2$ لمركبات الدالة الموجية

$$|\Psi\rangle = c_1 |\Psi_1\rangle + c_2 |\Psi_2\rangle$$

تكون إمكانية التنبؤ المتعلقة بنتائج القياس للحصيلتين الممكنتين وبالأحرى مسار الجسم قبل القياس.

وبالتأوب، قد يعبر عن معلومات المسار بدلالة الاحتمال القوي L_w لاحتمال صحة مسار الجسم من قياس درجة الحرارة الداخلية في أي معلومات مسار تكون مخزنة، طبقاً للنظام التجريبي المقترح بواسطة سنكلي ومعاونيه^(٢).

$$L_w = \sum_i \max \{p(w_i, 1), p(w_i, 2)\} \quad (7.17)$$

(1) Dürr et al. 1998b, 5705,

زعم أن $|w_1 - w_2|$ ينتج عنها "WW قبلي" (تحديد الاتجاه، B.F.) معرفة ناتجة عن الفرق بين الاحتمالات، w_+ ، w_- حيث يأخذ الجسم طريقاً أو آخر.

(2) Englert 1996. Dürr et al. 1998a, b; and Dürr Rempe 2000b ; Scully et al. 1991.

حيث، W الممكن ملاحظة والذي يقيس معلومات المسار المخزنة عن طريق المستوى الداخلي، w_i هي القيمة المميزة لهذه المشاهدات الملاحظة، حيث 1، 2 هما المساران الممكنان، كما أن $(k=1,2)$ $p(w_i, k)$ هم احتمال قياس القيم المميزة w_i في المسار k . حينئذ فإن أفضل اختيار للملاحظ W (والتي تجعلها ممكنة لقراءة أقصى معلومات للمسار)، وأن التمييزية D تعرف كما يلي⁽¹⁾:

$$D = -1 + 2 \max_{i} \{L_{i}\} \quad (7.18)$$

لقد أكد التجريبيون على أن جميع هذه الأشياء التي يمكن ملاحظتها لها معنى احتمالي⁽²⁾ وما لم يناقشوه هو معنى الاحتمالات الموجودة في التعريفات، ومع هذا فقد وضح بالنسبة إلى الرؤية وإمكانية التنبؤ أو التمييز أن العلاقات الازدواجية الحاكمة⁽³⁾ التي قد تتراوح يعبر عنها في شكل علاقة عدم التحديد لهايزنبرج - روبرتسون من نوع $(\gamma, 13)$ ⁽⁴⁾.

$$P^2 + V^2 \leq 1 \quad (7.19)$$

$$D^2 + V^2 \leq 1 \quad (7.20)$$

لكي نضعها في طريق آخر، فإن هذه العلاقات المزدوجة تكافئ علاقات عدم التحديد العامة، يناسب التعبير عن السابق بدلالة المعاملات غير المعدلة مع الخصائص الصورية للف مغزلي كاذب مجرد⁽⁵⁾.

(1) Englert 1996, Jaeger et al. 1995.

(2) Dürr et al.2000b,64: لاحظ أن القدرة على التمييز (مثل القدرة على الرؤية) هي خاصية أداء موحد

(3) Englert 1996, Jaeger et al. 1995.

(4) Dürr and Rempe 2000b.

(5) المرجع السابق نفسه.

الآن، يصبح السؤال فيما إذا كان مبدأ التتامية لبور أو التحديد لهايزنبرج مبدئيًا يكون في هل يستطيع أن يقر كما يلي، من وجهة النظر الصورية حيث التتامية أو ازدواجية الموجة - الجسم يمكن أن نقرأ أو ينص عليها بدلالة العلاقات المزدوجة الموجودة بأعلاه، طبقًا للعلاقات (٧،١٩) و(٧،٢٠) والممكن ملاحظتها كازدواج V و D قد يصف رؤية الهدب الأقصى $V=1$ وتميز المسار الأقل $D=0$ أو العكس بالعكس أو بعض السلوك الكمي المتوسط (الحكم نفسه للرؤية V والتتبؤ المساري P). العلاقات (٧،١٩)، (٧،٢٠) مجرد تعبير لنوع آخر من عدم التحديد تسمى بعض علاقات عدم التحديد لهايزنبرج - روبرتسون التي يمكن أن ينص عليها بدلالة بعض معاملات مختارة مجردة مناسبة في فراغ هليبرت، الطريق في أي مستويات كمية خاصة يعتمد تحضيرها وقياسها على البنائية التجريبية، ويمكن الحصول على معلومات المسار نتيجة عدم تحديد الحركة، الموضع لهايزنبرج (كما في شق الارتداد لأينشتين أو في الميكروسكوب الضوئي لفانيمان) أو فقط يرجع إلى التعقيد الكمي (كما في النظام المقترح بواسطة سكلّي ومعاونيه) أو كلاهما^(١).

ومن ثم، إذا ما كان عدم تحديد كمية الحركة - الموضع لهايزنبرج قد استعمل في أي طريقه تجريبية أم لا يعتمد على النظام التجريبي، والسؤال المناسب فقط يكون ما إذا كانت أي كمية حركة منتقلة فعليه مصحوبة بمخزون معلومات المسار أم لا في التجارب الحديثة التي تتخذ ذلك الاتجاه غير الموجود.

(1) Dürr and Rempe 2000B, 1023-1024.

٧-٥ تجارب الاتجاه الحديث

إن رد الفعل- الحر لمقترح التجربة التي تتخذ أي طريق بواسطة سكلي وإنجلترا ووالتر في عام ١٩٩١ يتكون من ثلاث خطوات (١) إعداد أو تحضير التداخل، (٢) تعليم أو عمل علامة للمسار و(٣) محو معلومات المسار، ويكون النظام العام لميكانيكا الكم كما يلي:

(١) إعداد التداخل:

يتم إعداد أو تحضير نظام الكم في حالة حادة لكمية الحركة أو موجة مستوية. وتتقدم خلال شق مزدوج أو خلال جهاز قياس التداخل لماخ - زهدر أو خلال جهاز تجريبي مماثل، في هذا الاتجاه يتم إعداد مستويين كميين متراكبين $|\Psi_1\rangle$ و $|\Psi_2\rangle$ بمسارين مختلفين وفرق طوري، محدثين أقصى أهداف تداخل مرئية.

$$|\Psi^v\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi_1\rangle + |\Psi_2\rangle). \quad (7.21)$$

(٢) علامة على المسار:

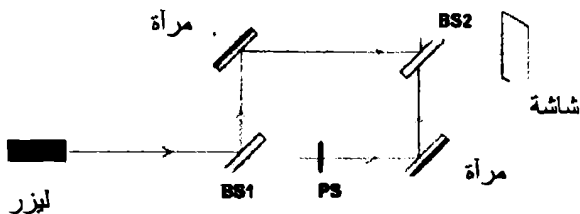
الآن بعض درجات الحرية الداخلية لنظام كمي متقدم يكون معقوداً (مشبوكاً) مع مستويات عمودية معدودة $|1\rangle$ ، $|2\rangle$. (عند هذه النقطة ينحرف نظام سكلي عن التجربة المرتب تخطيطها سابقاً، وهنا يقاس المسار ببساطة عن طريق عد فوتون الشق المغلق، وهذا يخرج خليط مستوى الكم (٢)، بينما ما زلنا هنا نعتني بالترابك). ونتيجة التعامد فلا تتداخل المستويات المعدة، وبالتالي تتلاشى حدود التداخل ويصنع تعقيد نظام الكم المتقدم والمستويات المعدة أقصى تمييز للمسار:

$$|\Psi^D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi_1\rangle|1\rangle + |\Psi_2\rangle|2\rangle). \quad (7.22)$$

٣) محو معلومات المسار:

وفي النهاية، يوضع الجهاز المضاف لكي يعد مرة أخرى تراكب كل من $|1\rangle$ و $|2\rangle$ ، في مقترح سكلّي والمجموعة كان هذا الجهاز هو العداد الفوتوغرافي الموضوع خلف الغطاء المفتوح، وعموماً فإن ما يتم الاحتياج إليه هو إعداد خطوات بسيطة تضرب في الدالة الموجية $|\Psi^{PM}\rangle$ مع بعض التراكب المناسب للمستويات المعدة $|1\rangle$ و $|2\rangle$ ، مرة أخرى محدثة أهداف متداخلة مرئية:

$$|\Psi^{v'}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}[|\Psi_1\rangle(a|1\rangle + b|2\rangle) + |\Psi_2\rangle(c|1\rangle + d|2\rangle)], \quad (7.23)$$



شكل رقم (٧-٥) جهاز قياس التداخل لماخ - زهنر

سبقت تجربة تحديد الاتجاه لمعلومات المسار والمحاكاة الكمية مقترح سكلّي ومشاركيه الذي تمت مناقشته في فقرة (٧-٤)، وأنبنى على المقترح السابق لمجموعة سكلّي^(١)، قد استعمل فيها مقياس التداخل لماخ - زهنر

(١) يعتمد (Zoo et al.1990) على مقترحات (Seully and druhl 1982, Zaionc1983) وقد تمت مناقشة التجربة في (Greenstein and jonel1997,206-209) وتم تحقيق آخر لكل من (Scully and Druhl 1982) بواسطة (Kim et al.1999).

محققة نظامًا تجريبيًا آخر ولكنها كانت متشابهة في عدة نقاط، وكانت الفكرة بسيطة جدًا لكنها بارعة في إنجاز التجربة؛ لأنها تتطلب أجهزة ضوئية ذات دقة عالية.

(١) يتم إرسال ضوء بشدة منخفضة في مقياس تداخل ماخ - زهنر كما في شكل (٧-٥) خلال نظام من اثنين من مشق الضوء BS_1 ، BS_2 ومرأتين بالطريقة نفسها التي يتقدمان على طول المسارين الممكنين ويتداخلان طبقاً لقوانين الديناميكا الكهربائية والضوء الهندسي، ويوضع في أحد جوانب التجربة مزيج طوري PS لكي يغير الإزاحة الطورية للموجتين، ومشق الضوء الثاني BS_2 يعمل على تراكبها، وهكذا يكون هذا إعدادًا لحالة التداخل الكمي، وفي النهاية يتم عد الفوتونات المفردة عن طريق العداد الفوتوني D الموضوع وراء المشق الضوئي الثاني وعلى المدى فإنها تعطي نمط التداخل.

(٢) يلي ذلك، وضع عداد بهذا - الطريق خلف المشق الضوئي الأول في كل ذراع لمقياس التداخل، وتستخدم بلورتا تحويل سفلي غير خطية X_1 ، X_2 لتجعل حالة الفوتونين المتشابهين بتردد منخفض خارج نطاق أي فوتون يمر خلالهما، ويعد العدادان الإضافيان d_1 ، d_2 الفوتونات ذات التردد المنخفض المنفصلة عن طريق المحول السفلي ويعلم المسار (بعلامة)، ويقلل قياس المسار الدالة الموجية للفوتون الواثب من فوق اليسار من أحد أذرع مقياس التداخل ويجعل نمط التداخل يختفي، والنتيجة تكون خليطاً يحدث مربع السعة نفسه؛ مثل الحالة $\langle \Psi^D |$ للنظام العام السابق في (٧.٢٢).

(٣) ومع هذا، فإنه يمكن محو معلومات المسار المأخوذة عن طريق العدادات الموضوعة بالطريق، ولفعل ذلك وضع مشق شعاع ضوئي ثالث BS_3 بين العدادين d_1 ، d_2 للفوتونات المتوقفة في الشق بالطريقة نفسها وهذه الفوتونات غير الموجودة في التجربة لها مسار بغير غموض أو التباس والآن يمكن للمحولات السفلية وللثلاث أشعة المنشقة والمعدة لحالات الكم المتداخلة في كل أنوع التجربة، وتأخذ الدالة الموجية الناتجة الشكل $\langle \Psi^1 |$ للصيغة (٧.٣٣)، ويقاس العداد المتطابق الذي يربط بين عد الفوتونات المتوقفة بالشق عن طريق d_2 وعد الفوتونات الواثبة من اليسار عن طريق D سوف تسجل نمط تداخل.

وكانت النقطة الأخيرة حاسمة: يجب ملاحظة أن نمط التداخل سوف يشاهد فقط إذا نظرنا إلى العد المتطابق بين العدادين الاثنين، وبالطبع يكون للتداخل علامة مميزة للسلوك الكمي: وسوف لا يلاحظ هذا السلوك الكمي إذا قمنا التجربة خطأ، ويلاحظ فقط عند العداد المفرد D حيث تكون التجربة خطأ: وإنما توحى إلى إظهار سلوك كلاسيكي - حيث يغيب التداخل^(١).

في هذه الترتيبات التجريبية لقياس التطابقات بين d_1 و D سيظهر نمط التداخل أيضاً ولكن مع وجوب ملاحظة أن عد كل من d_1 و d_2 غير مترابط، ويمكن فقط عد فوتونونات الشق المغلق عن طريق عداد من أحد العدادين d_1 و d_2 ، وبالتالي يمكن الحصول على نمط التداخل من تطابقات العدادين d_1 و d_2 وسيتمكن العداد D من تجميع الأهداب وأضداد الأهداب معاً؛ ليحدث اختفاء نمط التداخل للترتيب (٢). لقد تم التنبؤ بسلوك المجموعة نفسه

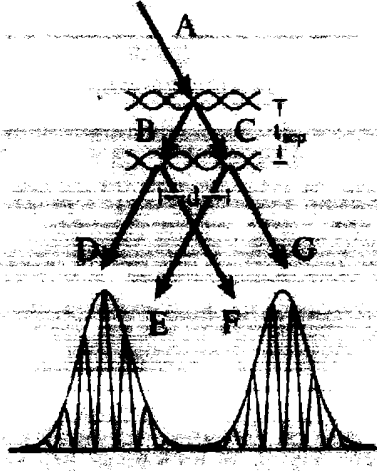
(1) Greenstein and Zajonc 1997, 208-209.

بالضبط في عام ١٩٩١ بواسطة سكلّي ومعاونيه ولوحظ في تجارب المحو الكمي التي جاءت بالتقرير بأسفل.

لقد اقترح كل من سكلّي وإنجلرت ووالتر إعادة الترتيبات التجريبية المماثلة للشق المزدوج، وكان الفرق الرئيس هو فكرة عدم القراءة الفورية لمعلومات المسار عن طريق عد الفوتونات، ولكن بتخزينها فقط طبقاً لنظامهم التجريبي ويتحقق ذلك بتشبيك موجات الكم المتقدمة خلال الشريحتين وحالات الكم للعدادات التي بطريقها، وهذا يتطلب نظاماً كمياً تحت الفحص ليكون له درجات حرية داخلية. فعندما يتشابك النظام مع حالات عداد فإن حالتها الداخلية تُعلم (تترك علامة) على المسار، ويحل هذا التعقيد محل تشابك حالة الفوتونين (٢ فوتون) في الترتيب التجريبي السابق، والآن أصبح من غير الضروري عمل أي قياس فوتوني أو عد جسيمي لكي تحصل على معلومات مسار، وأنه يكفي تحضير أو إعداد الموجات.

لقد تحقق نظام سكلّي حديثاً في مقياس التداخل الذري^(١)، وتوليد شعاع نرات الروبيديوم ^{85}Rb بوسائل مصيدة الضوء - المغناطيسي، والشق وجعله يتداخل مع نفسه، ولا يتم إرسال الشعاع الذري خلال الشق المزدوج ولكن خلال نبضتين موجيتين ضوئيتين موقفتين، واستخدموا تأثير انقسام الشعاع

تم حذف التفاصيل التقنية جميعها فيما سوف يلي (1) Durr et al. 1998a,b,2000a.



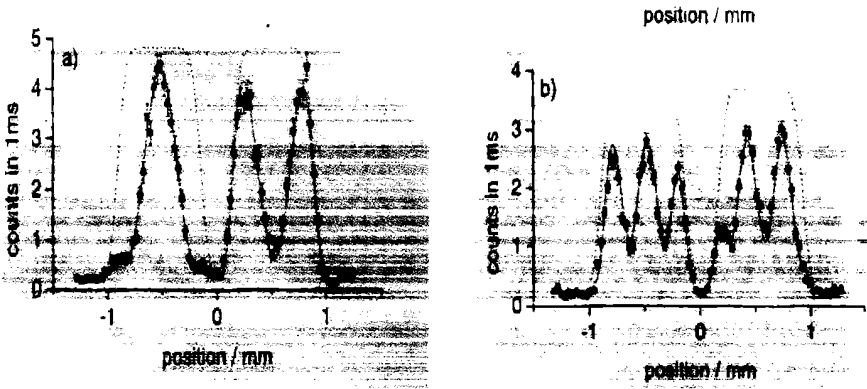
شكل (٧-٦) مقياس تداخل ذري، مطبوع بإذن من شركة النشر المحدودة
لماكميلان:

Durr, S., Nonn, T., and Rempe, G.: Nature 395, 33-37 (©1998)

الذري مرتين إلى شعاع نافذ وشعاع براج - المنعكس، وتكون المسافة بين الموجتين الضوئيتين الموقفتين مثل تلك النافذة وشعاع براج المنعكس للموجة الأولى المنشقة مرة أخرى للموجة الضوئية الموقوفة الثانية عند مسافة d والتي تكون مماثلة للمسافة بين الشريحتين في تجربة الشق المزدوج، ويشاهد التوزيع المكاني للذرات في المجال البعيد بإثارتهم عن طريق شعاع ليزر وعد الفوتونات الوميضية، في المرحلة (٠) ينشق الشعاع الذري مرة واحدة عن طريق موجة ضوئية موقوفة فقط ويتم عد الذرات في المجال البعيد، وتصل الذرات من الشعاع النافذ ومن شعاع براج - المنعكس عند موضع معرف جيداً، وعادة لا يشاهد تداخل.

في المرحلة (١) تضاف موجة ضوئية موقوفة ثانية وتولد شعاعين نافذين متداخلين وشعاعين منعكسين لبراج متداخلين، والآن يشاهد نمطين موضعين متداخلين في المجال البعيد (انظر شكل ٧-٧).

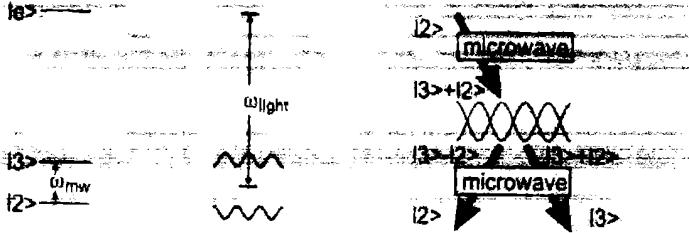
في المرحلة (٢) استخدم مستويين داخليين أو مستويات طاقة ذرة ^{85}Rb كعلامة للمسار، ينقسم المستوى الأرضي لـ ^{85}Rb إلى مستويين فائقي الدقة $|2\rangle$ و $|3\rangle$ ذات كمية حركة زاوية مختلفة وطاقة طفيفة الاختلاف، ولكي يستخدم كعلامات مسار يتم توليف موجة الضوء الموقوفة الأولى بطريقة كون ترددتها نفسها في الوسط تمامًا من الترددات التي يحتاجها لإثارة المستويات $|2\rangle$ أو $|3\rangle$ إلى المستوى المثار الأول $|e\rangle$. ولكي تتراكم هذه المستويات توضع موجة الضوء الموقوفة الأولى في حالة الرنين للموجة الميكرونية؛ أي أنها "محصورة" بين نبضات موجية ميكرونية والتي تكون رنينية مع فرق الطاقة بين المستويين $|2\rangle$ و $|3\rangle$ ، ويكون تأثير النبضة الأولى الميكرونية هو أن يكون لشعاع براج المنعكس إزاحة طور π ، وقد تستعمل هذه الإزاحة الطورية كعلامة مسار؛ حيث يكون الشعاع المنعكس بعد مرور النبضة الثانية الميكرونية في المستوى $|2\rangle$ بينما يكون الشعاع النافذ في المستوى $|3\rangle$ ، ومن ثم فإن المستوى الأرضي لذرات ^{85}Rb في المجال البعيد يخزن المعلومات التي تكون الأساسية من الشعاع النافذ أو المنعكس، ومع هذا فإن المستويين $|2\rangle$ أو $|3\rangle$ التي تخزن معلومات المسار تكون متعامدة.



شكل (٧-٧) نمط أهداب المكان في المجال البعيد لمقياس التداخل، يوضح الخط المتصل المتفق في نتائج التجربة (دوائر)، ويوضح الخط المنقط المقياس المستقل ظرفياً.

نشر بإذن من شركة النشر المحدودة لماكميلان:

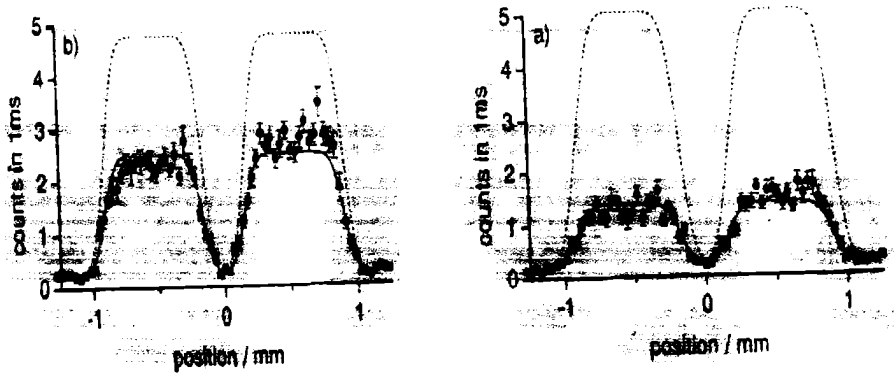
Dürs., Nonn, T., and Rempe, G.: Nature 395, 33-37 (©1998)



شكل (٧-٨) علامة المسار. نشر بإذن من شركة النشر المحدودة

لماكميلان: Dürr, S., Nonn, T., and Rempe, G.: Nature 395, 33-37 (©1998)

وبالتالي تتطابق حدود التداخل المتلاشية بـ (٧,٢٢) للنظام المخطط العام السابق، وفي الحقيقة لا يشاهد تداخل في المجال البعيد (انظر شكل ٧-٩).



شكل (٧-٩) تداخل مفقود. نمط المجال - البعيد الذري الذي تم الحصول عليه في مقياس التداخل مع التخزين بأي طريق في المستوى الذري الداخلي، في الجزء (a) الذرات فقط في المستوى $|3\rangle$ يكون عدها في المعلومات المقروءة بأي طريق وعلى النقيض في الجزء (b) حيث يتم عد جميع الذرات، وفي كلا الحالتين تفقد أهداف التداخل كنتيجة لتخزين المعلومات بأي طريق. نشرت بإذن من شركة النشر المحدودة لماكميلان: Dür, S., Nonn, T., and Rempe, G.: Nature 395, 33-37 (©1998)

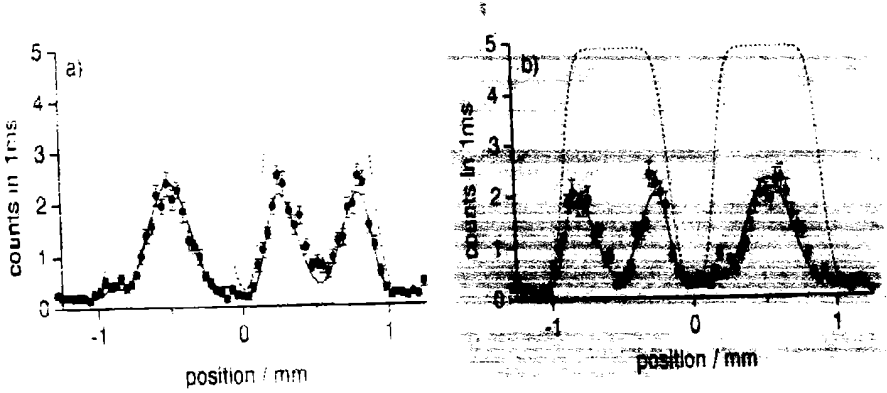
وفي النهاية في المرحلة (٣) يتم قياس المستويات الداخلية المشاهدة مع المتجهات المميزة $|2\rangle_+ |3\rangle_+$ (١)، في هذه التراكبات بأي طريق تفقد المعلومات، وطبقاً لذلك فإن أنماط التداخل تعود للظهور في المجال البعيد، وأنماط التداخل التي تخص المجموعة الفرعية لمجموعة دون تداخل المرحلة الثانية (٢)، فإنها تكون أهدافاً وأضداد أهداف والتي تضاف حتى تصل لجميع المجموعة لجميع الذرات التي تمر خلال الموجة الضوئية الموقوفة الأولى وبعد ذلك تعد بطرق مختلفة وفي النهاية يتم عدها في المجال البعيد.

(1) Dür et al.2000a, 57.

يحتاج عمل إحدى العلامات الحاسمة الارتباط بالمرحلة (٢) للتجربة، فقد أكد نرُ وآخرون أنه لكي يلاشى نمط التداخل فإنه يكفي تخزين المعلومات بأي طريق وتصل المستويات الداخلية للذرات على الشاشة دون احتياج لقراءتها^(١)، وتختفي أهداف التداخل عن طريق الحقيقة المجردة بأن الذرات في المجال البعيد تخزن المعلومات أينما تأسست من الشعاع الذري النافذ ومن شعاع يراج المنعكس، وتعد الموجات ببساطة بالطريقة نفسها بأن تلاشى حدود التداخل نتيجة تعامد المستويات الداخلية، ومن ثم، لا يجب أن يؤخذ حد معلومات المسار ببساطة، وفي جميع خطوات التجربة يعد الشعاع الذري كموجة، والبناء التجريبي للمرحلتين (١) و (٣) بعد موجات التداخل بينما يعد الترتيبان (٠) و (٢) للموجات غير المتداخلة.

لقد حقق والبوزن ومعاونوه في عام ٢٠٠٣ نظامًا تجريبيًا مماثلاً بالفوتونات والشق المزدوج، وقد استخدم في هذه التجربة مستوى الاستقطاب للفوتونات كدرجة حرية داخلية والذي يكون متطلبًا لتخزين معلومات المسار، ولقد جهزت الشق المزدوج مع ألواح الموجة الربعية ولهم تأثير إيجاد إزاحة طورية $(\frac{\lambda}{4})$ بين مركبات شدة المجال الكهربائي وإعداد الضوء المستقطب السيار.

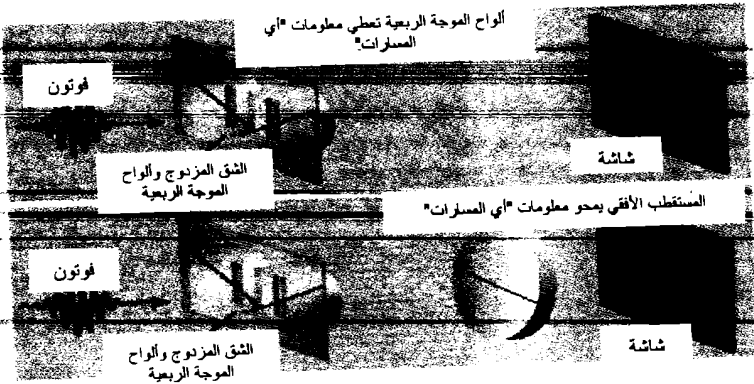
(1) Dürr and Rempe 2000a, 55.



(شكل ٧-١٠) محو كمي. نشر باين من شركة النشر المحدودة لماكميلان:

Dürr, S., Nonn, T., and Rempe, G.: Nature 395, 33-37(©1998)

ويكون للبناء التجريبي مثل مرور موجة الضوء خلال الشق ١ له استقطاب اليد اليمنى، بينما يكون لموجة الضوء التي تمر خلال الشق ٢ استقطاب اليد - اليسرى، وتعمل علامة المسار على اختفاء نمط التداخل، ووضع المستقطب الأفقي يحو معلومات المسار، (انظر شكل ٧-١١).



شكل (٧-١١) علامة مسار ومحورها للفوتونات

(Walborn et al. 2003, 341)

[...] توضع ألواح الموجة - الربعية وراء الشرائح محولة الفوتونات للدوران - يساراً والاستقطابات دوران - يمينا على التوالي، وهذا يصنع معلومات "أي - مسار" متوفرة للتجريبي وتختفي أهداب التداخل [شكل ٧-١١ (العليا)]. ومع هذا يحول المستقطب الأفقي [شكل ٧-١١ (السفلي)] أي من الاستقطاب الدائر إلى الاستقطاب الأفقي حتى لا يوجد طويلاً أي طريق للتمييز بين الفوتونات الذاهبة خلال الشق العلوي والسفلي. تمحى معلومات "أي - مسار"، و [...] تعود أهداب التداخل^(١).

لكي يدرس المحو الكمي بعد تأخير مختار، يولد زوج فوتوني متشابك من طريق بلورة غير - خطية مثل تلك المستخدمة في تجربة مقياس التداخل لماخ - زهدر التي تمت دراستها سابقاً، فكانت النقطة الحاسمة في إمكانية إعداد المحو الكمي لمعلومات المسار الآن بوسيلة المستقطب الذي يوضع في الفرع الآخر للتجربة، ويكون الترتيب التجريبي الآن كما يلي: تجهز الشق المزدوج مع ألواح الموجة - الربعية ذات المحاور عند $+45$ درجة، ويكون لها تأثير إيجاد إزاحة طور $(\frac{\lambda}{4})$ بين المركبات القطرية لشدة المجال الكهربائي والضوء المستقطب السيار الدائر المعد، ومن ثم حيثما استقطب الضوء أفقياً أو عمودياً وأعدت ألواح الموجة - الربعية التي وراء الشريحتين للموجات الضوئية المستقطبة السيارة دائرياً للوضع المضاد، ولكن لا تأثير لها على الضوء ذي الاستقطاب القطري، وفي هذا الترتيب فإن المراحل الثلاثة (١) إعداد التداخل (٢) وضع علامة للمسار و(٣) محو معلومات المسار، تكون كما يلي:

(1) Walborn et al. 2003, 341.

(١) الشق المزدوج يقوم بإعداد موجات التداخل، ولا يوضع المستقطب قبل العداد الفوتوني الذي يعد التداخل أو عدم التداخل (شكل ٧-١١) ولكن يوضع في الفرع الآخر للتجربة وذلك ليستقطب الفوتون الآخر للزوج الفوتوني المتشابك (انظر شكل ٧-١٢).



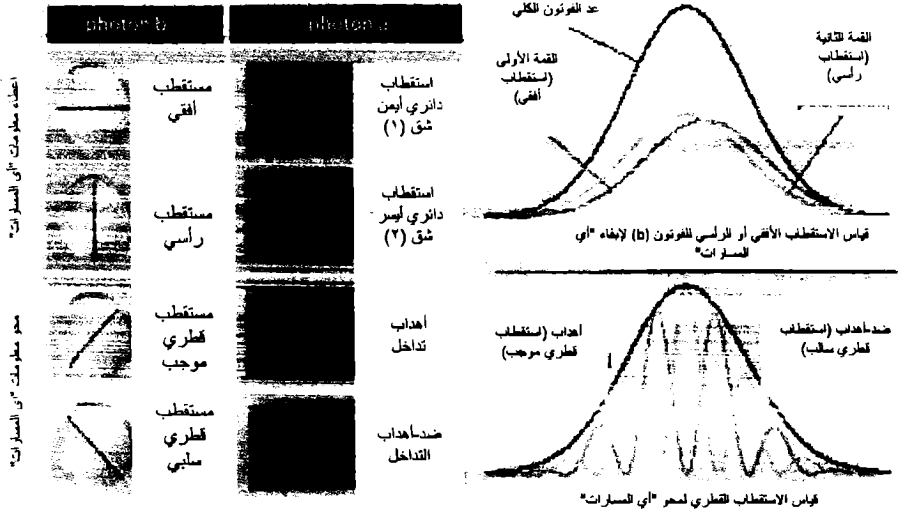
شكل (٧-١٢) ممحاة كمية بمؤخر زمني اختياري، "في تجربة التأخير الاختياري ينتج لنا زوج فوتوني متشابك والذي نسميه "a" و "b" بنفس طريقة مشاهدة للفوتون a وله استقطاب أفقي وبالتالي سيكون ضرورياً للفوتون b أن يكون مستقطباً عمودياً والعكس بالعكس" Walborn et al. 2003, 342

(٢) يقوم المستقطب الأفقي أو العمودي المفضل على الفوتون b بإعداد الفوتون a في مستوى الكم بربط خطي للمستقطبين القطريين العموديين، وبهذه الطريقة يتم إعداد الفوتون a في المستوى بمعلومات المسار عن طريق أمواج الموجة الربعية الموجودة خلف الشق المزدوج.

٣) ومع هذا فعندما يعمل المستقطب القطري على الفوتون b فإن الفوتون a يستقطب قطرياً ولا يكون هناك تأثير لألواح الموجة الربعية عليها. ومن ثم يمحو المستقطب القطري معلومات المسار المخزنة في المستقطب الفوتوني ويعاد تثبيت التداخل.

٤) وبالعودة الآن إلى المستقطب بين الاستقطاب الأفقي والقطري والعمودي والذي يجعل الموجة تمر في الشق المزدوج وألواح الموجة الربعية الفاصلة بين أهداب التداخل وعدم التداخل وأضداد الأهداب، ومرة أخرى عداد التتابع يكون حاسماً وأنه يصنف المجموعة دون نمط التداخل إلى مجموعتين فرعيتين بالأهداب ونقيض الأهداب التي تضاف حتى تصل المجموعة الكلية (انظر شكل ٧-١٣) والاختيار المؤجل يكون مجرد الاختيار للنظر إلى واحد من المجموعة الفرعية المفضلة عن الأخرى، وأنها "مقادير لتغير في دقات الحفظ ولا تغير في قصة الأحداث الماضية"^(١).

(1) Walborn et al.1993, 343.



شكل (7-13) اختيار مجموعات الكم

(Walborn et al. 2003, 343)

وعند هذه النقطة وجب ذكر تجربة أفسار الحديثة للشق المزدوج⁽¹⁾ وأنت أيضًا تحت عنوان تجربة أي-طريق مع أنها ليست واحدة (نفسها) فقد أضاف أفسار الأجهزة التالية للتجربة المعتادة للشق المزدوج ذات الفوتونات المنفردة، فقد وضع خلف الشق المزدوج عدسة تصور فتحتي الشق المزدوج على الشاشة طبقًا لقوانين الضوء الهندسي، ويكون للعدسة التأثير في عدم ظهور نمط التداخل للشق المزدوج وظهور أقصى قمتين لشدة الضوء والذي يكون صورًا للشق المزدوج، وبعد ذلك وضع شبكة قبل العدسة التي تشغل تمامًا أقل نمط تداخل للشق المزدوج وتسمح للأقصى بالمرور، وتظل الصور

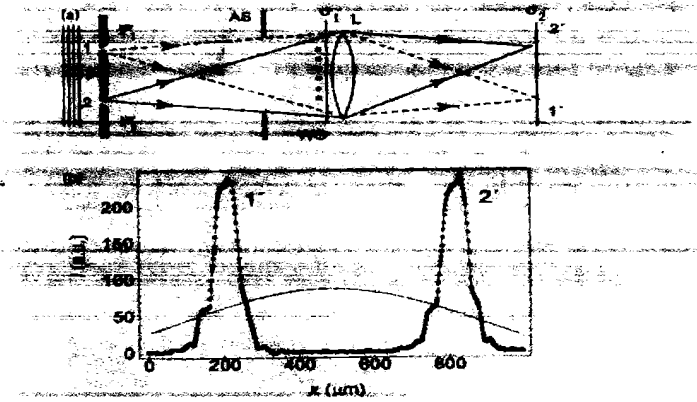
(1) Afshar 2003.

المنفصلة للشق المزدوج ظاهرة على الشاشة حتى لو طمس نمط تداخل ضعيف ومشوش على كل منهم.

وكان متطلب أفسار أن صور العدسة تغير الحيود عند الشق المزدوج إلى قياس مسار محدث- لتجربة ذلك الطريق، ومع هذا، فهذا غير حقيقي، فإن خطوات التصوير تعد الموجات فقط الخاضعة لقوانين الضوء الهندسي، ومع ذلك فإن الشق المزدوج والعدسة والشبكة التي قبل العدسة تعد الموجات، و فقط في العد الجسيمي على الشاشة تتمركز الفوتونات في النهاية، وحقيقة يكون شعاع الليزر ذا شدة عالية بضوء كلاسيكي متسق يجب أن يعطي النتائج نفسها بدقة ويكون الفرق فقط في أنه يتم عد فوتونات الشعاع ذي الشدة المنخفضة كجسيمات تبعاً للمفهوم الإجرائي للجسيم (OP) الموجود في الفقرة (٦-٣)، ولكن لا يوجد قياس مأخوذ سواء الفوتونات المارة خلال شق أو خلال الآخر كما تتطلبه تجربة تلك الطريقة حقاً، وبوضوح فلم تقم العدسة بعد الفوتونات المفردة ولا تخزن معلومات المسار للفوتونات المارة، ولم تجلب أجهزة أفسار التجريبية أية معلومات حول مسار الفوتون، لقد دعتة فكرة المسار الجسيمي أن يفكر في أن الفوتون الذي يتم عده في إحدى الصور يجب أن يكون مساره خلال الشق التالي^(١). ولكن هذه الفكرة لم تحدث أي قياس، وفي تجربة تلك الطريقة يصنع قياس المسار اختفاء أهداب التداخل، ولكن هنا فإن اختفاء أهداب التداخل يكون نتيجة الصور الضوئية، وهذا لا يحدث قياس مسار، إن اختفاء أهداب التداخل يمكن شرحها كاملاً بمساعدة صور الشريحتين بدلالة الضوء الهندسي.

(١) هذه النقطة تم نقدها أيضاً في: Kastner 2005,653.

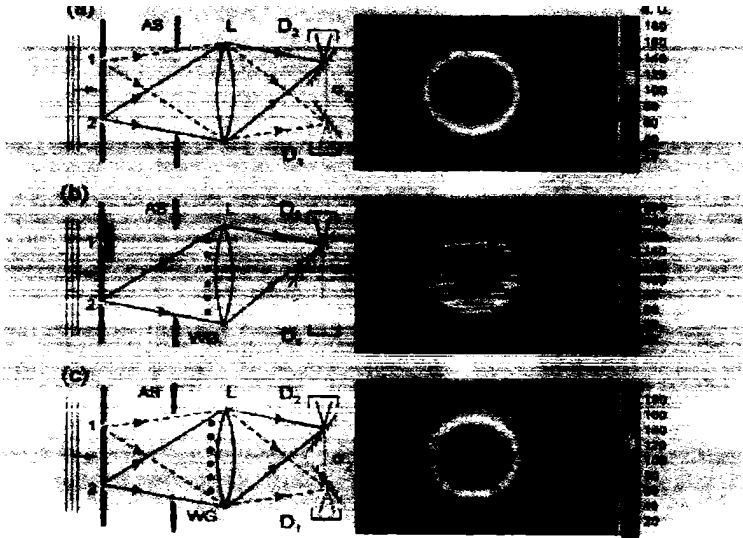
من ثم فإن تجربة أفشار لم تزد ولم تقل إثارة عن تجربة الشق المزدوج الأصلية ذات الفوتونات المفردة والإلكترونات، وهي لم تعكس أية ملامح جديدة لازدواجية الموجة - الجسيم على الإطلاق، و فقط نتيجة فكرة أن تكون الصورة الضوئية قياساً مساريًا^(١) تجعل التجربة تبدو مدهشة ومع هذا سيتطلب قياس المسار الحقيقي مخزن معلومات مساري قبل العدسة، في الاختلاف المناقض لتجارب تلك الطرق المذكورة سابقاً، فبشكل غير منطقي كان مطلباً لأفشار أن تكون تجربته النوع نفسه، ففي تجربته أعدت خطوات متتابعة لإعداد موجات في تراكبات مختلفة، فبالعدسة تتراكب صور الشريحتين، وعند النهاية فقط يتم عد الجسيمات، إذا طبقت صورة الجسم قبل القياس النهائي للموجات المعدة يظهر ارتباك للمفاهيم.



(شكل ٧-١٤) تجربة الشق المزدوج لأفشار

(Afshar 2003)

(١) ينسب أفشار Afshar في مذكرته رقم (٢٣) هذه لفكرة إلى ويلر، إلا أنه يبدو صعوبة توافق هذه الفكرة مع آراء ويلر، انظر على سبيل المثال: Wheeler 1979-1981.



شكل (٧-١٥) نتائج أفسار (Afshar 2003)

٦-٧ مسببات الظواهر

لقد ألقى مذهب ازدواجية الموجة - الجسيم وظواهر الضوء الكمي ضوءاً جديداً مدهشاً على المفهوم العلي للجسيم. فلم تكن ثمة أسباب واضحة لنتائج التجارب ذات الفوتون الواحد أو الذرة الواحدة. وقد انطوى ذلك في جانبين من الفهم، ففي أحد الجوانب لم يتم التمكن طويلاً من إعادة تكوين روايات عليّة للعد الجسيمي المنفرد بغير التباس، ومن الجانب الآخر ينتهي المفهوم العلي غير الصوري إلى عدة مفاهيم نظرية من العلية، وقد وظف كل ذلك في تفسير ظاهرة الكم مثلما ظهرت في التداخل باختلافاتها نتيجة مخزن معلومات المسار وإعادة ظهورها نتيجة المحو الكمي.

فبالنسبة إلى جميع التجارب التي تمت مناقشتها في هذا الفصل لم تتمكن طويلاً من إخبارنا بغير التباس بالرواية العلية حول عد الجسيمات المعروضة تحت الفحص، فتوجد أحداث اختلقت مجموعة متداخلة، وكأن لكل حدث من المجموعة سببين. وهو ما تم إثباته - بشكل أكثر إبهاماً - في حالة تجربة بفليجور - مانديل. وهنا يأتي فوتون واحد من شعاعي ليزر متسقين وشوهدت أهداف تداخل في مجموعة من عديد القياسات المستقلة عن بعضها وأمكن شرحها عن طريق افتراض أن كل فوتون يتداخل مع نفسه (كما أكدها ديراك)⁽¹⁾. وأتى ذلك في تراكب (3. 7) ولم يكن في خليط الفوتونات غير المتداخلة من شعاعي الليزر L_1 , L_2 ، وليست حالة الفوتونات المستقطبة التالية بطريقة أفضل من وجهة النظر العلية، فالمستقطبات عبارة عن ممتصات. فتمتص جميع الإشعاعات المستقطبة العمودية عليها، ومن ثم بوضع مستقطبين متقاطعين عند 90° فلا يدع أي شعاع ضوئي يمر من خلالها، ومع هذا إذا وضع مستقطب ثالث بينهم تظهر إشارة ضوئية بشدة ضعيفة بمجرد أن لا تكون عمودية على أي من المستقطبين الآخرين، وفي صورة الجسيم لا توجد قصة علية تستطيع أن تفسر لماذا يصنع الممتص الثالث إعادة ظهور للإشارة التي تلاشت سابقاً بواسطة هذين الممتصين، وفي تجارب ذلك الطريق أيضاً فإن الجسيمات التي تم عدّها على الشاشة لم يكن لها قصة علية غير ملتبسة كما لم يطل عدم وجود معلومات مسار مخزونة أو بمجرد تخزين معلومات المسار فإنها تمحى، وتتوفر القصة العلية فقط بدلالة معلومات المسار عند تحديد التداخل المتلاشى.

(1) Dirac 1958, 9.

يستعمل في إعادة تكوين الرواية العلية غير الملتبسة مفهوم واحد فقط للعية يسمى متطلب العلاقة غير الملتبسة والاتصال التام بين العلة والمعلول، طبقاً للمبدأ الاعتيادي للعية فإن أي تأثير يجب أن يكون له سبب يحقق هذا المتطلب، نتيجة مشكلة القياس الكمي الشهيرة فقد فشل المبدأ الاعتيادي للعية عند مستوى الأحداث المنفردة محدثة فجوات علية في شرح العمليات دون الذرية، إن القصص العلية غير الملتبسة والمفتقدة للضوء الكمي كانت أمثلة مدهشة لذلك. (حالة مسارات الجسيمات تختلف تماماً، وهنا من غير التباس عن ما يحدث على طول المسار المعطى يكون عادة ممكناً حتى لو أن ميكانيكا كم التشتت تحول دون التنبؤ بصفة عامة). ومع هذا، فبجانب هذه الفجوات العلية، يوجد العديد من القوانين الفيزيائية المستخدمة، فمن أحد الوجوه تصل الأحداث المنفردة أو العد الجسيمي عند مستوى المجموعة عن طريق قوانين الاحتمال، ومن جهة أخرى فقد وضعوا ما يعوق هذا الاتصال، وعلى سبيل المثال ما يتصل بإمكانية الإشارة.

بالفعل، في أي من التجارب السابق مناقشتها أنها شملت عدة اعتبارات للعية، وبالنسبة إلى الجسيمات دون الذرية يكون تشابكها وتقدمها وتعيينها يتبع علاقة السبب ويخضع تأثير المفهوم التفكيكي للمفهوم الجسيمي ففي فيزياء الكم تصبح العلية مفهوماً عنقودياً، وعملت النظريات الفيزيائية المختلفة المشمولة في نماذج فيزياء الكم العلية بدقة في حدود بديهية ولكنها لم تأت مجتمعة، فأدخلت في تجارب الضوء الفيزيائي والمفاهيم العلية بواسطة نظرية الكم والنسبية الخاصة استعملت على التوازي مع المبدأ الاعتيادي للعية ولكن لم تأت هذه الاعتبارات العلية مجتمعة، وعلى وجه الخصوص

فإن المفاهيم العلية التالية تكون وثيقة الصلة للتفسير النظري لظواهر الضوء الكمي:

(C₀) المبدأ التقليدي للعلية: هذا هو المبدأ الذي فيه يكون كل تأثير له علة لأي شيء يتعلق بغير التباس، ويكون متصلاً تماماً كلما أعد التجريبيون نرة مفردة وإلكتروناً أو فوتوناً وإرسالها خلال جهاز تجريبي مثل مقياس تداخل نري ومقياس تداخل ماخ - زهنرر أو شق مزدوج واستعمال طريقة دقيقة للحصول على معلومات مسار وتعيين جسيمات مفردة على الشاشة واستعمالهم المفهوم التقليدي للعلية.

(C₁) التحول الوحدوي للدالة الموجية: هذا يكون العلية في مفهوم مذهب التحديد، فيتعين التحول الوحدوي للدالة الموجية عن طريق معادلة الموجة مثلما في معادلة شرودنجر ومعادلة ديراك ومعادلات ماكسويل أو بعض معادلات مجال الكم المتقارن، وطبقاً لهذا النوع من العلية تنتشر الدالة الموجية، وهذا ما يؤخذ في الاعتبار في إعداد خطوات التجارب الكمية.

(C₂) قوانين الحفظ: وهذه تكون العلية في مفهوم حسابات بور للتنامية في المستوى الفهمي (٣) (انظر بالفصل السابع ٧-٢-٢). فقوانين الحفظ مثلما في مبادئ حفظ كمية الحركة والطاقة تعوق جميع عمليات التشتت دون الذرية متضمنة الانبعاث والانتشار وامتصاص كمات الضوء^(١) وترتبط العلية في مفهوم قوانين الحفظ باقتراب للتماثلات والقواعد فوق الانتقائية في الفيزياء، كما تمت مناقشتها في الفقرات (٤-٥) و(٤-٦).

(١) ومع ذلك فإن هذا ينطبق فقط على كمات المجال الواقعي وعمليات التشتت، وليس على العمليات الافتراضية التي تمت مناقشتها في الفقرة (٦-٤-٣).

(C₃) عليّة أينشتين: هذا هو المبدأ الذي لا يمكن أن توجد إشارة تكون هلال المسافات شبه الفضائية، وأنها تأتي من مبادئ النسبية الخاصة؛ أي من هير متغيرة لورنتز وأنها ترتبط باقتراب لحفظ الطاقة - كمية الحركة النسبوية، وفي نظرية مجال الكم يسمى هذا المبدأ أيضاً العلية - الميكروية (الدقيقة)، وطبقاً لهذا فإن كل مؤثرات المجال تعدل عند المسافات شبه الفضائية.

(C₄) الاختزال غير-الوحدوي للدالة الموجية: إن القياس يختزل أو يختصر الدالة الموجية إضافة إلى أن هذا يحدث عليّة احتمالية والقياسات الكمية تكون غير قابلة للنقض، وأنها تكون مصاحبة لعدم الاتساق وبعض أنواع الطاقة المتبددة نتيجة كمات المجال المنبعثة تلقائياً والامتصاص الجسيمي عن طريق العداد وتأيين ذرات العداد وهلم جراً وتكبير مثل تأثيرات بعض الإشارات في أجهزة القياس الماكروسكوبية.

إن المفهوم العلي (C₀) هو شكلي لما قبل - النظري، وبقدر ما كانت الفيزياء هدفاً للتفسيرات العلية فوجب الدقة بدلالة المفاهيم العلية من (C₁) - (C₄)، ومع هذا فقد وضح أن (C₄) على طرف نقيض مع (C₀). لم تحدد نظرية الكم ناتج قياس السبب المنفرد الذي يجعلها مرتبطة بغير التباس ومتصلة تماماً، وهذه تكون مشكلة القياس الكمي، ولكي ندور حولها فقد اعتبر الفيزيائيون الاحتمال الكمي للموجات التي أعدها متطابقة مع (C₁) كما لو كانت هذه الموجات أشياء فيزيائية منفردة، وبالنسبة إلى الأنظمة الكمية المتشابكة والتحول الوحدوي (C₁) للدالة الموجية وقوانين الحفظ (C₂) تنتبأ بالترابطات غير - المحلية لنتائج القياس (C₄). اعتقد أينشتين أن إشارته

العلية (C_3) تحول دون مثل هذه الترابطات الكمية غير المحلية. دار البحث EPR حول هذا التعارض الواضح⁽¹⁾ ويعرف اليوم ما إذا كانت الترابطات الكمية غير المحلية تنتهك علية أينشتين. إنها لا تكن كذلك. فالإشارة التي تخللت المسافات شبه الفضائية عن طريق وسائل التشابك الكمي تكون مستحيلة ومن ثم تعايشت بهدوء الأنواع الأربعة للعلية ($C_4 - C_1$) الموجودة في التشابك الكمي.

ومع ذلك بقيت علاقاتها تتحدى أو تتصدى لأي تغيير في المذهب الواقعي العلمي والذي يبني على اعتقاد كل من نيوتن وبلانك في وحدة الطبيعة أو قوانين التوحيد في الفيزياء، ومن ثم أخفى بوهميان نظريات لتفسير العوالم - العديدة وأشكال أخرى لميتافيزيقا الكم الناشئة والتي تأتي معها مشاكلها العلية الذاتية.

(1) Einstein et al.1935.

واقعية ما دون الذرة

تُظهر ميكانيكا الكم أن واقعية ما دون الذرة ليس لها بنية كلاسيكية. فالعالم لا يتكون من جسيمات وفقاً للمفهوم الميرولوجي والعلي للجسيم. كما أن الطبيعة ليست "متوافقة مع نفسها وبسيطة" كما ظن نيوتن.⁽¹⁾ لقد تم تفنيد الافتراضات الميتافيزيقية التقليدية حول الأجزاء المكونة للمادة عبر مسار ثورة الكم، في الوقت نفسه الذي أظهرت ومضات الضوء ومسارات الجسيم الناتجة عن أشعة ألفا ضرورة وجود جسيمات دون ذرية. أظهرت ثورة الكم أن واقعية ما دون الذرة ليست كما أرادتها الفيزياء الكلاسيكية والميتافيزيقا التقليدية. ومع ذلك يُركز السجال الفلسفي حول تأويل نظرية الكم بشكل أساسي على الخيارات التالية: إما أن تكون لا حديثاً (أو حتى تُتكرر وجود واقعية ما دون الذرة)؛ أو أن تحاول إعادة تأسيس الصورة الميتافيزيقية لواقعية تقترب قدر الإمكان من العالم المفقود للفيزياء الكلاسيكية.

لقد تم تحليل المفاهيم والمناهج والنتائج التجريبية لفيزياء ما دون الذرة من أجل إلقاء ضوء جديد على السجلات القديمة حول واقعية ما دون الذرة. وعلى وجه الخصوص تم إيضاح بعض الافتراضات الميتافيزيقية الحاسمة الكامنة وراء المنهج التجريبي للفيزياء الحديثة والمفهوم التقليدي للجسيم؛ كما

(1) Newton 1730, Query 31.

تم استقصاء الأساس التجريبي والنماذج واللغة والمبادئ التوحيدية لفيزياء الجسيمات؛ مع تحليل عاتلة مفاهيم الجسيمات الحالية؛ ومقارنة العديد من التفسيرات لازدواجية الموجة-الجسيم؛ كما تمت مناقشة بعض التجارب الحاسمة في بصريات الكم من أجل البرهنة على ما تعنيه ازدواجية الموجة-الجسيم في الممارسة الفيزيائية.

تبقى مهمة واحدة ألا وهي تلخيص المُحصلات الفلسفية. وهي تأتي على الترتيب التالي. قمت بتلخيص موقفي بشأن الواقعية العلمية (فقرة ٨-١)، وعرضت ما توصلت إليه بشأن معنى مفاهيم الكم (فقرة ٨-٢)، وناقشت مصير المفهوم التقليدي للجسيم (الفقرتان ٨-٣، ٨-٤)، وازدواجية الموجة-الجسيم (فقرة ٨-٥)، وعرضت رؤيتي النقدية لواقعية ما دون الذرة (فقرة ٨-٦).

٨-١ إعادة النظر في الواقعية العلمية

على نقيض المواقف التجريبية والبنوية التي ناقشناها في الفصلين الأول والثاني، فإنني أدافع عن نسخة أبستمولوجية معتدلة من الواقعية العلمية. وفقاً لهذه النسخة ينشأ عن النتائج المعززة جيداً لفيزياء ما دون الذرة معرفة بالواقع التجريبي. وتدعم هذه المعرفة ثلاث نسخ من الواقعية العلمية: واقعية الخصائص، والواقعية البنوية، والواقعية العلية. ومع ذلك، فإن نتائج القياس لكل من فيزياء الجسيمات وبصريات الكم تدعم كل منهم إلى درجة ما.

١- واقعية الخصائص

إن الأحداث العارضة الملاحظة في مجس للجسيمات والقيم المقاسة للكميات الفيزيائية المنسوبة إليها تنتمي دون شك إلى الواقع التجريبي. من هنا تكون الجسيمات موجودة بالمفهوم الإجرائي للجسيم كما في الفقرة ٦-٣: من الناحية الإجرائية، تكون الجسيمات:

تجميعات من الكتلة m ، والطاقة E ، والمغزلية s ، (MESQ) والشحنة q

قابلة للتموضع عن طريق مجس للجسيمات (LOCPD)
كل منها مستقلة عن غيرها (INDEP)

إن الأحداث الموضوعية الملاحظة في مجس للجسيمات تمثل مجسات مستقلة للجسيمات تسلك وفقاً لقوانين الحفظ وقواعد الجمع للكتلة، والطاقة، والمغزلية، والشحنة. يدغم المفهوم الإجرائي للجسيم واقعية تجميعات تلك الخصائص الديناميكية. وهذه التجميعات للخصائص الديناميكية أنواع طبيعية يتم اكتشافها تحت ظروف تجريبية معرفة جيداً في بيئة ماكروسكوبية. إلا أن هذه الواقعية للخصائص لا تتطلب واقعية فيزيائية لحوامل تلك الخصائص بالمعنى الكلاسيكي، ولا فهم هذه الخصائص بالمعنى الأفلاطوني. فهي لا تقر بوجود مستقل للخصائص ولا لتجميعاتها. إنها لا توجد إلا من خلال جهاز قياس ماكروسكوبي^(١).

(١) انظر: Falkenburg 1993b.

٢- الواقعية البنيوية

تعرض الخصائص الفيزيائية لجسيمات ما دون الذرة بُنى كمية في تجارب فيزياء الجسيمات وبصريات الكم. إن البنية الجبرية للموضوعات الملاحظة الكمية تمثل وصفاً صادقاً لظواهر ما دون الذرة، على حين يخفق البناء الكلاسيكي للواقعية الفيزيائية حين توضع ظواهر الكم غير المتوقعة في الحسبان.

وهذه نقطة في صالح الواقعية البنيوية؛ إذ يقدم الأساس التجريبي لأحداث التشتت دون الذرية (فقرة ٣-٣) وقوانين الحفظ التي يتم التصنيف وفقاً لها دعماً أبعد للواقعية البنيوية. وهذا ما يبرر اعتقاد الفيزيائي في النسقية الديناميكية أو "الداخلية" المرتبطة بقوانين الحفظ. ومع ذلك فإن الاعتقاد المكتمل في نظريات مجال الكم المناظرة والمفهوم الداعم لها لثبات المعايير^(١)، هو موضوع آخر تماماً. تخضع أسباب مثل هذا المعتقد والدعوى الأنطولوجية التي يتقيد بها للنقاش الفلسفي حول التفسير الفلسفي لنظرية الكم فيما وراء القياس، وهو ما لم تتم مناقشته في هذا الكتاب.

٣- الواقعية العلية

ختاماً؛ تتفق النسخة المعتدلة من الواقعية العلية مع الظواهر ونتائج القياس لفيزياء الجسيمات. تنتمي علل الكشف عن الجسيمات، ومساراتها، وأحداث التشتت، والرنينيات، والتشتت شبه النقطي عبر المقاطع، والوقائع النفائثة... إلخ، إلى الواقعية التجريبية. (وهنا يمكن توظيف حجة المعجزة

(١) انظر: Kuhlmann et al. 2002 and Lyre 2004.

الشهيرة لصالح الواقعية العلية). وحتى أسباب زحزحة هيدروجين "لامب" وانتهاكات القياس في تشتت الليبتون - النويد غير المرن العميق واقعية. إن علل كل تلك الظواهر عمليات كمية تسلك وفقاً لقوانين الحفظ والتماثلات. ومع ذلك فهذه العلل في مجال الكم غير موضعية وتعتمد على السياق. وعلى وجه العموم لا يمكن فصلها سواء عن طريق المناهج التجريبية ولا عبر نماذج فاينمان التوضيحية لنظرية مجال الكم. إن ما نلاحظه في بصريات الكم من التلازمات غير الموضعية للكشف عن الجسيمات يدعم ذلك أيضاً.

تُفقد البنية الكمية لمجال ما دون الذرة كلاً من المفهوم الكلاسيكي لتجسيم والافتراضات الميتافيزيقية الداعمة. إن الجسيمات دون الذرية ليست جواهر بذاتها كما أنها ليست أجزاء من المادة أو الضوء مُعرفة جيداً بالمعنى الكلاسيكي، ولا عللاً موضعية لمسارات الجسيم وأحداث التشتت. وهنا يتعذر الدفاع عن الواقعية الميتافيزيقية الكلاسيكية. بالمثل يتعذر التمسك بواقعية شاملة تقوم بالتأويل الحرفي لدالة الموجة الميكانيكية الكمية (بدلاً من التأويل الاحتمالي). إنها لا تقتصر إلى السند التجريبي فحسب. إنها تتعارض مع الأساس التجريبي للمفهوم الإجرائي للجسيم نفسه، للسبب الآتي: إن كل العمليات الكمية تخضع لقانون الاحتمالات. تجريبياً فإن الظهور الوحيد هو لأنواع معينة من الأحداث تحدث بتكرارات نسبية معينة. وهنا تكون طبيعة الحدث نفسها هي الحدوث الموضعي، في جهاز أو بيئة قياس ماكروسكوبية. ووفقاً لنظرية الكم وحدها؛ أعني التطور الودوي لدالة الموجة الميكانيكية الكمية، ما من شيء يحدث. وبهذا المعنى فدالة الموجة Ψ تكون عن نتائج قياس محتملة فحسب وليست عن العالم الواقعي. إضافة إلى ذلك، فإن أي

واقعية تأتي في صورة عوالم متعددة أو متغيرات خفية يجب أن تتماشى مع التلازمات غير الموضوعية للجسيمات النسبوية أو كمات المجال، وهي المهمة الصعبة، إن لم تكن المستحيلة.

٨-٢ معنى مفاهيم الكم

إن أحد معوقات مذهب الواقعية الكلاسيكية هو أن معنى المفاهيم الكمية في حد ذاتها ضيق تماما. فلمعنى المفهوم الفيزيائي جوانب إجرائية وبديهية وإشارية (انظر ملحق أ). اتضح في الفصل الخامس تفصيليًا كيف تخفق الجوانب الإجرائية والبديهية والإشارية لمفاهيم الكم. فنسبة الخصائص الفيزيائية لجسيمات ما دون الذرة لا تركز على نظرية واحدة موحدة ولكن على العديد من النظريات التي لا مقايسة فيما بينها. فللمفاهيم الحالية للجسيمات دون الذرية جوانب بديهية تنبثق عن نظرية مجال الكم، وجوانب إجرائية تركز على قوانين القياس الكلاسيكية، وجوانب إشارية تتميز بالغموض.

وعلى وجه الخصوص، تعتمد الجوانب الإجرائية للكتلة والشحنة واللف المغزلي... إلخ التي تُنسب إلى الجسيمات دون الذرية؛ على المناهج والقوانين الكلاسيكية للقياس؛ وترتبط الجوانب البديهية لهذه الكميات الدينامية بقوانين الحفظ وتماتلات نظرية مجال الكم عموماً؛ وتظل الطريقة التي تُشير بها هذه الكميات إلى جسيمات ما دون الذرة أو العمليات الكمية غير واضحة. لا يُشير مفهوم مجموعة الجسيم النظري Group theoretical particle (GT) concept في الفقرة ٦-٤ إلا إلى أنماط الجسيمات، وليس إلى

الجسيمات الفردية. ولا يمكن رأب الصدع بينه وبين المفهوم الإجرائي للجسيم (OP) إلا عبر الاعتقاد، والثقة في وحدة الفيزياء التي تظل غير مُبررة من منظور المشكلة العويصة لقياس الكم.

إن الفجوة بين المفهوم الإجرائي للجسيم ونظرائها في مجال الكم هي في واقع الأمر أقوى حجة في صالح اللا مقياسية الكونية. يركز المفهوم الإجرائي للجسيم على مناهج القياس الكلاسيكي. إنها تكون مُعطاة من خلال الكميات المألوفة للكتلة والشحنة إضافة إلى مفهوم الكم للف المغزلي الذي يتم قياسه مع ذلك بوحدات من نصف العدد الصحيح للحركة الزاوية. يتم التعبير عن الكميات الفيزيائية الكلاسيكية من قبيل الكتلة والشحنة والحركة الزاوية من خلال دوال قيم حقيقية، على حين تناظر مشاهدات الديناميكا الكمية قياسات قيم إجرائية. تُنسب الأولى إلى ظواهر فردية على حين تُعزى الثانية إلى تجميعات احتمالية؛ أي إلى الكثير من نتائج القياس التي يتم الحصول عليها تحت الظروف التجريبية نفسها.

لذا لا يمكن ردم الفجوة السيمانتيقية بين المفاهيم الكلاسيكية والمفاهيم الكمية إلا على المستوى الاحتمالي. إن المعالجة غير المتماسكة ما هي أيضًا إلا حل احتمالي لمشكلة القياس الكمي. وعلى المستوى الفردي نجد أن نظرية الكم غير متسقة سيمانتيقياً بمعنى أن الجوانب البديهية والإجرائية لمفاهيم الكم لا تتصافر في وحدة واحدة. إن نظرية القياس غير المتجانس لفيزياء الجسيمات تغلق الفجوة بينهما جزئياً لا غير. إنها تقوم بتوظيف قوانين الكم الكلاسيكية والمتوسطة لتحليل بيانات مسارات جسيمات فردية وتدمجها مع المناهج الإحصائية من أجل تصحيح النتائج على مستوى احتمالي.

يرتكز منهج القياس هذا على تأسيس مقاييس الكميات الفيزيائية نزولاً حتى الذرات والنويدات والكواركات. بديهياً يعتمد بناء المقاييس على البديهية الأرسيميدية لنظرية الأعداد الحقيقية (انظر ملحق أ). كما تركز إضافة إلى ذلك على العديد من المبادئ التوحيدية بعد-النظرية في الفيزياء. يُعد الافتراض الضمني الذهاب إلى أن الكميات الفيزيائية ثابتة من حيث الأبعاد أكثرها أهمية (انظر ملحق ب)، جنباً إلى جنب مع قوانين الحفظ والتماثل في الفيزياء، وقواعد الانتقاء الفائق لميكانيكا الكم، ومبدأ بور للتناظر (التعميمي). كل هذه المبادئ معاً تتيح إمكانية تأسيس مقاييس للطول والزمن والكتلة. تتمتع هذه المقاييس بمنزلة شبه-ترنسندنالية. ونظراً إلى أنها تمثل دعامة لكل قياسات الفيزياء، فإنها شروط لإمكانية الخبرة الفيزيائية. ومع ذلك، فإن امتداد المقاييس نزولاً إلى مجال الكم ليس اعتباطياً. إنها مدعومة تجريبياً من خلال استخدام مناهج القياس المكررة؛ أي عن طريق الاستخدام المتناسك المتوازي لمناهج قياس شبه تجريبية ونظرية كمية. من هنا، وحتى لو لم تكن ثمة وحدة بديهية للفيزياء الكلاسيكية وفيزياء الكم، فثمة وحدة سيمانطيقية خفية مؤكدة في الفيزياء. إن البناء المتناسك لمقاييس الطول والزمن والكتلة يعطي مصداقية أعلى لواقعية الخصائص التي تم الدفاع عنها عليه.

تترافق المفاهيم البديهية والإجرائية لفيزياء الجسيمات قدر الإمكان في مقاييس الكميات الفيزيائية. علاوة على ذلك يتم توظيف مبدأ التناظر التعميمي لبور من أجل تأسيس مرجع لمراكز التشتت دون الذرية. وفي سلسلة النماذج التي تمت مناقشتها في الفصل الرابع، قام مبدأ التناظر بربط تشتت "زرفورد" الكلاسيكي بقياس معاملات الشكل في الفيزياء النووية

بمفهوم "سلوك التدرّج" في تشتت الليبتون - النويد العميق غير المرن وبمؤذج "كوارك-بارتون". فقد تم عبر هذه السلسلة من النماذج إيضاح كيف لا يخفق هذا البناء الكلاسيكي لواقعية ما دون الذرة دفعة واحدة ولكن بشكل تدرّجي. قد لا يزال من الممكن وصف مراكز التشتت دون الذرية بدلالة توزيعات الشحنة الذرية، بقدر ما يكون ثمة تناظر مع النموذج الكلاسيكي لمواضع التشتت. ومن ثم فإن "النظر داخل الذرة" من خلال جسيمات تجارب التشتت يعطينا صورة واضحة وغير مُصنفة لمراكز التشتت دون الذرية طالما أن بعضًا من آثار التشتت الميكانيكي الكمي (آثار التبادل واللف) قد يُمكن إهمالها ويكون التشتت غير نسبي.

من هنا تفترض فيزياء الكم مُقدمًا لغة الفيزياء الكلاسيكية. ودون المقاييس المألوفة للكميات الفيزيائية تظل أي نظرية كمية صياغة صورية مُجردة وغير مُفسرة. وبهذا الصدد؛ فإن آراء بور المهجورة بشأن حتمية اللغة الكلاسيكية هي الصواب بعينه. وحتى التماثلات، وقوانين الحفظ، وقواعد الاختيار الفائق لفيزياء الكم دون هذه المقاييس تظل رياضة بحثية. إضافة إلى ذلك فإن تطبيق أي نظرية كمية على أنساق فردية يقوم باستخدام ضمني لإحدى النسخ الأخرى لمبدأ التناظر التعميمي. وبحسب التطور الموحد لديناميكا الكم وحدها، ينبغي التأكيد مرة ثانية على أنه ما من شيء يحدث في العالم: ليس ثمة قطعة في كشاف الجسيمات، وما من ناتج مُحدد للقياس، أو مسار للجسيمات في غرفة "ويلسون"، أو نمط تدخل على شاشة الوميض، أو آثار ملاحظة لذرة ما في مصيدة "بول".

٨-٣ المفهوم الميرولوجي للجسيم

تُعد الجسيمات - في المفهوم التقليدي - الأجزاء الميكروسكوبية المكونة للمادة والضوء. وحين تم اكتشاف الإلكترون، وجسيمات ألفا، ونواة الذرة، وتم تقديم فرض الكم، اعتبرت هذه الجسيمات مكونات للمادة والضوء بهذا المعنى. وبعد بزوغ ثورة الكم، لم يتبق إلا المفهوم الإجرائي للجسيم وعائلة مفاهيم الجسيمات الكمية التي ناقشناها في الفصل السادس.

يُفصل المفهوم الميرولوجي للجسيم عن بناء المادة والضوء بدلالة علاقة الجزء بالكل (انظر الملحق هـ). إنه يتأسس على فكرة أن المادة تتكون من أجزاء يمكن فكها وإعادة تجميعها. ترتبط هذه الفكرة بشكل وثيق بالمناهج البنائية للفيزياء الحديثة؛ أعني المنهج التقليدي للتحليل والتركيب أو منهج جاليليو التفكير - التحليلي المطبق في تجارب فيزياء الجسيمات. إن المناهج التجريبية والرياضية للفيزياء الحديثة، على نحو ما أوضحنا بالفصل الثاني، وثيقة الصلة بالافتراضات الميتافيزيقية التقليدية لنظريات الفيزياء المعروضة في الفصل الأول. إنها تهدف إلى تفكيك الظواهر الطبيعية وتركيبها، وتعتمد على قابلية القوى العلية في الطبيعة للفصل. وينبثق عن هذه القوى العلية ميتافيزيقا تقليدية من خلال فكرة الجواهر. وتُعتبر الفيزياء الحديثة عن هذه القوى العلية في حدود الذرات، والقوة، وجسيمات ما دون الذرة.

من هنا ترتبط المفاهيم الميرولوجية للجسيم بالمفاهيم العلية بشكل وثيق، حتى إن كانت الأخيرة تتلاشى تمامًا في مجال الكم. فبقدر ما تهدف تجارب الفيزياء الحديثة إلى التحليل العلي، تتشد أيضًا فصل الأجزاء المكونة للمادة والضوء. تتعامل الميتافيزيقا التقليدية مع هذه القوى العلية ككيانات

منفصلة مستقلة بذاتها. تدين الواقعية العلية الحديثة في وجودها إلى هذا
الفرض الميتافيزيقي حتى يومنا هذا. ومع ذلك فقد علمتنا فيزياء القرن
العشرين أن القوى العلية دون الذرية ليست على هذا النحو. يدعم التحليل
التجريبي في مجال الكم بعض القيود. وعلى وجه الخصوص، وفقاً لميكانيكا
الكم ونظرية مجال الكم فإن علل التلازمات الكمية غير الموضوعية، ليست
محلية كما أنها غير قابلة للفصل. ومن ثم لا يمكن الدفاع إلا عن نسخة غير
متشددة من الواقعية العلية على نحو ما اقترحنا في الفقرة ٨-١.

ولكن بالنسبة إلى الذرات والأجزاء المكونة لها، ينبغي أيضاً الوصول
إلى نسخة غير متشددة من المفهوم الميرولوجي للجسيم. ثمة إمكانية للتمييز
الواضح بين الأجزاء المكونة للمادة - وفقاً للميكانيكا الكلاسيكية -
بالمصطلحات الزمكانية؛ أي في حدود التوسع الميرولوجي المعروف جيداً
(انظر الملحق هـ). إن الأجسام التي تمثل نظاماً ميكانيكياً من قبيل النظام
الشمسي لا تتداخل ويمكن تمييزها عبر مسارات واضحة.

يختلف الوضع في ميكانيكا الكم؛ إذ يمكن هنا أن تتشابك الأجزاء
المكونة لنظام معقد وأن تتوافق الأجزاء المكونة للمادة مع معايير أضعف.
إنها تتداخل - بالمصطلحات الميرولوجية - زمكانياً وديناميكياً أيضاً. ويعني
التداخل الزمكاني هنا أنه ليس ثمة مسارات واضحة تميز جسيمات ما دون
الذرة، على حين لا يختص التداخل الديناميكي سوى بمحتويات مجال
الكوارك ومضاده والجلونات بينما يعنى التداخل الديناميكي محتويات الكوارك
ومضاده ومحتويات المجال الغروي والتي تسهم بالمزيد من كمية حركة
النويد كلما زادت طاقة تجربة التشتت (انظر الفقرة ٦-٥).

وبصفة عامة، يتم وصف الأجزاء المكونة للجزيئات والذرات بواسطة دالة موجة للعدد (N) من الجسيمات كاملة التماثل (أو نقيضها):

(٨-١) تباديل

$$\Phi^N = \sum_{k_1, k_2, \dots, k_N} c_{k_1, k_2, \dots, k_N} \phi_{k_1}^{(1)} \otimes \phi_{k_2}^{(2)} \otimes \dots \otimes \phi_{k_N}^{(N)} \pm$$

وبالتالي فليس لها أجزاء يمكن تمييزها جيدًا بمعنى أن تكون ثمة حالات ديناميكية منفصلة في فضاء هيلبرت. وما يتبقى هو تجارب التشتت التي تُعين مواضع البنى شبه النقطية على مقياس طاقة معين من ناحية (انظر الفصل الرابع والملحق د)، وقواعد الجمع للكميات الديناميكية للكل وأجزائه على الجانب الآخر. إن قواعد الجمع - في فيزياء الجسيمات - للطاقة- الكتلة، والشحنة الكهربائية، والشحنات الأخرى (التعميمية) من المذاق واللون، واللف المغزلي، وكمية الحركة؛ أمر حاسم^(١).

أيضًا فيما يختص بالمفهوم الميربولوجي للجسيم، نجد أن الصورة الكلاسيكية لواقعية ما دون الذرة لا تنهار دفعة واحدة، ولكن تدريجيًا. ويصدق هذا من نواحٍ عديدة:

١ - قابلية مكونات المادة للتعزل:

حتى إن كانت الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات ليس لها دوال موجية منفصلة داخل الذرة، إلا أنه بالإمكان عزلها عن الذرة وتعيين

(١) أنظر على سبيل المثال: Perkins 2000, 166-168.

موضعها على كشاف للجسيمات. إنها أجزاء تجريبية للمادة بالمعنى الذي يقدمه المفهوم الإجرائي للجسيم وبعض من قوانين الحفظ وقواعد الجمع. يختلف الأمر بالنسبة إلى الكواركات. فما من كسور معزولة للشحنات تم قياسها؛ حيث إنه ليس ثمة كواركات معزولة يتم تفسيرها من خلال تقييد الكواركات. إن الكواركات المكونة للمادة يمكن فقط أن تتموضع داخل النويد، في التشتت غير المرن العميق للبيوتون-نويد مع سلوك التدرج بدلالة البنى شبه النقطية التي تتبع قواعد جمع معينة للكتلة والشحنة واللف المغزلي وكمية الحركة.

٢- تميز كمات المجال:

للفيرميونات نصف عدد صحيح من اللف المغزلي. وهي تتبع إحصائيات "فيرمي" ومبدأ "باولي" اللذين طبقاً لهما يكون كل جسيم من نظام مُعقد متعدد الجسيمات في حالة ديناميكية مُخالفة؛ حيث يكون لكل حالة أعداد كمية متميزة. من هنا فحتى الأجزاء الفيرميونية للمادة لا يُمكن تمييزها زمكانياً مثل الجسيمات الكلاسيكية، إنها على الأقل متميزة ديناميكياً؛ أي يمكن تمييزها جيداً من خلال أعدادها الكمية. أما البوزونات فهي، على النقيض من ذلك، يكون لها عدد صحيح من اللف المغزلي وتتبع إحصائيات بوز-أينشتين. قد يحتل الكثير من البوزونات نفس الحالة الكمية أو نمط المجال. من هنا لا يُمكن تمييز الفوتون وكمات المجال للتفاعلات الأخرى من خلال حالاتها الكمية. هنا يُحقق أي معيار للتمييز الميرولوجي؛ إذ إنها تتداخل من حيث الشكل الميرولوجي السوري (انظر الملحق هـ)؛ لذا قد

يكون بإمكان المرء أن يقول: إن المادة تتشكل من الإلكترونات والبروتونات والنيوترونات والكواركات كأجزاء مكونة. ولكن لا ينبغي للمرء أن يقول: إن الضوء يتكون من الفوتونات. فالضوء ليس مكوناً من ذرات أو كمات ضوء مُعرفة جيداً بالطريقة التي تصورها نيوتن في عام ١٧٠٤ أو ما ظل أينشتين يتصوره عنه في بحثه الشهير عام ١٩٠٥ بشأن الأثر الكهروضوئي.

٣- محتوى المجال المعتمد على الطاقة لنظام مُركب:

قد يتضح أن نظام فيرميوني مُركب يحتوي على مجالات بوزون إضافية ليس لها أجزاء يُمكن تمييزها جيداً. فيُظهر الاختبار التجريبي لقواعد جمع كمية الحركة للكواركات في النويد أن جزءاً جوهرياً من كمية حركة النويد لا يحملها كواركات "النديّة" الثلاث التي تكون البروتون أو النيوترون. فكمية محتوى هذا المجال الإضافي تعتمد على طاقة التشتت للجسيمات المسبارة. فهي تُفسّر بدلالة كميات المجال للتفاعل القوى، المعروفة بالغرويات، وما يسمى "بحر" أزواج الكواركات ومضادات الكواركات الافتراضية. وتزيد كمية كل منهما بزيادة طاقة الجسيمات المسبارة في تجربة تشتت. وشهدت تأثيرات مماثلة في قياسات قواعد الجمع للمغزلية وكمية الحركة الزاوية^(١). وعلى ذلك فزيادة طاقة التشتت، يزداد المحتوى الديناميكي للبروتون أو النيوترون أيضاً. وبهذا المعنى يكون التركيب تحت الذري علائقياً. إنه يتغير مع تشتت الجسيمات المسبارة. لقد سار هناك جدل

(١) انظر: Perkins 2000, 162-192، وعلى وجه الخصوص 186-190، وأيضاً: Povh et

.al. 1999, 107-111

بأنه بزيادة الطاقة (أو التحليل الفراغى) يكشف التشتت غير المرن العميق
بُنَى كسرية:

بزيادة التحليل تبين الكواركات والغرويات أنها تتكون من
كواركات وغرويات والتي يتضح فى طاقات أعلى أنها هى
نفسها مركبة كذلك [...]. وتبقى الأعداد الكمية (المغزلية
والمذاق واللون،) لتلك الجسيمات كما هى؛ بينما يتغير فقط
الكتلة والحجم والقارن المؤثر α_s . وعلى ذلك، يظهر بمعنى
ما أن ثمة تشابهاً ذاتياً فى البنية الداخلية للجسيمات
المتفاعلة بقوة⁽¹⁾.

من الجدير بالذكر أن هذا التفسير يقوم على تفسير حرفى تام للعمليات
الافتراضية التى تم وصفها بدلالة رسومات "فينمان". ومن أجل دعم زعم من
هذا القبيل، قد يتم وضع الاعتبارات نفسها فى الحُسيان، كما فى حالة
زحزحة مصباح الهيدروجين أو قياس وحساب $[(g-2)/2]$ للإلكترون⁽²⁾.
وعلى أية حال، يأمل الفيزيائيون فى انتقاء الحالات الغروية وبلازما الكوارك
- غروى كمكونات للمادة على أساس الوقائع النفاثة jet events⁽³⁾. من هنا
يستمر البحث عن مناهج تجريبية أفضل لفصل محتوى الديناميكا دون الذرية
حتى فى النطاق الذى تتهار فيه الصورة الكلاسيكية للأجزاء المتمايزة للمادة.

(1) Povh et al. 1999, 111.

(2) انظر الفقرة ٦-٤، الجزء الخاص بالجسيمات الافتراضية.

(3) Perkins 2000, 190-192.

٨-٤ المفهوم العلي للجسيم

إن المفهوم العلي للجسيم لم يضعف فى النطاق دون ذرى. فقد فشل ببساطة. ثمة جسيمات وثمة علل، ولكن تأثيرات الجسيمات وعللها ليست جسيمات؛ بل موجات ومجالات كمية.

إن المفهوم العلي للجسيم وثيق الصلة بالافتراضات الميتافيزيقية التقليدية حول القوى العلية للطبيعة (انظر الفصلين الأول والثانى والفقرة ٣-٨). وطبقاً لذلك، فالجسيمات هى العلل الموضوعية للتأثيرات الموضوعية فى كشافات الجسيمات، وعلى وجه الخصوص فى تسلسلات الوقائع أو مسارات الجسيمات. والدرس المستخلص من نظرية الكم هو أنه ليس هناك مثل هذه العلل الموضوعية. ولهذا جانبان: أولهما؛ أن واقعة واحدة لا تتسبب فى الواقعة التالية (كما يتطلب المفهوم التقليدى للعلية)؛ حيث إن العلاقة بين الوقائع ليست حتمية^(١). وثانيهما؛ إن العلل بصفة عامة لا تؤثر موضعياً، كما يتطلب تحديد العلل بالجسيمات. إن العوامل العلية التى تكمن وراء قياسات المواضع المتكررة التى تُشكل مسار جسيم ليست موضوعية. والعوامل العلية نفسها قد تسبب كشف الجسيمات التى تكون نموذج التداخل خلف الشق المزدوج.

ولكل الأسباب التى تم شرحها فى الفصول من الخامس إلى السابع، فلجسيمات آثار موضوعية قابلة للملاحظة أكثر من كونها العلل غير القابلة للملاحظة لهذه الآثار. وما يتبقى هو المفهوم الإجرائي للجسيم. فالنظريات

(١) إن العلاقة احتمالية. إلا أن العلية الاحتمالية لا تنفيذ أيضاً، نظراً إلى أن العلة الاحتمالية ليست حدثاً، ولكنها حالة كمية تتنبق عن إجراء إعداد أو قياس.

الكمية الحالية لم تعد تعضد مفهومًا عليًا للجسيم. إنها على خلاف مع أية محاولة لتفسير النتائج التجريبية لفيزياء الجسيمات من خلال علل فردية لمسارات الجسيمات، ووقائع التشتت وحالات الرنين، ... إلخ. إنها لسخرية من تاريخ العلم والفلسفة ألا تأتي معظم الاعتراضات ضد المفهوم العلي للجسيم من نظرة تجريبية أو أدائية للفيزياء. إنها تأتي من الفيزياء ذاتها.

وعلى وجه الخصوص، فنتائج التجارب الحديثة للضوء الكمي لا يمكن أن تكون نتيجة قوى عليية موضعية. فلا يوجد فوتون واحد يأخذ هذا المسار أو ذاك خلال أفرع جهاز "ماخ- زندر" للتداخل، على الرغم من أن التجارب ما زالت تسمى تسمية مضللة؛ تجارب "تحديد الاتجاه". لا يوجد فوتون واحد تم خلقه بجهاز المستقطب (أى ممتص) عندما يوضع الأخير بين مستقطبين متقاطعين معًا ممتصين كل الفوتونات، وذلك في تجربة المستقطب التي تمت مناقشتها في الفقرة (٧-٣). والأكثر إدهاشًا أيضًا ألا يأتي فوتون واحد من هذا أو ذاك الليزر في تجربة "بفليجور- مندل". وفكرة أن مجال الفوتون يتكون من فوتونات فكرة مضللة ببساطة (انظر الفقرة ٨-٣). وطبقًا لنظرية المجال الكمي، يوجد مجال كمي متذبذب فقط يؤدي إلى توزيع إحصائي معين أو كشوف فوتونات، تمشيًا مع مبدأ حفظ الطاقة.

إذن ما علة مسار الجسيم؟ وما السبب في كشوف الفوتونات المتلازمة في تجربة التداخل للضوء الكمي التي تم شرحها في الباب السابع؟ من وجهة نظر نظرية المجال الكمي النسبوي، فلن تصلح فكرة الموجة الفيزيائية الرائدة ولا المتغيرات الخفية بالمعنى الذي قدمه "بوهم". وبالإضافة إلى ذلك، فقد تم توظيف مفاهيم عليية متنوعة في التفسير الفيزيائي والفلسفي لمثل هذه

الظواهر الكمية (انظر الفقرة ٧-٦). في تجربة "بفليجور- مندل"، لم يعد بالإمكان تقديم روايات عليية غير مبهمة حول كشوف الجسيمات الفردية. ففي تجربة المستقطب المشار إليها آنفاً، لا يمكن لرواية عليية بالمعنى التقليدي أن تُفسر عودة ظهور بعض الفوتونات بعد إدراج المستقطب الثالث. وفي كلتا الحالتين، يكون المفهوم النظري المسبق (أي التقليدي) للعليية في خلاف مع التطور الوجودي إلى جانب الاختزال غير الوجودي لدالة الموجة. وفي حالة تلازم "أينشتين-بودلوسكى-روز"، فالتطور الوجودي لدالة الموجة الناتجة من وضع جسمين متشابكين، واختزالهما غير الوجودي، وصحة قوانين الحفظ؛ على خلاف مع عليية "أينشتين" طالما فسرناها في حدود قوى عليية موضعية وليس فقط في حدود إمكانيات الإشارة.

وفيما يتعلق بالسعي، المينوس منه ربما، لتفسير قبل-نظري للعليية، فالإجابة الوحيدة الصالحة بالنظر إلى مثل هذه الظواهر الكمية هي الآتي: إن القوى العليية الكامنة خلفها هي عمليات كمية غير موضعية تخضع لبعض قوانين الحفظ، تؤدي إلى كشوف جسيمات موضعية، وتُظهر ازدواجية الموجة - الجسيم.

٨-٥ ازدواجية الموجة - الجسيم

نتيجة لثورة الكم، لم يعد هناك اليوم مفهوم مُفرد للجسيم ولكن بالأحرى عائلة من المفاهيم للجسيم. وعلى المقياس الماكروسكوبي، فلا يزال النموذج الكلاسيكي للجسيم مستخدماً. (وتجد أفضل تحقيق لها في الأجرام السماوية للمجموعة الشمسية). ومع ذلك، ففي فيزياء ما دون الذرة ثمة العديد

من مفاهيم الجسيمات الكمية. وعند هذه النقطة، قد يبرز التباس على مستوى المفاهيم بين الفلاسفة والفيزيائيين. فجسيمات فيزياء الجسيمات لا تُعتبر كلاسيكية ولكن تُظهر ازدواجية الموجة - الجسيم. وفي واقع الأمر، تنتمي هذه النظرة اليوم إلى الخلفية المعرفية النظرية الضمنية لأي فيزيائي.

لقد تم تحليل عائلة مفاهيم الجسيم في الفصل السادس. إن ما لا يزال مشترك فيه اللاحقون للمفهوم الكلاسيكي للجسيم (باستثناء كمات المجال الافتراضي) هو خاصية الاستقلال. إنها سمة حاسمة للمفهوم الإجرائي للجسيم، أيضًا (انظر الفقرتين ٦-٣ و ٨-١). ومثل المفهوم الميرولوجي والعلي للجسيم اللذين تمت مناقشتها سابقًا، فخاصية الاستقلال وثيقة الصلة بالمبادئ البعد-نظرية للتحليل التجريبي، أو لمنهج "جاليليو" التحليلي-التركيبى الذى يُشكل الفيزياء الحديثة. إن المذهب الذرى التقليدى والميكانيكا الإحصائية الكلاسيكية قد طرحا مسلمة أن أجزاء المادة القابلة للانفصال والمعزولة هي قوى عليا للظواهر الفيزيائية. هذه الأجزاء من المادة والقوى العلية كان من المتصور أن تكون مستقلة؛ أى أنها جواهر فى حد ذاتها. وفى مسار ثورة الكم، تقلصت درجة الاستقلالية المسندة إلى أجزاء المادة وعلل ظواهر الجسيم. ويقابل هذا التقلص فى الاستقلالية الطريقة التى انهارت بها النماذج الكلاسيكية لمراكز التشتت دون الذرية وأجزاء المادة بشكل تدريجى.

فى الفصل السادس قمت بتصنيف عدة مفاهيم مختلفة تحت خاصية الاستقلال، ولم يُسعدني ذلك كثيرًا. فمفاهيم الجسيمات العديدة التى نوقشت فى ذلك الموضوع قد وظفت تقريبًا معنيين فرعيين للاستقلال ينبعان من الميكانيكا الكلاسيكية ولكن ينبغى التمييز بينهما مُجددًا:

إن الإستقلال يعنى أن الجسيمات:

- (أ) قد تكون فى حالات عدم تفاعل أو عدم اقتران (حالة عدم الاقتران)،
(ب) وأن تكون شروطها المبدئية غير متلازمة إحصائياً (حالة عدم التلازم).

إن حالة عدم الاقتران هي استقلال ديناميكى، وحالة عدم التلازم هي استقلال إحصائى. وفى الميكانيكا الكلاسيكية، تتضمن حالة عدم الاقتران أن حوامل الخصائص الديناميكية هي كيانات فى حد ذاتها؛ أى أنها جواهر بالمعنى الذي تُقدمه الميتافيزيقا الكلاسيكية. تتفاعل هذه الجواهر بشكل مستقل عن بعضها البعض. ومن جهة الجُسيمات الكلاسيكية، ينطوي هذا على السلوك الإحصائي (حالة عدم التلازم) وبذلك تكون (حالة عدم التلازم)، في الميكانيكا الكلاسيكية، مُستقاة من (حالة عدم الاقتران). وكل من خاصيتي الاستقلال يتفق مع المبدأ المنهجي (والميتافيزيقي) لتفكيك المادة الى أجزاء مستقلة. ويعنى الاستقلال الديناميكى أن الجسيمات قوى عليا مستقلة فى حد ذاتها. ويؤدى هذا إلى استقلال إحصائى وعلى وجه الخصوص إلى كشف مستقل للـجُسيمات. كل من المعنيين وثيق الصلة بأهداف التحليل العلي والميريولوجي وبالسماة البنائية للمنهج التجريبي الذي تم شرحه فى الباب الثانى. ومع ذلك، فإن (حالة عدم الاقتران) و(حالة عدم التلازم) هما أكثر من مجرد بناءات؛ لأنه خلاف ذلك لن يكون مُمكنًا إجراء التجارب في الفيزياء، كما لن يتسنى لمفاهيم الديناميكا الفيزيائية البقاء (انظر الفقرة ٦-٦).

إن (حالة عدم التلازم)، في فيزياء الجسيمات، وثيقة الصلة بالخصائص الإحصائية لكشوف الجسيمات الفردية، بينما تكون (حالة عدم الاقتران) خاصة بعد-نظرية للجسيمات والمجالات على حد سواء. وفي مجال الكم، فإن خاصية الاستقلال، جنباً إلى جنب مع المفهوم الكلاسيكي للجسيم، تتداعى تدريجياً وتصبح متميزة عن المفاهيم المختلفة للجسيمات الكمية. تتضمن مجموعة مفهوم الجسيم النظري (حالة عدم الاقتران) دون (حالة عدم التلازم)؛ وعلى العكس من ذلك يقوم المفهوم الإجرائي للجسيم بتوظيف (حالة عدم التلازم) دون (حالة عدم الاقتران). وبالإضافة إلى ذلك، ففي المجال الكمي، فإن كلا المعنيين للاستقلال يكمن وراءه قيود متنوعة. وبالتحديد، فإن الفيرميونات والبوزونات تُضعف جوهرياً من (حالة عدم التلازم)، وتحدث روابط غير موضعية وفي إطار التمدد الاضطرابي لنظرية مجال الكم والحاجة إلى عملية إعادة تطبيع، يتضح أن (حالة عدم الاقتران) تقرب من الدرجة الأولى. (وفي هذه النقطة، تشبه الجسيمات في فيزياء الجسيمات تماماً "أشباه الجسيمات" في فيزياء الحالة الصلبة. انظر الفقرة (٤-٦). إن التفاضل بين هذين المعنيين للاستقلال قد تم فرضه بالقيود التي وضعتها نظرية الكم على هذه الافتراضات.

وعندما ينهار الاستقلال، يبقى التشابك الكمي قائماً. فهو يوصف بدلالة الحالات العديدة للجسيمات الكمية الميكانيكية وتراكباتها. إن تراكبات مركبات الحالات الكمية المتشابهة كانت أيضاً مفتاح فهم تجارب بصريات الكم ونتائج المدهشة، شاملة المحاولات الكمية quantum erasers (انظر الفقرتين ٣-٧، و٥-٧). فمن خلال الجسيمات وحدها، تبدو نتائجها متناقضة. ولكن

بمجرد تطبيق الموجات الكمية على النماذج، تختفى كل الأنغاز العلية؛ على نحو لا يمكن إنكاره، على حساب تعيين موجة احتمال مع قوة عليّة. ومع ذلك، وعلى أي حال، ماذا تعنى هذه الموجات الكمية من وجهة نظر فلسفية، عند تبني أكثر أشكال مذهب الواقعية العلمية اعتدالاً - الذى تم وصفه فى الفقرة (٨-١)؟

فى الممارسة العملية للفيزياء، وجدنا على وجه التقريب تفسيرين لازدواجية الموجة- الجسيم. يتبع أحدهما "ماكس بورن"، زاعماً بشكل برجماتي أنه فى أى عملية كمية تنتشر الموجات (وعلى ذلك يجب أن يتم إعدادهما فى حالات كم حركية خالصة، فى التجارب)، بينما يتم الكشف عن الجسيمات (تمشيًا مع التفسير الاحتمالى لدالة الموجة، وفقاً لوجهة نظر بورن وفون نيومان). ويتبع التفسير الآخر وجهات نظر "بور" حول الظواهر الكمية، زاعماً أن الموجات تتداخل وأنها مرتبطة بكمية حركة دقيقة، بينما تكون الجسيمات مستقلة وموضعية ولا تتداخل ومرتبطة بموضع دقيق.

يشترك تفسيراً ازدواجية الموجة - الجسيم فى اعتبار الموجات الكمية قوى عليّة واقعية، دون تحديدهما بالجواهر أو بالأشياء الفيزيائية بالمعنى الكلاسيكى أو حاملات موضعية للخصائص الفيزيائية. ولكن تجارب بصريات الكم تُظهر أن كلا الرؤيتين تتعامل فى النهاية مع العلاقة نفسها بين الجسيمات والموجات: فالتفسير الاحتمالى لدالة الموجة يتنبأ بالتردد النسبي للكشوف التجريبية للجسيمات. وعلى ذلك، فازدواجية الموجة - الجسيم وثيقة الصلة بالفجوة بين الاحتمالات النظرية والتكرارات النسبية التجريبية. إنها ازدواجية لاحتمالات (التي عادة ما يتم حسابها من حالات كمية الحركة)

والتكرارات التجريبية للحدث (التي يتم حسابها من مخرجات قياسات الموضع).

ما الذي يعنيه هذا، علمًا بأنه لا يوجد تفسير فيزيائي مقبول لدوال الموجة النسبوية (أو صيغ المجال) فيما وراء التفسير الاحتمالي المعتاد؟ على الرغم من أن تفسير "بورن - فون نيومان" إجرائي أكثر منه مرجعي، فدالة الموجة يجب أن يكون لها مضمون مرجعي. وفي الواقع، فإن تجارب تحديد الاتجاه بالمحاكاة الكمية التي نوقشت في الفقرة (٧-٥) تتناول معلومات بالمعنى الشئوي. إنها تبين أنه يكفي أن نخزن معلومات المسار من أجل تدمير نموذج التداخل. فليس من الضروري أن نخزنها على جهاز كمبيوتر^(١). من هنا، فالمعلومات المخزونة تتمتع بموضوعية معينة، حتى إن لم تكن الموضوعية الكاملة للشياء الفيزيائية.

ولكن بأي معنى تكون معلومات المسار المخزنة موضوعية، علمًا بأنها يمكن أن تُحَى بعد ذلك بإضافة جهاز تجريبي إضافي؟ وهنا يجب التأكيد مجددًا على أن مُصطلح "معلومات المسار" مضلل مثلما هو مُصطلح "تجارب تحديد الاتجاه". فلا يجب أخذ أى من التعبيرين حرفيًا. ففي كل مراحل تجربة من هذا القبيل، يتم إعداد الواابل الذرى كموجة؛ لذا، فالزعم الموضوعي الحاسم هو: أن نتائج الإعداد، فى فيزياء الكم، تتمتع بالموضوعية التي تتمتع بها مخرجات القياس.

(١) تم التنبؤ بذلك في: Scully et at. 1991 (انظر مناقشتي للبحث في الفقرة ٧-٤-١) كما تم اختبار ذلك من قبل دور وآخرين (انظر: Durr and Rempe 2000a, 55 ومناقشتي في الفقرة ٧-٥).

إن الفرق بين إعداد الحالات الكمية والكشف عنها عنوان مهم في النقاش الفلسفي. إن التمييز الأساسي بين الإعداد والكشف هو نوع الحالة الكمية التي يتم الحصول عليها. فالإعداد عادة ما ينتج عنه موجة غير موضعية، بينما يؤدي الكشف إلى حالة جسيم مُحدد الموضع تقريبياً. ومن الناحية الإجرائية، وعلى نقيض القياس، يعنى الإعداد ألا نقرأ المعلومة التي تحتوي عليها دالة الموجة^(١). تُشير تجارب تحديد الاتجاه التي أُجريت مؤخراً إلى أن تخزين المعلومات (التي قد تُقرأ فيما بعد أو لا تُقرأ) أمر كاف لتحديد الاختلاف بين القياس والإعداد. تحتاج هذه النقطة إلى المزيد من التحليل المفاهيمي، إلا أن بحثها يتجاوز نطاق الكتاب الحالي.

تكمّن الواقعية الوحيدة لدالة الموجة، من وجهة نظر تجريبية، في الاحتمالات الشرطية؛ إذ تظل إجراءات الإعداد الناجحة والتنبؤات التي تنتج عنها مُعجزة. فما من تجريبي بوسعه تفسير لماذا يكون وابل جسيمات محدد الطاقة، مفيداً في تجربة تشتت. وهنا يجب توظيف معيار هاكينج للواقعية، والذي يجب أن توجد وفقاً له القوى العلية غير القابلة للملاحظة إذا ما كان مُمكناً استخدامها كأداة منتظمة في تجربة ناجحة^(٢).

وفي الواقع، فقد أشار المثال الذي قدمه هاكينج إلى وابل من قاذف الإلكترونات^(٣). وما أهمله "هاكينج" فقط هو أن الوابل الذي يتم وصفه بموجة كمية ليس واقعياً كالمطرقة التي تستخدم لدق المسمار في الحائط، لأنه لا

(١) انظر الملاحظات الموضحة في: Peres 1993, 12، ومناقشتي في الفقرة (٧-٣).

(٢) انظر: Hacking 1983, 22-25، والفقرة (٢-٤).

(3) Hacking 1983, 266-273.

يُعتبر شيئاً بالمعنى الكلاسيكي. ومن وجهة نظر ميتافيزيقية تقليدية، فواقعية دالة الموجة فيما وراء الاحتمالات، تبقى لغزاً. فنظرة نقدية للواقعية الكمية يجب أن تجد طريقاً وسطاً بين التجريبية والواقعية الميتافيزيقية.

٦-٨ واقعية ما دون الذرة: رؤية نقدية

من وجهة نظر كانطية، نجد أن خيارات الواقعية الميتافيزيقية هنا، والتجريبية والأداتية هناك، والسجلات الراهنة حولهما بقايا للصراع قبل-النقدي بين العقلانية والتجريبية في القرن الثامن عشر. هل ثمة مخرج عبر التفسير النقدي لواقعية ما دون الذرة؟ بالنسبة إلى مثل هذا التفسير، يجب إعادة النظر في السمات الكانطية التالية للرؤية النقدية للواقعية الفيزيائية^(١):

١- الواقعية الفيزيائية تجريبية، وليست ميتافيزيقية. بمعنى أن موضوع المعرفة الفيزيائية هو واقعية تجريبية بالمعنى الكانطي وليست عالماً من الأشياء في حد ذاتها.

٢- تُحدد أدواتنا الإدراكية بنية الواقعية الفيزيائية. وإليهم تنتمي مفاهيم ومبادئ:

١- المقادير الشاملة والكثيفة،

٢- الجوهر،

٣- العلبة.

(١) لأسباب واضحة يتم هنا تجاهل جُل نظرية كانط في المعرفة.

ينبغي هنا ملاحظة أن مقولة كانط للجوهر ليست متطابقة مع المفاهيم الميتافيزيقية التقليدية للجواهر باعتبارها أشياء في حد ذاتها (أي كيانات مستقلة أو أشياء في حد ذاتها تحمل الكيفيات الأولية). إنها أكثر اعتدالاً. فالجوهر عند كانط هو فحسب مفهومنا القبلي لكيان يتمتع بخواص مستقرة وقابلة لإعادة التعريف. ووفقاً لمبادئ كانط الميتافيزيقية للعلم الطبيعي، فإن جوهر الميكانيكا الكلاسيكية هو مقدار كمية الحركة، التي يتم حفظها. ويخضع جوهر الفيزياء إلى قانون الحفظ^(١). وبالمثل تكون العلوية بالنسبة إليه مفهومنا القبلي للرابطة الضرورية بين الأحداث المتعاقبة التي تساعد في تأسيس ترتيب زمني موضوعي^(٢).

٣- لا يُمكن معرفة الواقعية الفيزيائية بشكل كامل. إن مفاهيم الجواهر النهائية والعلل هي أفكار تنظيمية فحسب، ينشأ عنها المبادئ المنهجية لتحليل المادة إلى أجزاء مكونة أصغر فأصغر والبحث عن القوى الأساسية للفيزياء.

٤- الواقعية الفيزيائية علاقاتية بشكل شامل^(٣). فليس ثمة جواهر في حد ذاتها، ثمة فقط موضوعات للمعرفة الفيزيائية ترتبط بغيرها من موضوعات المعرفة الفيزيائية. ومن وجهة نظر كانط، فإن هذه هي

(١) انظر : Kant 1786, 537-542, and von Weizsäcker 1971, 383-404.

(٢) انظر : Kant 1781/87, A 189-211/B 232-256.

(٣) انظر : Kant 1781/87, A 265/B 321 : "إن التحديدات الداخلية للظاهرة المادية في الفراغ [...] لا تعدو أكثر من كونها علاقات، وهي في حد ذاتها مجموع كلي للعلاقات فحسب".

المُحصلة الأنطولوجية لرفض الأشياء في ذاتها ككيانات مستقلة معرفيًا.

ماذا يتبقى من هذه الموضوعات الكانطية وكيف تُساعد في تطوير نظرة نقدية لواقعية ما دون الذرة؟ ثمة حالة من الشد والجذب فيما يتعلق بالنقطتين (١) و(٢).

وفقًا للنقطة (١)، تكون الواقعية الفيزيائية مُعطاة تجريبيًا؛ ووفقًا للنقطة (٢) فإنها تعتمد على بناءاتنا. يبدو الزعم الأول داعماً للتجريبية، فيما يدعم الزعم الثاني البنائية. إلا أنهما يكملان بعضهما بعضًا في الرؤية الكانطية. فبحسب كانط، تنتمي البناءات الأساسية لفهمنا إلى الواقعية التجريبية. فقد ظن أن هذه البناءات (مفاهيم الجوهر والعلية على وجه الخصوص) قبلية، وليست مطروحة للمراجعة، وتُعبّر عن بنية الظواهر.

تُظهر الفيزياء الكمية أن واقعية ما دون الذرة لها بنية مختلفة. فالنتائج التجريبية لفيزياء الذرة، والجسيمات والفيزياء النووية تُضع قيودًا على استخدام مفاهيم الجوهر والعلية وعلى التحليل الرياضي والتجريبي للظواهر. اعتقد نيلز بور أن هذه القيود تمت الإشارة إليها من خلال ثابت بلانك كأجراء من الحد الأدنى^(١). وقد قمت في هذا الكتاب ببحث الطريقة التي ينتج بها عن التحليل الرياضي والتجريبي للظواهر في فيزياء الجسيمات الكشف عن المزيد والمزيد من الجسيمات مثل المكونات الميكروسكوبية للمادة والعلل المُفترضة للأحداث الموضوعية في كشافات الجسيمات، على حين تنهار تدريجيًا المفاهيم الميرولوجية والعلية للجسيم، وتخفق كلية على التوالي.

(١) انظر: Bohr 1928, 580، والملاحظة ٩٠ في الفصل الأول.

بالإمكان قياس البنية الديناميكية للذرة في تجارب التشتت، وتحليلها بالمفاهيم شبه الكلاسيكية وصولاً إلى معاملات الشكل للبروتون والنيوترون (الفصل الرابع)، إلا أن الأجزاء المُكونة لتلك الأخيرة، أعني الكواركات، لا يُمكن فصلها، مع إضافة مُكونات شبيهة بالحقول إلى تجارب تشتت الطاقة المُتزايدة، أعني أزواج الكوارك-مضاد الكوارك والجلونات فقرة (٦-٥). ويُظهر الوصف الكمي لفقد الطاقة عبر مسارات الجسيمات كيف يكون المفهوم العلي للجسيم مآله الفشل. فعلة مسار الجسيم ليست قوة عليّة منعزلة، بل عملية كمية غير موضعية الفقرة (٥-٣). وفي النهاية تُظهر التجارب التي أُجريت مؤخرًا في بصريات الكم أنه لا المفهوم التقليدي للجوهر ولا المفهوم الواضع للعليّة ينطبق على الظواهر الكمية الحقيقيّة دون تناظر كلاسيكي الفقرات (من ٧-٣ إلى ٧-٦). على الرغم من ذلك، فإن العديد من الجوانب الحاسمة من الموضوعات الكانطية الأربعة المذكورة آنفًا تظل:

أولاً: تتكون الواقعية دون الذرية من بُنى كمية تجريبية.

ثانياً: تتحدد بنية الواقعية دون الذرية من خلال الأدوات المعرفية التالية:

(أ) مقياس الكميات الفيزيائية المشتقة من المقاييس الكلاسيكية للطول والزمن والكتلة.

(ب) قوانين الحفظ للكميات الديناميكية مثل الكتلة - الطاقة، والشحنة، واللف.

(ج) فرض عدم موضعية القوى العلية التي تُوصف من خلال حالات الكم، ويُمكن إعدادها بشكل جيد التعريف، واستخدامها في التجارب، كما تؤدي إلى تلازمات كمية غير موضعية.

وهنا تنطبق الملاحظات السابقة بشأن الجوهر والعلية. يفترض المفهوم الإجرائي للجسيم أن الجسيمات تجميعات من الكميات المحفوظة. ويتعين فهم هذه التجميعات للخصائص الديناميكية في إطار مفهوم كانط للجوهر، بوصفه حزمًا من الخصائص المستقرة القابلة لإعادة التعريف (انظر الفقرتين ٦-٣، و٦-٦). إن الافتراض (الذاتي) بأن ثمة قوة عليّة منفردة خلف الكشوفات المتكررة للجسيمات هو اللاصق الميتافيزيقي (الوحيد) الذي يُبقى مجموعة الخصائص معًا.

ثالثًا: إن واقعية ما دون الذرة بمنأى عن الفهم الكامل. فما زالت المبادئ المنهجية لتحليل المادة إلى مكوناتها الأصغر فالأصغر والبحث عن القوى الأساسية للفيزياء تُوظف في محاولات لا تنتهي من أجل:

(أ) إيجاد بُنى جديدة والكشف عن أنواع جديدة من الجسيمات، في تجارب التشتت ذات الطاقة الأعلى والأعلى.

(ب) تحليل مشكلة القياس الكمي بدلالة المتغيرات الخفية، والعوالم المتعددة، وغيرها من المقاربات، ويُعد تفكيك الترابط حتى الآن أكثر الأمور بشارًا.

(ج) التوصل إلى جانبية كمية تتخلص من المشاكل المفاهيمية الحالية لتوحيد نظرية الكم والنسبية العامة.

رابعًا: إن واقعية ما دون الذرة علاقاتية بشكل شامل؛ أي أنها:

(أ) مُعتمدة على السياق. فيعتمد نوع الظواهر الكمية التي تتم ملاحظتها (الكشوف الجسيمية، أنماط التداخل، أو كلاهما) على الترتيب

التجريبي. علاوة على ذلك، تحدث كل الظواهر الكمية في عالم كلاسيكي.

(ب) تُعرَّف فحسب بالنسبة إلى المفاهيم الكلاسيكية. فكل ظواهر الكم تُوصف في واقع الأمر من خلال الطول، والزمن، والكتلة. إضافة إلى ذلك تُفسر تجارب التشتت لفيزياء الطاقة العالية بالنسبة إلى النماذج الكلاسيكية لمراكز التشتت، وتوزيعات الشحنة،... إلخ.

(ج) مُعتمدة على الطاقة. ففي طاقات التشتت المتزايدة، يتزايد محتوى الكوارك ومضاد الكوارك، والجلون من النويدات. (انظر الفقرة ٨-٣).

عند أخذ النقاط من أولاً حتى رابعاً في الاعتبار معاً، فإنها تُقدم نظرة نقدية لواقعية ما دون الذرة شاغلة مساحة وسطاً بين التجريبية والواقعية الميتافيزيقية. ويرتبط الموقف الناتج بشكل وثيق من نظرة بور التنامية لميكانيكا الكم. دعونا نرى أولاً بأي معنى يكون هذا الموقف أكثر قوة من التجريبية وأخف وطأه من الواقعية الميتافيزيقية، ثم نوضح علاقتها بآراء بور.

تتنمي كل الظواهر التجريبية التي تمت مناقشتها في الباب الثالث إلى البنى الكمية (في البند أولاً) لواقعية ما دون الذرة. وعلى وجه الخصوص فإن قياسات الموضع، ومسارات الجسيمات، وأحداث التشتت، وحالات الرنين في فيزياء الجسيمات؛ بُنى كمية تجريبية. وتنتمي إليها ظواهر بصريات الكم التي تمت مناقشتها في الفصل السابع. إن بُنى الكم التجريبية هنا هي توزيعات للحدث يتم الحصول عليها عبر تجربة الشق المزدوج بفوتونات أو

إلكترونات فردية، وتجربة "فليجور - مندل"، وتجارب الفوتونات الفردية ذات المستقطبات، وتجارب "تحديد الاتجاه" باستخدام المحاة الكمية أو دونها. وحتى التجريبي، مثل فان فراسن، سيتفق مع الزعم بأن كل هذه الظواهر تنتمي إلى الواقعية التجريبية. وتكون الافتراضات الكانطية (الثاني)، و(الرابع) أكثر قوة. وعلى وجه الخصوص تكون الفقرة الثالثة من الافتراض الثاني للقوى العلية غير الموضعية وراء الظواهر الكمية لفيزياء الجسيمات وبصريات الكم أكثر قوة من التجريبية الصارمة.

إلا أن الموقف الناتج يكون أقل حدة من الواقعية الميتافيزيقية؛ حيث إن يتم أخذ السمات البنائية للافتراض الثاني في الاعتبار، على خطى نظرية كانط في الطبيعة. إن مقاييس الكميات الفيزيائية، وقوانين الحفظ في الفيزياء، والافتراضات العلية التي تدعم إجراءات الإعداد والتأويل الفيزيائي للتجارب الكمية ينتمي إلى الممارسة الفيزيائية، وليس إلى الواقعية الفيزيائية المستقلة وحدها. أما النقطة الكانطية الأصلية فهي أن مثل هذه الواقعية المستقلة ليس لها وجود بالنسبة إلينا. فمن المتصور أن الواقعية الفيزيائية تعتمد على الأدوات الإدراكية في الفيزياء. وعلى وجه الخصوص، فإن مقاييس الكميات الفيزيائية تمثل شروطاً ضرورية لإمكان الخبرة الفيزيائية. إنها تدعم كل القياسات في الفيزياء. كما تنتمي إليها المفاهيم الميتافيزيقية للجوهر والعلية. فهي، وفقاً لكانط، شروط ضرورية لإمكان أي خبرة. وفي واقع الأمر، تقوم الممارسة الفيزيائية باستخدامها ضمناً. وفي النهج البراجماتي لإعداد الموجات والكشف عن الجسيمات، تقوم الموجات المحتملة بوظيفة الجواهر للقوى العلية، فيما تمثل كشوف الجسيمات الآثار الناتجة عنها. ودون مفاهيم

الكميات الديناميكية المحفوظة، ومجموعاتها القابلة لإعادة التعريف، والقوى العلية الكامنة خلف ظهورها مُجددًا، فلن تكون ثمة إمكانية لتحليل مُعطيات فيزياء الجُسيمات أو بصريات الكم. وفي هذه الحالة، يتمتع "اللاصق" الميتافيزيقي المُشار إليه أنفًا بمكانة ترانسندنتالية (متعالية).

ومع ذلك فإن هذه المكانة الترانسندنتالية لهذا اللاصق الميتافيزيقي تختلف جوهريًا في المجال الكلاسيكي عنها في المجال الكمي. ففي المجال الكلاسيكي، تكون مبادئ الجواهر والعلية مكوّنة لمعرفة الأشياء الفيزيائية مع تحديد كامل للخصائص. فيما تتعارض أي نظرية كمية مع هذا النوع من المعرفة الفيزيائية. إذ تحول البنية الكمية للخصائص الزمكانية والديناميكية لجسيمات ما دون الذرة دون وجود أشياء فيزيائية ذات خصائص كاملة التحديد. إن مبادئ الجواهر والعلية لا يُمكن أن تكون جزءًا من معرفة الأشياء الكمية.

تقترح المقاربة الكانطية لنظرية الكم التي ظهرت مؤخرًا على يد "برينجه" تأويلها من خلال أفكار العقل والمبادئ المنظمة عند كانط؛ خاصة من خلال الوحدة النسقية للظواهر التجريبية للطبيعة التي قام كانط بتحليلها في نقد ملكة الحكم⁽¹⁾. وعلى التوازي مع تفسير "كانط" للكائنات، يوضح "برينجه" ما يعنيه قول إن الممارسة الفيزيائية تتناول الأشياء الكمية كما لو كانت قوى عليّة واقعية: إنها تعنى توحيد الظواهر الكمية التتامية التي تتولد من المصدر نفسه، ولكن عبر ترتيبات تجريبية مختلفة. إلا أن وحدة النطاق

(1) Pring 2006.

تم هنا بحث العلاقات النسقية لهذه المعالجة لرؤية بور التتامية للظاهرة الكمية بالتفصيل.

الكمّي محدودة. وعلى نحو ما عرضنا آنفاً في الفصل السادس والفقرة (٧-٦)، فليس ثمة مفهوم موحد للجسيم ولا تفسير موحد للعلية. والاستخدام التنظيمي لمبادئ الجوهر والعلية في الممارسة الفيزيائية يأتي مع تعدد المفاهيم النظرية للجسيم ومعاني العلية.

والمشكلة الفلسفية الأكثر إثارة بشأن واقعية ما دون الذرة هي كيف يُمكن فهم ازدواجية الموجة - الجسيم كورينث شرعي لمفهوم الجسيم الكلاسيكي، علماً بأنه لا الموجات ولا الجسيمات، في الفهم الكلاسيكي، يدعّم الظواهر شبه الموجية وشبه الجسيمية في فيزياء الكم. فالموجات والمجالات الكمية ليست مجرد كيانات زائفة؛ إذ يقوم الفيزيائيون بإعدادها كما لو كانت أشياء فيزيائية واقعية، على الرغم من أنها ليست كذلك. إنها تتمتع بصلة عليّة، كما تظهر تجارب بصريات الكم التي نوقشت في الفصل السابع على نحو مدهش. إنها تحدد الاحتمالات الشرطية لكشوف الجسيمات. فالاحتمالات تعدو مجرد كونها تكرارات نسبية تجريبية. وتتبع أحداث الكم الاحتمالات المحسوبة من دالة الموجة Ψ وهي حين تسلك على هذا النحو، فإنها تحدث كما لو كانت محكومة بيد خفية أو تتبع قانوناً بلا قانون^(١). ويقترّب من هذا الموقف النقدي المقترح هنا. فهو يأخذ في الاعتبار فكرة وجود قوى عليّة داعمة لتكون مبدأً منظماً يوحد الأحداث الكمية للمجموع الاحتمالي.

أما النقطة الكانطية الرابعة فلم يسبق أن تمت مناقشتها. إنه الزعم بأن الواقعية الفيزيائية علاقتية بشكل شامل. وبالنسبة إلى مجال الكم فإن هذا مما يجب تأهيله أيضاً مؤدياً إلى سيمانطيقا علاقتية وأنطولوجيا فيزياء الكم التي

(1) Wheeler 1979-1981.

تقترب من وجهات نظر "بور". (أ) يُعبر الاعتماد على السياق في ظواهر الكم عن استبصارين لفلسفة بور التتامية. أولاً، ظهور ظواهر الكم التتامية من قبيل مسارات الجسيم وأنماط التداخل يعتمد على الترتيب التجريبي. ثانياً، تحدث كل الظواهر الكمية في جهاز أو بيئة تجريبية ماكروسكوبية. فما من أشياء كمية في حد ذاتها يُمكن أن تكون معزولة عن جهاز القياس. (ب) إن لغة الفيزياء الكلاسيكية، وفقاً لبور، أمر لا غنى عنه. وترتكز رؤية بور التتامية على مبدأه للتناظر؛ حيث تناظر ظواهر الكم التتامية، من وجهة نظره، الظواهر الكلاسيكية الحصرية المتبادلة، ومن أجل تفسيرها يجب توظيف لغة الفيزياء الكلاسيكية. وعلى الرغم من أن هذه الرؤية لا يُمكنها مجارة الظواهر الكمية الأصيلة دون التناظر الكلاسيكي، فإن أفكار بور الداعمة تبقى صالحة حتى يومنا هذا: فيتعين أن يتم التعبير عن كل نتائج القياسات من خلال المقاييس الكلاسيكية للطول، والزمن، والكتلة؛ ويُمكن تفسير تجارب التشتت التي تبحث البنى دون الذرية الديناميكية فقط من خلال النماذج التي تناظر على نحو نهائي تشتت رذرفورد الكلاسيكي. (ج) إضافة إلى تلك الموضوعات التي تُنسب إلى بور، فإن اعتماد الطاقة $energy$ dependence للبنية دون الذرية يجب أن يؤخذ في الاعتبار. فكلما كانت طاقة تجربة التشتت أعلى، كانت البنية محل النظر أصغر. ومع ذلك، فكلما كانت البنى أصغر، صار من الصعب تفكيكها وتمييز مكونات المادة (انظر الفصل الرابع والفقرة ٦-٥). ختاماً، فمكونات النويدات التي تظهر مع زيادة طاقة التشتت لا تُعد جسيمات في عرف المفهوم الميرولوجي للجسيم. وطبقاً لنموذج كوارك بارتون، فمحتويات الكوارك ومضاده والجلون للنويد هو شبيه

بالمجال. ولكن المجالات الكمية أيضاً يتم وصفها وقياسها كما لو كانت أشياء فيزيائية واقعية، وإن لم تكن كذلك.

اقترحت رؤية بور التتامية لميكانيكا الكم بالفعل منذ زمن طريفاً لتجنب معضلة الاختيار بين التجريبية أو الواقعية الميتافيزيقية. وبسبب الصعوبات في الفهم، لم يتيسر استنباط تفسير فلسفي لنظرية الكم من كتاباته. واليوم يخطئ معظم الفيزيائيين في الخلط بين تفسير كوبنهاجن^(*) لميكانيكا الكم والتفسير الاحتمالي لبورن ونيومان؛ على حين يعتبر معظم الفلاسفة آراء بور مهجورة وليس لها من قيمة إلى المغزى التاريخي. علاوة على ذلك ينبغي الأخذ في الاعتبار أنه قد جرت مياه كثيرة في نهر فيزياء الكم منذ أيام بور؛ إذ ثمة الكثير من الظواهر الكمية غير الموضوعية التي لا تتلاءم مع رؤية بور الذاهبة إلى أن مجال الكم مُستنزف exhausted من قبل ظواهر الكم التتامية مع بعض الظواهر الكلاسيكية المُناظرة خلفها. ومع ذلك عرض الفصلان الرابع والخامس تفصيلاً إلى أي مدى يصمد الزعم المركزي في رؤية بور التتامية حتى يومنا هذا. لقد بُنيت نظرية القياس لفيزياء الجسيمات على القوانين الكلاسيكية، على الرغم من أنها تحتوي أيضاً على تصويبات كمية تنطبق على المستوى الاحتمالي، والعديد من الكميات الجديدة من قبيل اللف والندبة والنكهة واللون. ومع ذلك فهذه الأخيرة تم تعريفها أيضاً من

(*) تفسير كوبنهاجن Copenhagen interpretation هو مصطلح شائع في ميكانيكا الكم يذهب إلى أن ميكانيكا الكم لا تُسفر عن وصف واقع موضوعي، وإنما تتعامل فحسب مع احتمالات رصد أو قياس الجوانب المختلفة لكمات الطاقة، وهي كيانات لا تتفق مع المفاهيم الكلاسيكية للجسيمات والموجات على حد سواء. (المترجمان)

خلال ما يبني جسورًا مع الفيزياء الكلاسيكية؛ أعني التماثلات الرياضية، وقوانين الحفظ، والأبعاد الفيزيائية للكميات الكلاسيكية (مثل كمية الحركة الزاوية). وفي النهاية يتم التعبير عن كل نتائج القياس من خلال الطول والزمن والكتلة والطاقة. وتمتد مقاييس هذه الكميات حتى النطاق دون ذرى بل نزولاً إلى مقياس "بلانك". وتفترض هذه المقاييس، أن لغة الفيزياء الكلاسيكية لا غنى عنها لفيزياء الكم بأسرها.

وفي كل تلك المناحي، تكون واقعية ما دون الذرة علاقاتية؛ إذ لا تدرس فيزياء الكم سوى ظواهر في بيئة كلاسيكية. وتُظهر الأنواع المختلفة من التلازمات الكمية غير الموضوعية أن ظواهر الكم قد تكون كبيرة للغاية، أي ممتدة على مسافات شبيهة بالفراغات. فيما لا تبرز الكشوفات الموضوعية للجسيمات التي تُشير إلى بُنى دون ذرية إلا كأحداث موضوعية في العالم الكلاسيكي.

إن التفسير العلاقتي لواقعية ما دون الذرة هنا نتاج لمقاربة "من أعلى إلى أسفل". فيما يظل التفسير العكسي للعالم الماكروسكوبي الكلاسيكي "من أسفل إلى أعلى" من خلال الإلكترونات، وكمات الضوء، والكواركات، وغيرها من الجسيمات؛ وعدًا أجوف. فأبي محاولة تهدف إلى تأسيس أنطولوجيا جسيم أو مجال ينشأ عنها تفسير غير علاقتي لواقعية دون ذرية مكونة من جواهر مستقلة وقوى عليية. إلا أن أي مقاربة معروفة من هذا القبيل تتعارض أيضًا مع مبادئ نظرية الكم النسبوية أو مع افتراض أن القياسات الكمية ينتج عنها أحداث فعلية في العالم الكلاسيكي. وبقدر ما سنظل مشكلة القياس الكمي قائمة، فسنظل واقعية الكم المستقلة بمنأى عن أيادينا.

في نهاية المطاف، ووفق ما بلغه علمنا، ليست واقعية ما دون الذرة عالمًا ميكروسكوبيًا في حد ذاتها، ولكنها جزءًا من واقعية تجريبية توجد بالنسبة إلى عالم ماكروسكوبي، في إطار ترتيبات تجريبية معينة، وسياقات فيزيائية مُعرفة جيدًا وخارج المعمل. تتم دراسة هذه الواقعية الفرعية بأجهزة قياس ماكروسكوبية. فيتم الاستدلال على وجود الإلكترونات، والكواركات، والفوتونات من تجارب شديدة التعقيد في فيزياء الجسيمات وبصريات الكم. ومن وجه نظر واقعية، ثمة علة كافية للاعتقاد في أن ثمة كيانات من قبيل الإلكترونات، والكواركات، والفوتونات في معامل الفيزياء وفي العالم من خلفها. إلا أنه يتعين على أي واقعية علمية بشأن الجسيمات دون الذرية أن تأخذ في الاعتبار أنها لا تسلك واقعيًا كجسيمات: ولا تدعم الفيزياء الراهنة سوى الاعتقاد في وجود عمليات كمية في إطار العالم الكلاسيكي.

الملاحق

ملحق (أ)

نظرية القياس

لقد فصلت نظرية القياس من خلال أعمال هيلمهولتس وكامبل؛ على حين قام ناجيل وكارناب بوضعها في الإطار التجريبي المنطقي. وأعدت مدرسة سوبس صياغتها في صورة مصطلحات نموذجية-نظرية، وطورتها بوصفها نظرية بديهية مجردة. واليوم صارت نظرية القياس المُجرّدة جزءاً من الرياضيات التطبيقية⁽¹⁾.

أ-1 البنى العلاقتية التجريبية

تتعامل نظرية القياس الصوري مع عملية نقل البنى العلاقتية التي تتأطر خصائص الموضوعات أو العمليات التجريبية إلى مستوى البديهيات axiomatization. وفقاً لكارناب وسوبس ينشأ القياس عن ترتيب الموضوعات أو العمليات التجريبية بطريقة مُعرفة جيداً عبر إجراءات تجريبية. وينشأ عن الترتيب بنية علاقتية تجريبية؛ أي بنية علاقتية تكون أنموذجاً تقريبياً للخصائص التجريبية لتلك الكيانات. وتتأسس البنية البديهية

(1) Helmholtz 1887, Compbell, Nagel 1931, Hempel 1952, and Carnap 1966; Krantz 1971; Narens 1985.

للقياس عبر ثلاث خطوات: التعريف، ثم النقل إلى مستوى البديهيات، ثم التعبير العددي لبنية علاقاتية تجريبية $\langle \varepsilon, 0, \leq \rangle$:

١. فالنسبة إلى القسم ε للأشياء التجريبية أو العمليات تعرف العمليتان التجريبتان على النحو التالي:

(أ) التسلسل (الارتباط) o (مثال، تسلسل قضيبين على طول خط مستقيم).

(ب) المقارنة \leq (مثال، وضع قضيبين متوازيين لبعضهما أو ملاحظة من يكون أطول).

٢. اختيار مجموعة من البديهيات، وتثبيت بناء جبري مع تركيب علاقة تعرف الأقسام المكافئة على ε :

$$\forall a, b \in \varepsilon: a \sim b \leftrightarrow a \leq b \wedge b \leq a \quad (A.1)$$

٣. أمثلة فروض النظرية توجد المذهب الجوهري المماثل (أيومري من الوحيد المفرد حتى التشابه في التركيب مع اختلاف الخواص)

$$F: \langle \varepsilon, 0, \leq \rangle \rightarrow (R, +, <, >) \quad (A.2)$$

من البناء $\langle \varepsilon, 0, \leq \rangle$ إلى الأعداد الحقيقية R مع استخداماتها في البناء الحسابي، خاصة في:

(١) يتم اختيار الوحدة أي أن العنصر $\varepsilon \in E$ الذي ينظم حتى واحد ١ (مثال المتر المعياري).

(٢) وحتى العناصر الأخرى للبناء التجريبي فإن الأعداد $R \in \tau$ المخصصة بأن تعبر عن القيمة بمضاعفات الوحدة.

البديهيات (٢) تثبت البناء الجبري المقابل لبناء العلاقة التجريبي (١) وحيث إن القياس يكون مقارنة عددية لأي عنصر للبناء التجريبي لوحدة ما فإن العلاقة يكون جيداً فقط للقياس إذا كانت تمثل بواسطة الأعداد بغير القياس، وقد تضمنت بواسطة النظرية الممثلة (٣)، ويكون للمذهب الجوهري المماثل خواص صورية للقياس. خاصة أنها إضافة وأنها تعين وحيدة مفردة حتى التحولات الأسيومرية استنتاجها من فرض بناء العلاقة التجريبية $\langle 0, \leq \rangle$ ، ولا بد أن تكون بديهيات القياس متوافقة مع بناء الأعداد الحقيقية.

تتعامل نظرية القياس المجردة مع المشاكل الصورية لإعطاء بديهيات للبنى العلائقية العلاقات وتحولها إلى الأعداد الحقيقية. ومع ذلك، فإنها تصف القياسات المثالية؛ أي تخطيط البنى العلائقية الدقيقة إلى الأعداد الحقيقية. ولمزيد من التطبيقات الواقعية، تصبح النظرية معقدة. وقد تؤخذ في الاعتبار أخطاء القياس (أي تزغيب أو تجعيد البناء التجريبي) بإضافة الافتراضات الاحتمالية للبديهيات^(١).

أ-٢ الكميات الفيزيائية

الكمية الفيزيائية هي دالة تقوم بتخصيص أعداد حقيقية لموضوعات أو عمليات تجريبية وخصائصها الفيزيائية. طبقاً لنظرية القياس البديهية تكون هذه الموضوعات أو العمليات هي عناصر البناء التجريبي $\langle 0, \leq \rangle$ ، وتمثل الدالة تماثلاً شكلياً f بالمعنى الذي قدمته مبرهنة الأمثلة المشار إليها

(1) kyburg 1984, 183.

أنفاً. وتعرف الفئات المكافئة لـ \mathcal{E} ، عن طريق علاقة الترتيب كهي فئات الموضوعات أو العمليات التي لها الخصائص الفيزيائية نفسها، ولتكن فئات جميع الأجسام التي لها الكتلة نفسها، فإذا اعتبرنا \mathcal{E} ، أنها قسم من جميع $(\mathcal{E}, \theta\mathcal{E})$ لتجعل f تخص العدد الحقيقي: r :

$$A.3 \quad \mathcal{E}r = \{o \mid o \in \mathcal{E} \wedge f(o) = r\}$$

حينئذ ترسم أو تخطط f بوضوح الفئات المكافئة $\mathcal{E}r$ للأعداد الحقيقية r ، وبالمقابل تكون الكمية الفيزيائية مجموعة الأزواج المرتبة (\mathcal{E}, r) ، وحيث إن مجال الدالة يتكون من فئات لموجودات لها الخواص نفسها فإن الكميات الفيزيائية هي تصورات الرتبة الثانية، ويكون مقياس الكمية الفيزيائية هو مدى الدالة الجوهرية المماثلة f ، وعموماً فإن مدى الكمية الفيزيائية يكون من \mathcal{C} إلى \mathcal{C} .

أ-٣ البديهية الأرشميدسية

إن امتداد قياس الطول والزمن والكتلة من حجم الكون نزولاً إلى مقياس بلانك يبني على البديهية الأرشميدسية^(١) وتخص هذه البديهية أو المسلحة نظرية الأعداد الحقيقية، وهي تضمن أن وحدة القياس قد يتم اختيارها اعتباطياً.

$$\forall a, b \in \mathbb{R} \text{ with } a < b, \exists n \in \mathbb{N} \text{ such that } na > b \quad (A.4)$$

(١) انظر: Hilbet 1918,149.

طبقاً للبديهية الأرسيميدية وللنظرية الممثلة فإن أي وحدة $E \in \mathcal{E}$ قد تغير في قياس قيمة أي عنصر $E \in \mathcal{E}$ ، ومن ثم قد يختار الوحدة اعتباطاً: فقد يعبر عن حجم الكون بدلالة السنين الضوئية، سم، أو طول بلانك، فنون البديهية الأرسيميدية لا تنتج طويلاً أن جميع عناصر العلاقة التركيبية تكون ممثلة بالأعداد الحقيقية⁽¹⁾ مع اتباع أنه توجد عناصر غير ملئمة رياضياً للعلاقة التركيبية.

لقد أدخل كون Kuhn فكرته عن اللا مقياسية كمثيل للمفهوم الرياضي للا مقياسية⁽²⁾، فعن طريق البديهية الأرسيميدية لنظرية القياس كانت العلاقة بين المفهومين. ففي الفيزياء ضمنت البديهية الأرسيميدية أن مقاييس الكميات الفيزيائية قد تمتد إلى النسبوية كما في مجال الكم. زعم هيلبرت (1918, 1949) بأنه يمكن التحقق من صلاحية البديهية الأرسيميدية باختبارها تجريبياً. إلا أن صلاحيتها التجريبية ليست أكثر (وليست أقل) من إمكانية تأسيس المقاييس وعمل القياسات في كل المجالات دون تناقض. ونظراً إلى أن المسافات والأزمنة والكتل دون الذرية والأرضية والكونية تخضع لنظريات بينها لا مقياسية من وجهة نظر كون، وفقاً للنظرية البديهية للقياس. فإن البديهية الأرسيميدية تدعم جسر المبادئ التي تصل نظريات اللا مقياسية بعضها ببعض. فإذا ما قامت بذلك، فإن الكميات المقاسة في المجالات دون الذرية والأرضية والسموية لا توصف باللا مقياسية بالمعنى الكوني، تبعاً للنظرية البديهية في القياس. إن امتداد المقاييس الفيزيائية إلى المجالات النسبوية والكمية وثيق الصلة بالاعتبارات البعدية والمبرهنة الثانية للتحليل البُعدي.

(1) Narens 1985, part II.

(2) Kuhn 1960, 1970.

يكون للقياس ثلاثة جوانب من وجهة النظر التجريبية:

١. يكون لها أساس إجرائي ينتج عنه ترتيب تجريبي.
٢. تعتمد على بديهيات لتعيين الأمثلة العددية.
٣. تتضمن زعمًا مرجعيًا بأن البديهيات وأمثلتها العددية تُعبر عن الأساس الإجرائي.

هذه المظاهر تقابل ببساطة الخطوات الثلاثة السابقة:

- ١- التعريف إجرائيًا.
- ٢- الصياغة في صورة مسلمات.
- ٣- الأمثلة العددية.

لبنية تجريبية علاقتية $\varepsilon < 0, > \leq$. وفق نظرية القياس تكون متعائلة ميتافيزيقيا، وأنها مجرد نظرية رياضية حول بنية استعمال الطرق العددية في العلم التجريبي نفسه، إثمة افتراض مُسبق لهذه الرؤية في الفصول من ٢ إلى ٥. وقد يسهل إعادة تأسيس تجارب فيزياء الجسيمات بدلالة نظرية القياس. (١) اعتمدت على العمل التجريبي الناتج في التكوين والمعايرة للشعاع والعداد الجسيمي والفترة المأخوذة خلالها النتائج ومقارنة الخواص المشاهدة للمسارات الجسيمية المسجلة بواسطة العداد. (٢) إن التصميم والأداء وتحليل النتائج لمثل هذه التجارب يتأسس على القوانين النظرية التي تكون دوالها مثل بديهيات القياس. وتعتمد قوانين القياس هذه على النماذج الكلاسيكية والكمية التي تتماشى مع التجربة. (٣) تتأسس هذه النماذج على

مقاييس الكميات الفيزيائية وعلى افتراض أن مسارات الجسيمات الملاحظة ممثلة بالواحدة عن طريق أعداد ترمز بقيم فيزيائية للجسيمات].

ومع ذلك فقد بدأ الفلاسفة في الخلاف حول القياس، عندما بالغوا في توكيد الجوانب المنعزلة للقياس. أدى غض الطرف عن الجوانب المرجعية لمبرهنات الأمثلة للنظرية إلى ظهور الإجرائية والكلية والاصطلاحية. فيما أدى غض الطرف عن الجوانب الإجرائية للقياس إلى الموقف الأفلاطوني. يؤكد العديد من فلاسفة العلم على الجوانب المتصلة بالأمثلة (أو المرجعية) للقياس. كما يميلون إلى تبني التجريبية أو الواقعية العلمية. وعلى هذا الدرب تبرز الآراء الميتافيزيقية التالية:

1- أركزت الكلية، على الجوانب البديهية للقياس، ويعتمد أي قياس على نظرية الظواهر المقاسة. أكد سنيدي (Sneed) ومن تبعوه على نظرية الكميات الديناميكية مثل الكتلة أو القوة⁽¹⁾، ولكن الكميات الزمكانية للميكانيكا غير النسبوية أيضًا تعتمد على النظرية بشكل أساسي، وأظهرت نظريات الزمان-المكان النسبوية بديهيات واضحة للقياس. دائمًا ما يوضع قياس كمية ما في إطار الافتراضات حول قوانين الفيزياء وفقراتها المرتبطة بها وهلم جرا. وهذا أخذ في الاعتبار في رسالة بحث دوهم-كواين وعن طريق رؤية كون بأن المفاهيم الحاسمة للنظريات المناهضة تكون غير ملائمة حتى أحدثت تنبؤات عديدة متساوية تقريبًا.

(1) Sneed 1971, Balzer 1987.

١- ب يتعلق المذهب الاصطلاحي برؤية الأمثلة المضادة للقياس وأنه ينتج من التركيز على الافتراضات الاعتبارية الضرورية لبناء أسسٍ قياس، وتختار دائماً وحدة مقياس الكمية اعتبارياً إضافة إلى أن العديد من طرق القياس تعتمد على المفاهيم النظرية دون المحتوى العلمي، وتكون الأمثلة المطابقة هي: الافتراض الأساسي للقياس الاعتيادي للطول أن القضبان صلبة؛ أو اصطلاح أينشتين بشأن التعريف النسبوي للتزامن (Einstein 1905).

٢- تهتم الإجراءية بشكل حصري بالجوانب الإجرائية للقياس^(١). فاقترح بريدجمان رؤية متطرفة بأن تعرف كل طريقة قياس لكمية أخرى. يدافع أليس عن إجراءية أكثر تحرراً. فبالنسبة إليه كانت الكميات الفيزيائية عبارة عن مفاهيم عنقودية والمستنتجة من جميع طرق القياس التي تعطى نتائج الكميات نفسها تقريباً ومع هذا فقد رفض أليس افتراضاً الخواص الفيزيائية الحقيقية التي تقابل مثل هذا المفاهيم العنقودية لأنه اعتبرها كلية [انظر الجزئية رقم (٥) فيما يلي].

٣- ركز المذهب التجريبي على البنى التجريبية التي تقف خلف أي قياس، كما أكد على أنها مُحددات لبديهيات القياس. حتى أنه كان من الضروري احتواء طريقة القياس، فيجب أن تكون البديهيات كافية ومن ثم يكون اختيارها أكثر ملاءمة عن موضوع الاصطلاح، كما أوصى مجال البديهيات والمذهب التجريبي بإخلاق في علم الوجود وأنه لا يوجد ما يبرر تجريباً الامتداد البديهي

(1) Bridgman 1927; Ellis 1968, 34-36.

لقياس مجال لا نهائي للأشياء الموجودة وقد ركز المذهب التجريبي على التكوين التجريبي الأساسي لأي قياس، وأكد أنها كانت اضطرابات لبديهيات القياس، ومع أن طريقة قياس كان من الضروري احتواؤها عناصر اعتباطية فيجب أن تكون البديهيات كافية ومن ثم يكون اختيارها أكثر ملاءمة عن موضوع الاصطلاح، كما أوصى مجال البديهيات والمذهب التجريبي بإخلال في علم الوجود وأنه لا يوجد ما يبرر تجريبيًا الامتداد البديهي لقياس مجال لا نهائي للأشياء الموجودة وغير المشاهدة.

٤- متطلبات مذاهب الواقعية العلمية بأن الكميات الفيزيائية مثل الطول والكتلة أو الشحنة تعبر عن الخواص الحقيقية للأنواع الطبيعية؛ مثل الإلكترونيات ومن وجهة النظر الحقيقية فإن الكميات تكون أقسامًا من المقادير، وتأتي خواص المقادير في درجات وتلتصق هذه الخصائص بأنظمة فيزيائية وعمليات موجودة في الطبيعة فعليًا.

٥- تُعد الأفلاطونية النسخة الأكثر تشددًا للواقعية العلمية حول الخصائص الفيزيائية. يقوم أتباع الفلسفة الأفلاطونية بإسباغ المادية على الخصائص وما يُنظرها من مقادير^(١). وكانت علاقات كمياتها في الترتيب الثاني، [وهذا كان سبب تفضيل إيليس للمذهب الإجرائي المعدل؛ انظر الجزئية (٢) فيما سبق] ودافع كبيرج عن الرؤى التي تكون فيها المقادير الفيزيائية أهدافًا مجردة ولا يجب أن

(1) Armstrong 1989 a,b.

تقر الكميات كدوال من التركيب التجريبي إلى الأعداد الحقيقية ولكن تكون كدوال من التركيب إلى أقسام للمقادير^(١).

تُفسر البنية الصورية للقياس بدقة هذا التنوع في الآراء الميتافيزيقية. وبالنظر إليها بترتيب معكوس، فإنها تناظر بشكل يزيد أو يقل المواقف التي رأيناها في السجال حول الواقعية العلمية (انظر الفقرة ١-٢). نشأت الآراء البنيوية عن الكلية والاصطلاحية. وتعد الإجرائية نسخة من التجريبية الصارمة وتمثل رؤية تجريبية أكثر تحرراً للكميات الفيزيائية ينشأ عنها تجريبية مُعتدلة. على حين تأتي الواقعية العلمية بشأن الخصائص الفيزيائية بأشكال أكثر ضعفاً أو قوة. يعتبر التفسير النقدي للكميات الفيزيائية تأسيس المقاييس أمراً لا غنى عنه (انظر الفقرتين ١-٦). ختاماً، تظل الأفلاطونية أكثر قوة من الواقعية الميتافيزيقية لبلاك وأينشتين فيما يتعلق بالخصائص الفيزيائية (انظر الفقرتين ١-٥ و ١-٢).

(1) Swoyer 1987; Ellis 1987; Kyburg 1984, 17.

ملحق (ب)

المبرهنة الثانية لتحليل البُعدي

التحليل البُعدي هو وسيلة خلفية للمساعدة على كشف البعد الاعتباري للفيزياء، وهي تخدم في استنتاج القوانين الفيزيائية وبقدر ما تقيد عن طريق أبعاد الكميات الفيزيائية المتضمنة في المسألة⁽¹⁾ واعتمدت الوسيلة (الطريقة) على المبرهنة الثانية للتحليل البُعدي الذي يربط جميع دوال الأبعاد غير المتغيرة (أو المتجانسة) للكميات الفيزيائية⁽²⁾ أي لجميع القوانين الفيزيائية التي لا تعتمد على اختيار وحدة الكميات الموجودة، وقد يأخذ أي قانون فيزيائي L الشكل التالي:

$$L : f(x_1, \dots, x_n) = 0, \quad (B.1)$$

حيث F هي الدالة التي تتعلق بـ n من الكميات الفيزيائية ($i=1,000,n$) χ لنجعل k هي أقصى عدد للأساس الجبري لجميع القياسات الممكنة لـ (L) أي أقصى عدد للكميات المستقلة التي تدخل في أبعاد الـ χ حينئذ يوجد $(N-N)$ كميات فيزيائية تعتمد على هذا الأساس للقياس، وتكون أبعادها حاصل ضرب أبعاد الكميات الأساسية K على سبيل المثال يكون الطول L هو

(1) تم فحص الأسس النظرية والبعد- نظرية عن طريق بريدجمان ١٩٢٢ وكامبل ١٩٢٠. وقد عرض الفصل العاشر من المرجع: Krantz et al. 1971، الأسس البديهية للتحليل البُعدي وناقش مبرراتها.

(2) Krantz et al. 19971,464.

للكمية الأساسية في الميكانيكا الكلاسيكية وكذلك الزمن (T) والكتلة $M(K=3)$ ، ويحتوى قانون القوة إضافة إلى الكمية الأساسية للكتلة كميات السرعة والقوة ($n=5, n-k$) حيث تكون الأبعاد ($LT^{-2}, L, T^{-2} M$) هي حاصل ضرب الطول في الزمن في الكتلة.

تنص المبرهنة الثانية على أنه قد يعاد صياغة القانون الفيزيائي L إلى قانون مكافئ (L) بدالة F تعتمد على ($n-k$) للكميات اللابعدية:

$$\prod_{j=1}^{n-k} (1 \leq j \leq n-k)$$

$$L : F(\pi_1, \dots, \pi_{n-k}) = 0 \quad (B.2)$$

وقد تستعمل المبرهنة الثانية لتستنتج من الكميات الأساسية لقياس نظام المعادلات الخطية التي تتعلق بأسس n للكميات π_j والتي قد تكونهم (على سبيل المثال، انظر Krantz et al. 1971, 472 ff). إذا تم اختيار χ_j اختياراً نوعياً لكل نظام خاص فإن حساب الكميات اللابعدية π_j ينتج معلومات حول القانون الفيزيائي الذي يكون دالة $F(\pi_1, \dots, \pi_j)$ ويصف النظام الموجود تحت الفحص، دون احتياج لمعرفة قانون فيزيائي أساسي. ومن ثم يوصف النظام بدلالة n من المحتملة التغيير χ_j ، ويتم التعبير عن هذه المقيدات بدلالة الكميات الفيزيائية المشتركة المستقلة K، وفي النهاية من هذه التقيدت والمبرهنة الثانية (والتي افترضت لتربط الكميات الفيزيائية بصفة عامة) ويشق قانون فيزيائي نوعي لكي نصف النظام. فلكي نشق وصف النظام، لا يتعين أن تكون نظرية النظام معروفة.

إن طريقة التحليل البعدي والاعتبارات البعدية المتعلقة بها تستخدم كثيراً في الفيزياء لعمل استنتاجات سريعة لقوانين نوعية من نظريات معروفة جيداً كما في أعراض تكوين النظرية، ويجعلونها ممكنة لتثبيت الحالات النوعية لنظرية غير معروفة والتي تخدم كتقييد في تكوين النظرية، ومع هذا فإن الاستخدام غير المشروط للطريقة يمثل مشكلة للأسباب التالية:

١- لقد استعملت الطريقة بعناية لكي تتجنب الأخطاء عندما يتم تعيين الكميات الفيزيائية التي تخص المسألة الفيزيائية^(١)، لقد استعمل التصحيح للاعتبارات البعدية والمعرفة الفيزيائية الرئيسة التي تخص مهارات حاسمة للنموذج في فهم توماس كون.

٢- للأكثر دقة فإن هذه المهارات التي تخص نموذج الفيزياء الكلاسيكية وما وراء مجال الفيزياء الكلاسيكية فإن الطريقة تعمم الافتراضات المألوفة حول الكميات الفيزيائية في مثل طريقة الخواص الجبرية للطول وللزمن وللكتلة ودرجة الحرارة التي أكدت بالدليل.

٣- عند الاستخدام في مجال الكم، فإن الطريقة تعتمد على المبدأ المقابل للتصميم في فهم بور وهايزنبرج. (انظر الفقرتين ٥-٤، ٥-٥)، ومن الملاحظ أن يكون مقياس بلانك ينبنى على التحليل البعدي، أيضاً. وحتى الآن لا يعرف أحد ما إذا كانت المبرهنة الثانية قد أثبتت أهليتها في مجال جاذبية الكم أم لا؟

(1) krantz et al. 1971, 473.

ملحق (ج)

مساحة المقطع المؤثر

يوجد في الفيزياء الكلاسيكية نموذجان بسيطان جداً للتشتت؛ النوع الأول هو التأثير المرن أو غير المرن وهذا النموذج الحركي الصرف هو نوعي للنموذج الديناميكي العام لتشتت الجهد ويقابل التأثير المرن التشتت عند جهد الصندوق. والنموذج البسيط الآخر هو التشتت عند جهد كولومب (تشتت رذرفورد) وفي النموذج الكلاسيكي العام تشتت الجسيمات المشحونة (الكتل النقطية) التي تتحرك على طول المسارات وذلك عند بعض الجهد الاعتباري دون طاقة متقلة (تشتت مرن) أو مصحوبة بطاقة متقلة (تشتت غير مرن)، ففي حالة التشتت المرن توصف عملية التشتت المنفرد عن طريق المؤثر الاعتباري b والذي يعتمد على زاوية التشتت وعلى طاقة حركة الجسيم قبل التشتت E وبعده، (يمكن قيل θ ، E) وأن b كمية مميزة للنموذج الكلاسيكي للتشتت، (وهي أقل مسافة للجسيم المتشتت من مركز التشتت)، وبالنسبة إلى جهد كولومب $V(r) = C/R$ تربطها العلاقة التالية:

$$b = \frac{C}{2E} \cot \frac{\theta}{2} \quad (C.1)$$

وتكون الكمية المميزة للتشتت هي مساحة المقطع المؤثر أو مساحة مقطع (التشتت). وهي تحسب في النموذج الكلاسيكي من اعتماد المؤثر

الاعتباري (البارامتر) b ويكون لها أبعاد المساحة ويعبر عنها بوحدات البارن ($1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$)، ويمكن التمييز بين مساحة المقطع التفاضلي والكل في فيزياء الجسيمات.

ويتناسب مساحة المقطع التفاضلي $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ مع احتمالية تشتت الجسيمات لكل زاوية تشتت σ أو ما يقابل زاوية مجسمة متناهية الصغر d (Ω كما تقاس الكمية التجريبية $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ من التكرار للجسيمات المنتشرة إلى زاوية من مجسمة محدودة $\Delta \Omega$ ، وفي النموذج النظري تعرف $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ من عدد الجسيمات التي تشتتت N^{sc} إلى زاوية مجسمة تفاضلية Ωd التي تخص زاوية التشتت σ لكل عنصر مساحة تفاضلي $d\Omega$ ولكل مركز تشتت ويؤخذ في النهاية الأساسية للعديد من لانهايات الجسيمات القادمة ($N_c = \text{عدد مراكز التشتت}$):

$$\lim_{n_{in} \rightarrow \infty} \frac{N^{sc}}{N_{in} \cdot N_c} \frac{dF}{d\Omega} \quad (C.2) \quad \frac{d\sigma}{d\Omega} =$$

تمثل النهاية الأساسية ببساطة عن الفرق بين الاحتمالية والتكرار النسبي؛ أي لا يتجنب الفراغ بين الكمية الاحتمالية وأساسها التجريبي وهنا تفهم الاحتمالية كنهاية للتكرار النسبي لعدد كبير جداً من الأحداث.

ففي فيزياء الجسيمات يكون عدد الجسيمات القادمة N^{in} لكل عنصر سطحي تفاضلي dF كمية نظرية مثل ذلك العدد لمراكز التشتت N^{st} ودون أي معرفة فإن هذه الأعداد مثل ذلك تكون معروفة فقط حتى دون أي معرفة

فإن هذه الأعداد $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ تكون معروفة فقط حتى بعض العوامل المعيارية، ففي النموذج الكلاسيكي يعتمد $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ على التأثير الاعتباري (البارامتر b) كما يلي:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{b}{\sin \theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right| \quad (\text{C.3})$$

بالنسبة إلى جهد كولومب $V(r) = \frac{C}{r}$ ، فإن مساحة مقطع تشتت

رذرفورد (١، ٤ في بند ١، ٤) يتبع مباشرة ما يأتي من (A.3)، (A.1).

وتأتي مساحة المقطع σ ببساطة عن طريق تكامل $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ على جميع

الزوايا المجسمة:

$$\sigma = \int \frac{d\sigma}{d\Omega} d\Omega \quad (\text{C.4})$$

وتعتبر مساحة المقطع الكلية عن احتمالية أو التكرار النسبي لنوع معين من حدث التشتت كمقارنة مع الأنواع الأخرى لأحداث التشتت، وتكون مقياساً "النسبة التصادم" لنوع التفاعل، وفي النموذج الميكانيكي البسيط جداً للتشتت فقد توضح مساحة المقطع الكلية كمساحة مؤثرة للتفاعل؛ أي أنه كما تكون المساحة الممتدة وعديدة التأثير لمراكز التشتت تنصرف بصغر مهمل للجسيمات المختبرة المرتردة مثل الكرات الآتية من سياج الحديقة.

ولإعطاء مثال، فإن مساحة مقطع التشتت المرن للجسيمات شبه النقطية المختبرة من نصف قطر الكرة الواقعية (الصلبة) R تكون أيزوتروبك (غير معتمدة على الزاوية) وتكون مساحة مقطع التشتت الكلية σ مائة لمساحة المقطع الهندسية للكرة؛ أي أن $R^2\pi = \sigma$ ويتأسس بوضوح مصطلح "مساحة المقطع المؤثر" أو "مساحة مقطع التشتت" من هذا النموذج الميكانيكي البسيط.

وفي الديناميكا الكلاسيكية تعتمد σ أو $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ بصفة عامة ليس فقط على الكميات الهندسية ولكن أيضاً على طاقة حركة الجسيمات المختبرة وعلى الطاقة التي يمكن انتقالها، وفي حالة التشتت عند جهد كولومب يفشل التناظر الميكانيكي البسيط فيعتمد مساحة مقطع زرنفورد على الطاقة ويستطرد في الاتجاه الأمامي، ومع هذا فترتبط العلاقة التالية طبقاً لـ $V = m v^2$ و $C/r = E$ فإن نقطة الانعطاف للجسيم ذي طاقة الحركة E أي بأقصى تشتت خلفي تكون هي نقطة أقل مسافة $R_{min} = C/E$ من مركز التشتت، ومن ثم تعرف نقطة الانعطاف بنصف القطر المؤثر C/E لمركز التشتت والذي يعتمد على طاقة الحركة E أي بأقصى تشتت خلفي تكون هي نقطة أقل مسافة $R_{min} = C/E$ من مركز التشتت، ومن ثم تعرف نقطة الانعطاف بنصف القطر المؤثر C/E لمركز التشتت والذي يعتمد على طاقة الحركة E للجسيم المشتت: كلما ازدادت طاقة التشتت اقترب الجسيم المختبر لمركز التشتت.

في ميكانيكا الكم لا توجد المسارات ولا البارامتر المؤثر، ومن ثم يفشل التوضيح السابق. ومع ذلك يمكن تعريف مساحة المقطع كمقدار احتمالي ويقاس في تجربة التشتت من التكرار النسبي لأحداث التشتت لنوع معين. في قياس مساحة المقطع في فيزياء الجسيم يتم قياس مسارات الجسيم عن طريق وسائل عد الجسيمات، في مساحة المقطع المؤثر لنوع من تفاعل جسيمي تتقابل نظرية المجال الكمي مع التجربة، وفي نوع معين من عملية تشتت دون ذري فإن σ و $\frac{d\sigma}{d\Omega}$ تتناسب مع احتمال الانتقال الميكانيكي الكمي ومع العنصر المقابل للمصفوفة σ ، على التوالي.

ملحق (د)

التحليل البعدي لتشتت رذرفورد

لقد أهمل التحليل البعدي لتشتت رذرفورد ما لم يتم التمكن من قياسه في المجال دون الذري المسمى مسار الجسيم المتشتت، وفي هذا الطريق تم التوزيع مع البارامتر المؤثر الذي يميز التشتت المنفرد في النموذج الكلاسيكي ويكون التحليل البعدي الناتج في تشتت رذرفورد هو نظرية مستقلة، تتبني على المبدأ العام المقابل وتمت مناقشته في الفصل الخامس (الفقرة ٤-٥) وقد أفضت الاعتبارات البعدية التالية إلى نموذج نظرية مستقلة لتشتت رذرفورد وتعريفات تكوين عوامل المناقشة في الفصل الرابع (الفقرات من ٤-٢ إلى ٤-٤).

دون البارامتر الكلاسيكي المؤثر b يوصف تشتت رذرفورد بدلالة الكميات الثمانية التالية:

- ١- مساحة المقطع التفاضلي $d\sigma/d\Omega$.
- ٢- الطاقة الحركية E للجسيمات المتشتتة المختبرة.
- ٣- زاوية التشتت \square .
- ٤- ثابت التركيب الدقيق α ، أي ثابت التقارن للتفاعل الكهرومغناطيسي.

٦/٥- أعداد الشحنة Z و Z أي أن شحنات الجسيم المختبر ومركز
التشتت في مضاعفات الشحنة الكهربائية الأولية e .

٧- ثابت بلانك \hbar ، و

٨- سرعة الضوء C .

إن الكميات \square ، α ، Z ، Z تكون لا بُعدية. ويكون كل من (الطول)
 L و(الزمن) T و (الكتلة) M كميات أساسية مناسبة للتحليل البُعدي. وطبقاً
للنظرية الثانية (II) للتحليل البُعدي يجب أن توجد $(8-3=5)$ كميات فيزيائية لا
بُعدية Π_i والتي تعتمد على وصف التشتت، ويوجد أربع منها معروفة فعلاً
المسماة $\sigma = \Pi_1$ ، $\alpha = \Pi_2$ ، $Z = \Pi_3$ و $Z^1 = \Pi_4$ وبالتعبير في الأبعاد الأساسية
 L ، T ، M فإن مساحة المقطع التفاضلي $\Omega/d\sigma d$ يكون لها الأبعاد L^2 وتكون
طاقة الحركة $E = mv^2/2$ للجسيمات المنتشرة المختبرة لها أبعاد $T^{-1} ML^2$ و
 LT^{-1} على التوالي، وتوضح الحسابات البسيطة أن الكميات اللا بُعدية المفقودة
 Π_5 والتي قد تتكون من هذه الكميات الأربعة المتبقية وهي المصطلح:

$$(d\sigma/d\Omega)\left(\frac{E}{\hbar c}\right)^2$$

$$s = \frac{d\sigma}{d\Omega} \left(\frac{E}{\hbar c}\right)^2 \quad (D.1)\Pi$$

ويقع هذا المصطلح في الجانب الأيسر للمعادلة (٤-٣) في (الفقرة ٤-
١). وطبقاً للمبرهنة الثانية، فإن الكميات اللا بُعدية فقط للتشتت منفصلة من
 Z ، Z ، α تكون زاوية التشتت σ ومساحة المقطع المؤثر الذي يكون لا
بُعدية عن طريق ضربها في المقدار $\left(\frac{E}{\hbar c}\right)^2$ ومن ثم فإن القانون الفيزيائي

النوعي (L^1) الذي يصف التشنت طبقاً للملحق (ب) معتمداً على الكميات اللابعديّة الخمسة.

(1) $5 \leq i \leq 1$ يمكن أن يعتمد فقط على α, Z, Z, σ والكمية اللابعديّة التي تم الحصول عليها من مساحة مقطع التشنت، وتأخذ الشكل التالي:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \left(\frac{E}{\hbar c}\right)^2 = \Phi(\theta) \quad (D.2)$$

ويتضح بالمقارنة مع المعادلة (٤,٣) في (بند ٤,١) أن $\Phi(\theta)$ تأخذ

الشكل

$$\Phi(\theta) = \frac{(zz^1\alpha)^2}{16 \sin^4\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (D.3)$$

ويكون للنتيجة التي نالت الأهمية الرئيسيّة في رذرفورد المسماة بالاعتماد الدالي لمساحة المقطع التفاضلي $\Omega/d\sigma d$ على زاوية التشنت θ لم تكن نابعة من التحليل البعدي، ومع ذلك فقد توضح التحليل البعدي على الأقل أن $\Omega/d\sigma(d)$ يعتمد فقط على الكميات الكهرومغناطيسية α, Z, Z وزاوية التشنت θ وطاقة الحركة للجسيمات المختبرة، ولا تدخل الكميات الأخرى في وصف النموذج.

وكانت الخاصية الحاسمة لتشنت رذرفورد $\left(\frac{E}{\hbar c}\right)^2$ أنها مقياس غير متغير؛ أي أنها لا تعتمد طويلاً على طاقة التشنت E ويصبح معني هذا المقياس غير المتغير واضحاً إذا افترضنا إدخال كمية فيزيائية مضافة لنموذج التشنت التي تسمى بالمقدار R ذي البعد الطولي الذي يصف

الامتداد المكاني للجسيمات المشتتة المختبرة أو مركز التشتت، وفي هذه الحالة فإن وجود كمية لا بُعدية مضافة π_6 الآتية من المُبرهنة الثانية بالقيمة:

$$6 = \frac{E}{\hbar c} \quad (D.4)\pi$$

وفي هذه الحالة فإن القانون الفيزيائي (L^1) الذي يضيف التشتت يأخذ

الشكل

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \left(\frac{E}{\hbar c}\right)^2 = \mathcal{O}\left(\theta; \frac{RE}{\hbar c}\right) \quad (D.5)$$

وفي هذه الحالة تعتمد مساحة مقطع التشتت اللا بعدي على زاوية التشتت θ فقط، ولكن تعتمد أيضاً على طاقة الحركة E للجسيمات المختبرة وعلى الطول R الذي يصف مركز التشتت أو الجسيمات المختبرة، والآن يكون $(\frac{E}{\hbar c})^2$ مقياساً غير متغير طويلاً ولكن يعتمد على طاقة الحركة لتجربة التشتت.

ملحق (هـ)

منطق العلاقات بين الكل والأجزاء (الميريولوجيا)

طبقاً للمفهوم الميريولوجي للجُسيم، تكون الجسيمات الأجزاء (الميكروسكوبية) الدقيقة للمادة. إن الميريولوجيا هي منطق علاقة الجزء بالكل، وفي الديناميكا الفيزيائية لا تُفسر علاقة الجزء بالكل مكانياً ولكن ديناميكياً. إنها مؤسسة مبدئياً على قواعد الجمع للكميات الديناميكية من قبيل كمية الحركة، والكتلة - الطاقة، والشحنة، وكمية الحركة الزاوية، أو اللف (المغزلي). ويتضح فيما يلي كيف يُمكن تفسير النماذج المُكونة للفيزياء الراهنة بدلالة الميريولوجيا الصورية.

E.1 بديهيات الميريولوجيا

إن الميريولوجيا ترتب جزئي يتأسس على البديهيات التالية⁽¹⁾. العلاقة الأولية << (هي جزء مناسب أو خاص >) التي تحقق مبادئ التماثل والانتقالية⁽²⁾:

$$x \ll y \implies -y \ll x, \quad (E.1)$$

$$x \ll y \wedge -y \ll Z \implies x \ll Z, \quad (E.2)$$

(1) Goodman 1951; Simons, 1987.

(2) Simons 1987, 26, and Goodman 1951, 34.

X, Y, Z هي المتغيرات التي تجري على الفرديات المنطقية في حساب الفرديات (في نظرية المجموعات >> تعريف التركيب الجزئي الدقيق مع أن نظرية المجموعات لا تستلزم هنا) مع التطابق = والعلاقة >>، والعلاقة > ("جزء من") ويمكن تعريفه:

$$x < y \Leftrightarrow x << y \quad \forall x = y, \quad (E.3)$$

ولا تكون البديهيات (E.1) و (E.2) كافية لتمييز علاقة الجزء بالكل من الترتيب الجزئي الآخر. على وجه الخصوص يجب إضافة بديهية إلى (E.1) و (E.2) والتي تنص على أن أجزاء الكل تكون مميزة جيداً في بعض الجوانب، ولفعل ذلك فإن علاقات \diamond ("تتداخل") و S ("تكون مفصولة عن") تكون معروفة:

$$x \diamond y \Leftrightarrow \exists z (Z < x \wedge z < y) \quad (E.4)$$

$$x \not\prec y \Leftrightarrow \neg x \diamond y \quad (E.5)$$

إن أضعف بديهية طبقاً لها تكون أجزاء الكل هي المميزة جيداً؛ تنص على أن الكل له أجزاء خاصة فقط إذا وجد على الأقل اثنان منها يكونان غير متداخلين:

$$x << y \Rightarrow \exists z (Z << y \wedge z \not\prec x) \quad (E.6)$$

والكل المكون من اثنين فقط جزئيين خاصين واضحين X, y هي المجموع الميرولوجي X, y وقد يعرف المجموع الميرولوجي كما يلي⁽¹⁾:

(1) Simons 1997, 32, definition SD7; Godman 1951, 36, definition D2.047;

تمثل (I) هنا العامل الإشاري للمنطق الصوري.

$$\chi \oplus y = z \quad z \forall (w \diamond z \Leftrightarrow w \diamond \chi \vee w \diamond y)$$

بحات (E.7) و (E.4) فإن المجموع الميرولوجي $y \oplus \chi$

الموجود z الذي يتداخل مع χ و y . فعلي سبيل المثال الممكنة هي

مجموع الميرولوجي للعصا (الساق) والفرشة⁽¹⁾، والبديهيات (E.1) و (E.2)

و (E.6) لا تتضمن وجود المجموع الميرولوجي ووضوحه. على وجه

الخصوص، فإن الكيان لا يعين كاملاً بأجزائه غير المتصلة. قد تكون

الأجزاء نفسها مجموعاً ميرولوجياً مختلفاً أو كلياً⁽²⁾؛ لذا تتأسس

الميرولوجيا "الكلاسيكية" عند ليزنيفسكي على افتراضات أقوى من البديهيات

(E.1) و (E.2) و (E.6) وحدها. خاصة أنها تفترض مبدأ للامتداد طبقاً له يمكن

لكيانين أن يكون لهما الأجزاء نفسها فقط إذا ما كانا أيضاً مرتبطين بعلاقة

الجزء-الكل. وتكون بديهية الامتداد الأضعف؛ هي⁽³⁾:

$$\exists z (z \ll \chi) \wedge \forall z [z \ll \chi \Rightarrow z \ll y] \Rightarrow \chi \ll y \quad (E.8)$$

تنص البديهية (E.8) على أن χ لها أجزاء مناسبة z [طبقاً للبديهية

(E.3)، على الأقل اثنان منها غير متصلين] وأن أي جزء مناسب من χ

يكون فقط جزءاً مناسباً من y إذا كانت χ هي جزء من y . إن ميرولوجيا

البديهية (E.8) يقال: إنها امتدادية. وإذا لم يتم التسليم بالبديهية (E.8) فإن

المجموع الميرولوجي لكيانين لا يكون واضحاً، ويدعى من الناحية

(1) Simons 1987, 14.

(2) Simons 1987, 32-37, وهو يناقش العديد من البديهيات التي تضمن وجود المجموع

الميرولوجي وتفرده.

(3) Simons 1987, 239.

الميرولوجية غير امتدادياً. تركز ميرولوجيا ليزنويسكي الكلاسيكية على افتراضات أكثر قوة من البديهية (E.8).

وهي تتمتع على وجه الخصوص بالبنية البولية الجبرية Boolean algebra دون العنصر الصفري وأنها تفترض أنه لأي كيانين x و y يوجد مجموع ميرولوجي $x \oplus y$ (Simons 1987, 25 and 37 ff).

E.2 الميرولوجيا والفيزياء

قد نتصل الميرولوجيا بالصياغة الرياضية للنظريات الفيزيائية بتناول المجموعات بشكل فردي. يؤدي الاعتماد على الافتراضات حول المجموعات إلى الحصول على نظام أضعف أو أقوى لبديهيات علاقة الجزء - بالكل. مع الفواصل الاعتبارية للأعداد الحقيقة مثل المنفردات وعلاقة المجموعة النظرية \supset مثل العلاقة المناسبة للجزء - بالكل \supseteq (and \supseteq) \supseteq as وقد تتركب الميرولوجيا الممتدة في العلاقات التي تتشابه \diamond وتكون غير متصلة \uparrow ويكون لها المعنى المعتاد للمجموعة - النظرية.

وفي حالة البعد الواحد فإن هذا يعني: فاصلان متشابكان إذا كان تقاطعهما ليس فارغاً وأنها يكونان غير متصلين إذا كانت المجموعة الفارغة \emptyset ، وهذه الميرولوجيا تحقق بوضوح البديهيات (E.1) و (E.2) و (E.6) ويوجد المجموع الميرولوجي نسبة إلى \supset لأي فاصلين ويكون غير غامض وهو اتحادهما، ومن ثم بالنسبة إلى الفواصل في مجموعة الأعداد الحقيقية يربط مبدأ الممتد (E.8) (المقابل لامتداد البديهي لبديهية نظرية المجموعة)، ومع هذا فإن

وجود المجموع المنطقي المجرد يكون مضموناً فقط إذا كانت فروع المجموعات غير المتصلة للأعداد الحقيقية مسموحاً بها كمتقررات.

ما يعكس نظام ليزنيوسكي البديهي أنه اعترض العلاقة "يتكون من" (التي أساسها مكونات النماذج الجزيئية والذرية وفيزياء دون الذرة) كان يجب شرحها بدلالة الميرولوجيا غير الممتدة⁽¹⁾. يبدو أن اعتراض ريشر يستهدف واقعتين. الأولى عند جميع مستويات تكوين المادة فقد تكون مكونات المادة نفسها أنظمة مختلفة مكونة الخواص الفيزيائية المختلفة والكيميائية وحتى البيولوجية، وأمثلة معروفة جيداً من العلوم الطبيعية السارية حالياً هي الفرق بين عقارب الساعة وعداد عقارب الساعة جزيئات الحمص اللبني وأطوار المادة المختلفة (جوامد وسوائل وغازات) والإمكانات المختلفة للربط الكيميائي والإثارات للذرة أو الأنظمة المركبة للكواركات التي تحدث لها درونات ذات الكتل واللف المختلف. والحقيقة الثانية عناصر النماذج للذرة وفيزياء دون الذرة المنبئية على نظرية الكم ولكن ليس للخواص الكمية تركيب بولين الجبري الذي افترضته مقدماً امتدادات الميرولوجيا لليزنيوسكي.

ومع هذا فقد أهمل ريشر Rescher حقيقة أن أي تفسير غير امتدادي لعلاقة الجزء بالكل في فيزياء مفترضة مقدماً لعلاقة ممتدة لجزء بكل، كما أن الرياضيات الأساسية تتبني على نظرية المجموعات، وكما أن ديناميكا النظام المقيد افترض مقدماً خلفية الزمان المكان. إضافة إلى حقيقة أن

(1) Rescher 1955,10 ;

وأيضاً: Simons1987 ,112 -117

النماذج المكونة للفيزياء لها ديناميكا كما يجب الأخذ في الحسبان المظاهر الزمانية المكانية وعلى النقيض مع المناظرات الفلسفية المعتادة للمذهب الذري (مثال ما جاء في مناظرة ليبنز- كلارك أو انعكاسها في عمل كانط النقدي وغير النقدي)، فقد ركزت الفيزياء الحديثة على المظاهر الديناميكية لنماذج عناصر المادة، ومن ثم لم تهتم اعتراضات ريشر بحقيقة أن العلاقة الصورية للجزء - بالكل تقتقر جداً إلى التغلب على مشكلات عناصر نماذج الفيزياء.

E.3 مكونات المادة

في الفيزياء الحديثة تتبنى نماذج عناصر المادة على ديناميكية الأنظمة المقيدة، ويربط نموذج المكون الشيء y وأجزائه المكونة X باعتبار y نظاماً مقيداً n - $\sum (\chi_1, \dots, \chi_n)$ من الكيانات χ_i :

$$y = \sum (\chi_1, \dots, \chi_n) \quad (E.9)$$

لنموذج المكون للفيزياء مظاهر وجودية ونظرية، من المنظور الأنطولوجي؛ تعني البديهية (E.9) أن y تتكون من χ_i ؛ أي أن y هي المجموع الميربولوجي للعدد n من الأجزاء المميزة جيداً والمناسبة χ_i :

$$y = \chi_1 \oplus \dots \oplus \chi_n \quad (E.10)$$

حيث إن إجمال y هو الموجود الزماني المكاني الذي يملأ منطقة زمان مكاني معين، وإضافة إلى البديهيات (E.1)، (E.2)، (E.6) فيتم الاحتياج إلى البديهية (E.8) الخاصة بالامتداد، ومع هذا فطبقاً لـ (E.9) فإن y تكون أكثر

من مجرد تجميع أو تحصيل كلي لـ X_i في الزمان المكاني وأنها نظام مقيد لـ X_i ، ويفترض أن y ككل هي موجودة مكانية - زمانية والتي تتأسس من قوى تعمل بين الـ X_i ، وهذا يعني أن بعض الخواص الفيزيائية الحاسمة لـ y يتم شرحها بالخواص الفيزيائية وبتفاعلات الـ X_i .

وهنا تأتي النظرية الفيزيائية وهي تتطلب أن الوصف الديناميكي T_y لـ y يقل تقريباً إلى الوصف الديناميكي T_x لـ X_i ، وفي عناصر النموذج المثالي تتماثل النظريتان T_x, T_y ، وفي هذه الحالة الديناميكا الفيزيائية T تصف y كنظام مقيد لـ $S(X_1, \dots, X_n)_n$ من الأشياء X_i بدلالة بعض الكميات الفيزيائية y :

$$T(\mathcal{P}^n(y)) = s(\mathcal{P}^n(x_1), \dots, \mathcal{P}^n(x_n)) \quad (E.11)$$

بصفة عامة تحمل الـ X_i و Y الخواص الديناميكية مثل الكتلة والشحنة التي تعطي كدوال للمحاور الزمنية المكانية، وأنها تتفاعل طبقاً للقوانين الـ T والتي تعطي بدلالة المعادلات التفاضلية لجميع هذه الكميات، وبهذه الطريقة منطقة الزمان ومكان المنشغلة بـ Y يتم شرحها بدلالة ديناميكية الـ X_i ، ومن ثم يكون لديناميكية النظام المقيد s مظهران نظريان مختلفان تماماً:

(1) هي تشرح كيفية حركة عناصر الـ X_i لمنطقة الزمان مكان المشغول عن طريق Y .

(2) وهي تعطي قواعد الجمع للطريق الذي فيه الخواص الديناميكية لـ Y تضيف من الخواص الخاصة بالـ X_i .

طبقاً لـ (1)، فإن T تُفسر امتداد الـ Y بدلالة زمان مكان علاقة الجزء بالكل، وفي هذه الناحية فإن أقل متطلب بالنسبة إلى كل الـ Y الذي له أجزاء X_i تكون تلك الأجزاء التي قد تتمركز في الكل. وتبعاً لـ (2) فإن قواعد الجمع للكميات الديناميكية مثل الكتلة والشحنة تُفسر الخواص الديناميكية μ_Y لـ Y بدلالة الخواص الخاصة بالـ μ_{X_i} لـ X_i ، محدثة لعدة علاقات ديناميكية جزئية من كل أى كمية محفوظة لـ T :

$$\mu_Y = \sum_{i=1}^n \mu_{X_i} \quad (E.12)$$

بينما تكون علاقة الجزء الكل الزمانية المكانية ممتدة، وقواعد الجمع الفيزيائية لا تدعم الميريولوجيا الممتدة.

قائمة المراجع

- Abachi, S., et al. (1995): Observation of the top quark, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2632–2637
- Abe, F., et al. (1995): Observation of top quark production in $p\bar{p}$ collisions with the collider detector at Fermilab, *Phys. Rev. Lett.* **74**, 2626–2631
- Afshar, S.S. (2003): Sharp complementary wave and particle behaviours in the same 'welcher weg' experiment. Available as an e-print (26 June 2006) at <http://irims.bluemirror.net/quant-ph/030503>
- Aitchison, I.J.R. (1982): *Gauge Theory in Particle Physics*, Hilger, Bristol
- Anderson, C.D. (1932): The apparent existence of easily deflectable positives, *Science* **76**, 238
- Anderson, C.D. (1933): The positive electron, *Phys. Rev.* **43**, 491–494
- Anderson, C.D., and Anderson, H.L. (1983): Unraveling the particle content of cosmic rays. In: Brown and Hoddeson (1983) pp. 131–154
- Anderson, P.W. (1997): *Concepts in Solids*, World Scientific, Singapore
- Andrade, E.N. da C. (1964): *Rutherford and the Nature of the Atom*, New York
- Armstrong, D.M. (1987a): Comments on Swoyer and Forge. In: Forge (1987) 311–317
- Armstrong, D.M. (1987b): Are quantities relations? A reply to Bigelow and Pargetter, *Philosophical Studies* **54**, 305–316
- Aspect, A., Grangier, P., and Roger, G. (1982): Experimental realization of Einstein–Podolsky–Rosen–Bohm gedankenexperiment. A new violation of Bell's inequalities, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 91–94
- Auyang, S.Y. (1995): *How is Quantum Field Theory Possible?* Oxford University Press, New York
- Bacon, F. (1620): *Novum Organum*, Apud Joannem Billium, London. New edn. by L. Jardine and M. Silverthorne, Cambridge University Press, Cambridge (2000)
- Balzer, W. (1987): Sneys Zirkel ist nicht wegzukriegen, *Conceptus XXI*, 103
- Balzer, W., Moulines, C.U., and Sneed, J.D. (1987): *An Architectonic for Science. The Structuralist Program*, Reidel, Dordrecht
- Balzer, W., and Moulines, C.U. (Eds.) (1996): *Structuralist Theory of Science. Focal Issues, New Results*, de Gruyter, Berlin, New York
- Bailer-Jones, D.M. (1997): *Scientific Models. A Cognitive Approach with an Application in Astrophysics*, University of Cambridge, Cambridge
- Bailer-Jones, D.M. (2004): Models in philosophy of science, *Habil. Thesis*, Bonn (to be published)
- Bartell, L.S. (1980): Complementarity in the double-slit experiment. On simple realizable systems for observing intermediate particle–wave behaviour, *Phys. Rev. D* **21**, 1698–1699

- Bartels, A. (1994): *Bedeutung und Begriffsgeschichte*, Schöningh, Paderborn
- Bell, J.S. (1964): On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox, *Physics* **1**, 195-200
- Beller, M. (1999): *Quantum Dialogue. The Making of a Revolution*, University of Chicago Press, Chicago, London
- Beltrametti, E.G., and Cassinelli, G. (1981): *The Logic of Quantum Mechanics*, Addison-Wesley, Reading (Mass.), London
- Berkeley, G. (1721): *De Motu - sive, de motus principio et natura, et de causa communications mottum*, Impensis Jacobi Tonson, London. New edn. in: A.A. Luce and T.E. Jessop (Eds.): *The Works of George Berkeley, Bishop of Cloyne*, Thomas Nelson, London (1948-1957)
- Bernays, P. (1922): Die Bedeutung Hilberts für die Philosophie der Mathematik, *Die Naturwissenschaften* (David Hilbert zur Feier seines sechzigsten Geburtstages) **10**, 93-99
- Bethe, H. (1930): Zur Theorie des Durchgangs schneller Korpuskularstrahlen durch Materie, *Annalen der Physik* **5**, 325-400
- Bethe, H. (1932): Bremsformel für Elektronen relativistischer Geschwindigkeit, *Z. Physik* **76**, 293-299
- Bethe, H., and Heitler, W. (1934): On the stopping of fast particles and on the creation of positive electrons, *Proc. Roy. Soc. A* **146**, 83-112
- Bethge, K., and Schröder, U.E. (1968): *Elementarteilchen*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- Bjorken, J.D., and Drell, S.D. (1964): *Relativistic Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York
- Bjorken, J.D. (1965): *Relativistic Quantum Fields*, McGraw-Hill, New York
- Bjorken, J.D. (1969): Asymptotic sum rules at infinite momentum, *Phys. Rev.* **179**, 1547-1553
- Bjorken, J.D. (1970): High-energy inelastic neutrino-nucleon interactions, *Phys. Rev. D* **1**, 3151-3160
- Bjorken, J.D., and Paschos, E.A. (1969): Inelastic electron and γ -proton scattering and the structure of the nucleon, *Phys. Rev.* **185**, 1975-1982
- Bloch, F. (1933): Bremsvermögen von Atomen mit mehreren Elektronen, *Z. Physik* **81**, 363-376
- Bloom, E.D., Coward, D.H., DeStaebler, H., Drees, J., Miller, G., Mo, L.W., and Taylor, R.E. (1969): High-energy inelastic e-p scattering at 6° and 10°, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 930-934. Repr. in: Cahn and Goldhaber (1989)
- Bogen, J., and Woodward, J. (1988): Saving the phenomena, *The Phil. Rev.* **97**, 303-352
- Bogoliubov, N.N., and Shirkov, D.V. (1959): *Introduction to the Theory of Quantized Fields*, Interscience Publishers, New York
- Bohm, D. (1952): A suggested interpretation of the quantum theory in terms of 'hidden' variables, I and II, *Phys. Rev.* **85**, 166-179, 180. Repr. in: Wheeler and Zurek (1983)
- Bohr, N. (1913a): On the theory of the decrease of velocity of moving electrified particles on passing through matter, *Phil. Mag.* **25**, 10-31. Repr. in: *Bohr Collected Works* (BCW), North-Holland (Elsevier) Amsterdam, Vol. 2, 18-39
- Bohr, N. (1913b): On the constitution of atoms and molecules, *Phil. Mag.* **26**, 1 (Part I); 476 (Part II); 857 (Part III). Repr. in: BCW 2, 161-233
- Bohr, N. (1915): On the decrease of velocity of swiftly moving electrified particles on passing through matter, *Phil. Mag.* **30**, 581-612. Repr. in: BCW 8, 127-160

- Bohr, N. (1920): Über die Serienspektren der Elemente, *Z. Physik* **2**, 423–469.
Engl. transl. in: Bohr (1922)
- Bohr, N. (1922): *The Theory of Spectra and Atomic Constitution*, Cambridge University Press, Cambridge
- Bohr, N. (1923): Über die Anwendung der Quantentheorie auf den Atombau: I. Die Grundpostulate der Quantentheorie, *Z. Physik* **13**, 117–165. Engl. transl. in: *Proc. of the Cambridge Philosophical Society* **2** (1924), 1–42. Repr. in: BCW **3**, 458–499
- Bohr, N. (1928): The quantum postulate and the recent development of atomic Theory, *Nature* **121**, 580–590. Repr. in: Wheeler and Zurek (1983) pp. 87–126. Modified version of the Como Lecture (1927). Both versions in: BCW **6**, 109–158
- Bohr, N. (1935a): Quantum mechanics and physical reality, *Nature* **136**, 65. Repr. in: Wheeler and Zurek (1983) p. 144
- Bohr, N. (1935b): Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Phys. Rev.* **48**, 695–702. Repr. in: Wheeler and Zurek (1983) pp. 145–151
- Bohr, N. (1937): Causality and complementarity, *Phil. of Sci.* **4** (3), 289–298
- Bohr, N. (1948): On the notions of causality and complementarity, *Dialectica* **2**, 312–318 Repr. in: BCW **7**, 330–337
- Bohr, N. (1949): Discussion with Einstein on epistemological problems of atomic physics. In: Schilpp (1949) pp. 115–150. Repr. in: Wheeler and Zurek (1983) pp. 9–49
- Bohr, N., Kramers, H.A., and Slater, J.C. (1924): The quantum theory of radiation, *Phil. Mag.* **47**, 785–802. Repr. in: B.L. van der Waerden (Ed.): *Sources of Quantum Mechanics*, Dover, New York (1967) pp. 159–176
- Born, M. (1926a): Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge, *Z. Physik* **37**, 863–867. Engl. transl. in: Wheeler and Zurek (1983) pp. 52–55
- Born, M. (1926b): Quantenmechanik der Stoßvorgänge, *Z. Physik* **38**, 803–827. Repr. in: Herrmann (1962)
- Born, M. (1926c): Zur Wellenmechanik der Stoßvorgänge, *Nachr. Ges. Wiss. Göttingen* **1926**, 146–160. Repr. in: Herrmann (1962)
- Bothe, W., and Geiger, H. (1925): Über das Wesen des Comptoneffekts, *Z. Physik* **32**, 639–663
- Breidenbach, M., Friedman, J.I., and Kendall, H.W. (1969): Observed behavior of highly inelastic electron–proton scattering, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 935–939. Repr. in: Cahn and Goldhaber (1989)
- Breit, G., and Wheeler, J.A. (1934): Collision of two light quanta, *Phys. Rev.* **46**, 1087–1091
- Bridgman, P.W. (1922): *Dimensional Analysis*, Yale University Press, New Haven
- Bridgman, P.W. (1927): *The Logic of Modern Physics*, Macmillan, New York
- Brown, H.I. (1987): Naturalizing observation. In: Nersessian (1987) 179–193
- Brown, H.R., and Harré, R. (Eds.) (1988): *Philosophical Foundations of Quantum Field Theory*, Clarendon Press, Oxford
- Brown, L.M., and Hoddeson, L. (1983): *The Birth of Particle Physics*, Cambridge University Press, Cambridge
- Brown, L.M., Dresden, M., and Hoddeson, L. (Eds.) (1989): *Pions to Quarks. Particle Physics in the 1950s*, Cambridge University Press, Cambridge
- Busch, P., Lahti, P.J., and Mittelstaedt, P. (1991): *The Quantum Theory of Measurement*, Springer, Berlin

- Busch, P., Grabowski, M., and Lahti, P.J. (1995): *Operational Quantum Physics*, Springer, Berlin, Heidelberg
- Busch, P., and Mittelstaedt, P. (1991): The problem of objectification in quantum mechanics, *Found. Phys.* 8, 889-904
- Busch, P., and Lahti, P.J. (1995): The complementarity of quantum observables: Theory and experiments, *Rivista del Nuovo Cimento* 18, 1-27.
Also <http://arxiv.org/pdf/quant-ph/0406132>
- Butts, R.E., and Brown, J.R. (Eds.) (1989): *Constructivism and Science*, Kluwer, Dordrecht
- Cahn, R.N., and Goldhaber, G. (1989): *The Experimental Foundations of Particle Physics*, Cambridge University Press, Cambridge
- Callender, C., and Huggett, N. (2001): *Physics Meets Philosophy at the Planck Scale*, Cambridge University Press, Cambridge
- Campbell, N.R. (1920): *Foundations of Science*, Dover, New York (1957). A reduced photographic reprint of the edition of *Physics. The Elements*, Cambridge (1920)
- Cao, T.Y. (Ed.) (1999): *Conceptual Foundations of Quantum Field Theory*, Cambridge University Press, Cambridge
- Carnap, R. (1928): *Der logische Aufbau der Welt*, Weltkreis Verlag, Berlin. Engl. transl. by R.A. George: *The Logical Structure of the World*, Open Court, Chicago, Ill. (2003)
- Carnap, R. (1931): Überwindung der Metaphysik durch logische Untersuchung der Sprache, *Erkenntnis* 2, 219-241
- Carnap, R. (1947): *Meaning and Necessity*, University of Chicago Press, Chicago
- Carnap, R. (1956): The methodological character of theoretical concepts. In: H. Feigl and M. Scriven (Eds.): *The Foundations of Science and the Concepts of Psychology and Psychoanalysis*, Minnesota Studies in the Philosophy of Science Vol. 1, University of Minnesota Press, Minneapolis, pp. 38-76
- Carnap, R. (1966): *Philosophical Foundations of Physics*, Dover, New York
- Carrier, M. (1991): What is wrong with the miracle argument? *Stud. in Hist. and Phil. of Sci.* 22, 23-36
- Carrier, M. (1993): What is right with the miracle argument. Establishing a taxonomy of natural kinds, *Stud. in Hist. and Phil. of Sci.* 24, 391-409
- Carson, E., and Huber, R. (Eds.) (2006): *Intuition and the Axiomatic Method*, Springer, Dordrecht
- Cartwright, N. (1983): *How the Laws of Physics Lie*, Clarendon Press, Oxford
- Cartwright, N. (1989): *Nature's Capacities and Their Measurement*, Clarendon Press, Oxford
- Cartwright, N. (1999): *The Dappled World. A Study of the Boundaries of Science*, Cambridge University Press, Cambridge
- Cassidy, D. (1981): Cosmic ray showers, high energy physics, and quantum field theories: Programmatic interactions in the thirties, *Hist. Stud. Phys. Sci.* 12, 1-39
- Cassirer, E. (1937): *Determinismus und Indeterminismus in der modernen Physik*, Göteborg. Reprint in: H.-W. Wendt (Ed.): *Zur modernen Physik*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt (1957)
- Chevalley, C. (1991): Introduction et glossaire. Analyse et synthèse. In: *Niels Bohr: Physique Atomique et Connaissance Humaine*, Gallimard, Paris, pp. 17-144 and 345-567

- Christenson, J.H., Cronin, J.W., Fitch, V.L., and Turlay, R. (1964): Evidence for the 2π decay of the K_2^0 meson, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 138–140
- Churchland, P.M., and Hooker, C.A. (Eds.) (1985): *Images of Science*, University of Chicago Press, Chicago
- Clauer, J.F., and Horne, M.A. (1974): Experimental consequences of objective local theories, *Phys. Rev. D* **10**, 526–535
- Clifton, R., and Halvorson, H. (2002): No place for particles in relativistic quantum theories? *Philosophy of Science* **69**, 1–28. Repr. in: *Quantum Entanglements. Selected Papers*, ed. by J. Butterfield and H. Halvorson, Oxford University Press, Oxford (2004)
- Cohen, H. (1885): *Kants Theorie der Erfahrung*, Duemmler, Berlin (2nd extended edn.). Reprint in: *Werke*, Vol. 1.1, Olms, Hildesheim (1977 ff.)
- Cohen, H. (1896): Einleitung mit kritischem Nachtrag zur 9. Auflage der Geschichte des Materialismus von Friedrich Albert Lange. Repr. in: *Werke*, Vol. 5.2, Olms, Hildesheim (1977 ff.)
- Compton, A.H. (1923): A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements, *Phys. Rev.* **21**, 483–502
- Compton, A.H., and Allison, S.K. (1935): *X-Rays in Theory and Experiment*, Macmillan, Toronto, New York, London
- Cowan, G. (1998): *Statistical Data Analysis*, Clarendon Press, Oxford
- Cramer, J.G. (1986): The transactional interpretation of quantum mechanics, *Rev. Mod. Phys.* **58**, 647–687
- Crisp, M.D., and Jaynes, E.T. (1969): Radiative effects in semiclassical theory, *Phys. Rev.* **179**, 1253–1261
- Darrigol, O. (1992): *From c-Numbers to q-Numbers*, University of California Press, Berkeley
- Daston, L. (Ed.) (2000): *Biographies of Scientific Objects*, University of Chicago Press, Chicago
- Davidson, D. (1974): On the very idea of a conceptual scheme. *Proc. and Addr. of the Am. Phil. Ass.* **47**. Repr. in: Davidson, D.: *Inquiries into Truth and Interpretation*, Clarendon Press, Oxford (1984) pp. 183–198
- Davisson, C., and Germer, L.H. (1927): Diffraction of electrons by a crystal of nickel, *Phys. Rev.* **30**, 705–740
- de Broglie, L. (1923): Ondes et quanta, *Comptes rendus* **177**, 507–510
- Debye, P. (1923): Zerstreuung von Röntgenstrahlen und Quantentheorie, *Phys. Zeitschrift* **24**, 161–166. Engl. transl. in: *The Collected Papers of P.J.W. Debye*, Interscience, New York (1954) pp. 80–88
- Descartes, R. (1644): *Principia philosophiae*, Apud Ludovicum Elzevirium, Amsterdam. Engl. transl. by Miller, V.: *Principles of Philosophy*, transl. with explanatory notes, Kluwer, Dordrecht (1984)
- Dirac, P.A.M. (1927): The quantum theory of the emission and absorption of radiation, *Proc. Roy. Soc. A* **113**, 243–265
- Dirac, P.A.M. (1928a): The quantum theory of the electron, *Proc. Roy. Soc. (London) A* **117**, 610–624
- Dirac, P.A.M. (1928b): The quantum theory of the electron (Part II), *Proc. Roy. Soc. (London) A* **118**, 351–361
- Dirac, P.A.M. (1958): *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, Oxford, London
- Drell, S.D., and Zachariassen, F. (1961): *Electromagnetic Structure of Nucleons*, Oxford University Press, London, Oxford

- Duhem, P. (1906): *La theorie physique, son objet et sa structure*, Chevalier & Riviere, Paris. Engl. transl. by P.P. Wiener: *The Aim and Structure of Physical Theory*, Princeton University Press, Princeton (1991)
- Dürr, S. (2006): The phase of a Bose–Einstein condensate. To appear in: *Physics and Philosophy*. Open Access Online Journal: <http://physphil.uni-dortmund.de/>
- Dürr, S., Nonn, T., and Rempe, G. (1998a): Origin of quantum-mechanical complementarity probed by ‘which-way’ experiment in an atom interferometer, *Nature* **395**, 33–37
- Dürr, S., Nonn, T., and Rempe, G. (1998b): Fringe visibility and which-way information in an atom interferometer, *Phys. Rev. Lett.* **81** (26), 5705–5709
- Dürr, S., and Rempe, G. (2000a): Wave–particle duality in an atom interferometer, *Advances in Atomic, Molecular and Optical Physics* **42**, 29–71
- Dürr, S., and Rempe, G. (2000b): Can wave–particle duality be based on the uncertainty relation? *Am. J. Phys.* **68** (11), 1021–1024
- Earman, J. (1989): *World Enough and Spacetime*, MIT Press, Cambridge (Mass.)
- Eddington, A. (1939): *The Philosophy of Physical Science*, Cambridge University Press, Cambridge. Repr. with corrections: Cambridge University Press (1949)
- Einstein, A. (1905): Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik* **17**, 132–148
- Einstein, A. (1917): Zur Quantentheorie der Strahlung, *Physikal. Zeitschrift* **18**, 121–128
- Einstein, A. (1936): Physik und Realität. Talk in Albany (New York), Oct. 15th, 1936. Reprint in: Einstein (1993) pp. 63–130
- Einstein, A. (1949): Autobiographical Notes. In: Schilpp (1949), pp. 1–94
- Einstein, A. (1993): *Aus meinen späten Jahren*, 4th edn., Ullstein-Verlag, Frankfurt, Berlin
- Einstein, A., Podolsky, B., and Rosen, N. (1935): Can quantum mechanical description of reality be considered complete? *Phys. Rev.* **47**, 777–780
- Ellis, B. (1968): *Basic Concepts of Measurement*, 2nd edn., Cambridge University Press, Cambridge
- Englert, B.-G. (1996): Fringe visibility and which-way information: An inequality, *Phys. Rev. Lett.* **77**, 2154–2157
- Englert, B.-G. (1998): Von wifbaren und unwifbaren Wegen, *Phys. Bl* **54**, 999–1000
- Englert, B.-G., Schwinger, J., and Scully, M.O. (1990): Center-of-mass motion of masing atoms. In: A.O. Barut (Ed.): *New Frontiers in Quantum Electrodynamics and Quantum Optics*, Plenum Press, New York, pp. 513–519
- Englert, B.-G., and Scully, M.O. (1990): Good and bad welcher weg detectors. In: A.O. Barut (Ed.): *New Frontiers in Quantum Electrodynamics and Quantum Optics*, Plenum Press, New York, pp. 507–512
- Englert, B.-G., Scully, M.O., and Walther, H. (1991): Quantum optical tests of complementarity, *Nature* **351**, 111–116
- Englert, B.-G., Scully, M.O., and Walther, H. (1995): Complementarity and uncertainty, *Nature* **375**, 367–368
- Ernst, F.J., Sachs, R.G., and Wali, K.C. (1960): Electromagnetic form factors of the nucleon, *Phys. Rev.* **119**, 1105–1114
- Falkenburg, B. (1988): The unifying role of symmetries in particle physics, *Ratio (New Series)* **1**, 113–134

- Falkenburg, B. (1993a): The concept of spatial structure in microphysics, *Phil. Nat.* 30/2, 208–228
- Falkenburg, B. (1993b): Substanzbegriff und Quantentheorie, *Phil. Nat.* 30, 229–246
- Falkenburg, B. (1993c): Hegel on mechanistic models of light. In: Petry, M.J. (Ed.): *Hegel and Newtonianism*, Kluwer, Dordrecht, pp. 531–546
- Falkenburg, B. (1995): *Teilchenmetaphysik. Zur Realitätsauffassung in Wissenschaftsphilosophie und Mikrophysik*, 2nd edn., Spektrum, Heidelberg
- Falkenburg, B. (1996): The analysis of particle tracks. A case for trust in the unity of physics, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* 27, 337–371
- Falkenburg, B. (1998): Bohr's principles of unifying quantum disunities, *Phil. Nat.* 35/1, 95–120
- Falkenburg, B. (2000): *Kants Kosmologie. Die wissenschaftliche Revolution der Naturphilosophie im 18. Jahrhundert*, Klostermann, Frankfurt
- Falkenburg, B. (2000a): How to observe quarks. In: E. Agazzi and M. Pauri (Eds.): *The Reality of the Unobservable*, Kluwer, Dordrecht, pp. 329–341
- Falkenburg, B. (2001): Die Maßsetzung im Endlichen. Introduction to: Wind (1934) (new German edn., Suhrkamp Verlag, Frankfurt) pp. 11–59
- Falkenburg, B. (2002a): Measurement and ontology: What kind of evidence can we have for quantum fields? In: Kuhlmann et al. (2002) pp. 235–254
- Falkenburg, B. (2002b): Correspondence and the non-reductive unity of physics. In: C. Mataix and A. Rivadulla (Eds.): *Física Cuántica y Realidad - Quantum Physics and Reality*, Editorial Complutense, Madrid
- Falkenburg, B. (2004): Experience and completeness in physical knowledge: Variations on a Kantian Theme. In: Meixner and Newen (2004) pp. 153–176
- Falkenburg, B. (2006a): Functions of intuition in quantum physics. In: Carson and Huber (2006) pp. 267–292
- Falkenburg, B. (2006b): Metamorphosen des Teilchenkonzepts. In: H. Fischler and C.S. Reiners (Eds.): *Die Teilchenstruktur der Materie im Physik- und Chemieunterricht*, Logos, Berlin (to appear) pp. 25–45
- Falkenburg, B., and Schnepf, R. (1998): Kausalität in Metaphysik und Physik. In: B. Falkenburg and D. Pätzold (Eds.): *Verursachung. Repräsentationen von Kausalität*, *Dialektik* 1998/2, 27–48
- Falkenburg, B., and Ihmig, K.-N. (2004): "Hypotheses non fingo." Newtons wissenschaftliche Methodenlehre, DFG – Fa 261/5-1
- Faye, J. (1991): *Niels Bohr, His Heritage and Legacy. An Anti-Realist View of Quantum Mechanics*, Kluwer, Dordrecht
- Feynman, R.P. (1949a): The theory of positrons, *Phys. Rev.* 76, 749–759
- Feynman, R.P. (1949b): Space-time approach to quantum electrodynamics, *Phys. Rev.* 76, 769–789
- Feynman, R.P. (1961): *Quantum Electrodynamics*, Benjamin, New York
- Feynman, R.P. (1969): Very high-energy collisions of hadrons, *Phys. Rev. Lett.* 23, 1415–1417
- Feynman, R.P. (1985): *QED – The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton University Press, Princeton
- Feynman, R.P. (1987): The reasons for antiparticles. In: Feynman, R.P., and Weinberg, S.: *Elementary Particles and the Laws of Physics*, The 1986 Dirac Memorial Lectures, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1–59
- Feynman, R.P., Leighton, R.B., and Sands, M. (1965): *The Feynman Lectures on Physics*, Part III, Addison-Wesley, Reading (Mass.)

- Fine, A. (1984): The natural ontological attitude. In: Leplin (1984) pp. 83–107
- Foerster, H.V. (1981): Das Konstruieren einer Wirklichkeit. In: Watzlawick, P.: *Die erfundene Wirklichkeit*, Piper, München
- Folse, H.J. (1985): *The Philosophy of Niels Bohr: The Framework of Complementarity*, North Holland, Amsterdam
- Forge, J. (Ed.) (1987): *Measurement, Realism and Objectivity*, Reidel, Dordrecht
- Fox, T. (2006): *Relativer Atomismus*, Dissertation, University of Dortmund
- Franklin, A. (1986): *The Neglect of Experiment*, Cambridge University Press, Cambridge
- Franklin, A. (1990): *Experiment, Right or Wrong*, Cambridge University Press, Cambridge
- Franklin, A. (2001): *Are There Really Neutrinos? An Evidential History*, Perseus Books, Cambridge (Mass.)
- Frege, G. (1884): *Die Grundlagen der Arithmetik. Eine logisch mathematische Untersuchung über den Begriff der Zahl*, M. Marcus, Breslau. Repr. by Thiel, Ch. (Ed.): Meiner, Hamburg (1986)
- Frege, G. (1892): Über Sinn und Bedeutung, *Zeit. f. Phil. u. phil. Kritik* 100, 25–50
- Friedman, M. (1974): Explanation and scientific understanding, *Journ. of Phil.* 71, 5–19. Repr. in: Joseph C. Pitt (Ed.): *Theories of Explanation*, Oxford University Press, Oxford (1988)
- Friedman, M. (1983): *Foundations of Space-Time Theories*, Princeton University Press, Princeton
- Friedman, M. (1992): *Kant and the Exact Sciences*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), London
- Friedman, M. (1999): *Reconsidering Logical Positivism*, Cambridge University Press, Cambridge
- Friedman, M. (2000): *A Parting of the Ways. Carnap, Cassirer, Heidegger*, Open Court, Chicago, La Salle (Illinois)
- Galileo, G. (1638): *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno à due nuove scienze Attenti alle Mecnica i Movimenti Locali*, Leyden. Engl. transl.: (*Discourses on the Two New Sciences*, transl. and ed. by S. Drake, Toronto (2000, 2nd edn.)
- Galison, P. (1987): *How Experiments End*, University of Chicago Press, Chicago
- Geiger, H., and Marsden, E. (1913): Die Zerstreungsgesetze der α -Strahlen bei großem Ablenkungswinkel, *Phil. Mag.* 25, 604–623
- Gelfert, A. (2003): Manipulative success and the unreal, *International Studies in the Philosophy of Science* 17/3, 245–283
- Giuntini, R. (1991): *Quantum Logic and Hidden Variables*, Bibliographisches Institut (Wiss.-Verl), Mannheim
- Giulini, D., Joos, E., Kiefer, C., Kupsch, J., Stamatescu, I.-O. and Zeh, H.D. (1996): *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, Springer Verlag, Berlin
- Goldberger, M.L., and Watson, K.M. (1975): *Collision Theory*, Wiley, New York
- Goodman, N. (1951): *The Structure of Appearance*, Kluwer, Harvard, Dordrecht (1977 3rd edn.)
- Grangier, P., Rogier, G., and Aspect, A. (1986): Experimental evidence for a photon anti-correlation effect on a beamsplitter, *Europhys. Lett.* 1, 173–179
- Greenstein, G., and Zajonc, A.G. (1997): *The Quantum Challenge. Modern Research on the Foundations of Quantum Mechanics*, Jones and Bartlett, Boston

- Grimsehl, E. (1938): *Grimsehls Lehrbuch der Physik*, ed. by R. Tomaschek, Teubner, Leipzig, Berlin (8th edn.)
- Grünbaum, A. (1963): *Philosophical Problems of Space and Time*, Alfred A. Knopf, New York
- Hacking, I. (1983): *Representing and Intervening*, Cambridge University Press, Cambridge
- Hanson, P.P. (1982): Recension of van Fraassen 1980, *Philosophy of Science* 49, 290
- Harding, S.G. (1976): *Can Theories be Refuted? Essays on the Duhem-Quine Thesis*, Reidel, Dordrecht
- Hedrich, R. (2006): String Theory - From Physics to Metaphysics. To appear in: *Physics and Philosophy*. Open Access Online Journal: <http://physphil.uni-dortmund.de/>
- Hegel, G.W.F. (1830): *Enzyklopädie der philosophischen Wissenschaften*, Teil 1: *Die Logik* and Teil 2: *Die Naturphilosophie*. In: E. Moldenhauer and K.M. Michel (Eds.): *Gesamtwerk*, 8. and 9. Bd., Suhrkamp Verlag Frankfurt am Main (1969 ff.)
- Heisenberg, W. (1927): Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik, *Z. Physik* 43, 172-198
- Heisenberg, W. (1930a): *Physikalische Prinzipien der Quantentheorie*, Hirzel, Leipzig. Repr.: Bibliographisches Institut, Mannheim (1958)
- Heisenberg, W. (1930b): *Physical Principles of Quantum Theory*, transl. by C. Eckart and F.C. Hoyt, University of Chicago Press, Chicago
- Heisenberg, W. (1967): *Einführung in die einheitliche Feldtheorie der Elementarteilchen*, Hirzel, Stuttgart
- Heisenberg, W. (1969): *Der Teil und das Ganze. Gespräche im Umkreis der Atomphysik*, Piper, München. Repr. in: Heisenberg (1985) pp. 3-334
- Heisenberg, W. (1971): Der Begriff der kleinsten Teilchen in der Entwicklung der Naturwissenschaft. In: *Meyers Enzyklopädisches Lexikon*, Vol. 2, Bibliographisches Institut, Mannheim, pp. 870-879. Repr. in: Heisenberg (1985) pp. 395-404.
- Heisenberg, W. (1976): Was ist ein Elementarteilchen? *Die Naturwissenschaften* 63, 1-7. Repr. in: Heisenberg (1985) pp. 507-513
- Heisenberg, W. (1985): *Collected Works*, Part C III, ed. by W. Blum, H.-P. Dürr and H. Rechenberg, Piper, München, Zürich
- Heitler, W., and Sauter, F. (1933): Stopping of fast particles with emission of radiation and the birth of positive electrons, *Nature* 132, 892
- Helmholtz, H. von (1887): Zählen und Messen erkenntnistheoretisch betrachtet. Engl. transl. in: R.S. Cohen and Y. Elkana (Eds.): *Epistemological Writings*, Boston Studies 37, Reidel, Dordrecht (1977)
- Hempel, C.G. (1952): *Fundamentals of Concept Formation in Empirical Science*, University of Chicago Press, Chicago
- Herrmann, A. (Ed.) (1962): *Zur statistischen Deutung der Quantenmechanik, Dokumente der Naturwissenschaft, Abt. Physik*, Bd. 1. Ernst Battenburg Verlag, Stuttgart
- Hilbert, D. (1918): Axiomatisches Denken, *Mathematische Annalen* 78, 405-415. Repr. in: *Gesammelte Abhandlungen*, Vol. 3, 146-156, Springer, Berlin (1935)
- Hofstadter, R. (1956): Electron scattering and nuclear structure, *Rev. Mod. Phys.* 28, 214-259

- Hofstadter, R. (1989): A personal view of nucleon structure as revealed by electron scattering. In: Brown (1989) pp. 126–143
- Hofstadter, R., Bumiller, F., and Yearian, M.R. (1958): Electromagnetic structure of the proton and neutron, *Rev. Mod. Phys.* **30**, 482–497
- Hones, M.J. (1991): Scientific realism and experimental practice in high-energy physics, *Synthese* **86**, 29–76
- Honner, J. (1987): *The Description of Nature: Niels Bohr and the Philosophy of Quantum Physics*, Clarendon Press, Oxford
- Hooker, C.A. (1973): Metaphysics and modern physics. In: C.A. Hooker (Ed.): *Contemporary Research in the Foundations and Philosophy of Quantum Theory* Reidel, Dordrecht, pp. 174–304
- Howard, D. (2002): Who invented the Copenhagen interpretation?, *Philosophy of Science* **71**, 669–682
- Hoyningen-Huene, P. (1993): *Reconstructing Scientific Revolutions*, University of Chicago Press, Chicago
- Huber, R. (2000): *Poincaré und Einstein: Zur philosophischen Beurteilung physikalischer Theorien*, Mentis, Paderborn
- Hughes, R.I.G. (1989): *The Structure and Interpretation of Quantum Mechanics*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.)
- Hume, D. (1739): *A Treatise of Human Nature*, John Noon, London. New edn. by L.A. Selby-Bigge: Clarendon Press, Oxford (1988)
- Hüttemann, A. (1997): *Idealisierungen und das Ziel der Physik. Eine Untersuchung zum Realismus, Empirismus und Konstruktivismus in der Wissenschaftstheorie*, de Gruyter, Berlin, New York
- Ihmig, K.-N. (2004): Die Bedeutung der Methoden der Analyse und Synthese für Newtons Programm der Mathematisierung der Natur. In: Meixner and Newen (2004) pp. 91–119
- Itzykson, C., and Zuber, J.-B. (1985): *Quantum Field Theory*, McGraw-Hill, New York
- Jackson, J.D. (1975): *Classical Electrodynamics*, 2nd edn., Wiley, New York, London
- Jaeger, G., Shimony, A., and Vaidman, L. (1995): Two interferometric complementarities, *Phys. Rev. A* **51**, 54–67
- Jammer, M. (1966): *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill, New York
- Jammer, M. (1974): *The Philosophy of Quantum Mechanics*, Wiley Interscience, New York
- Janich, P. (1996): *Konstruktivismus und Naturerkenntnis. Auf dem Weg zum Kulturalismus*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt
- Jaynes, E. (1980): Quantum beats. In: A.O. Barut (Ed.): *Foundations of Radiation Theory and Quantum Electrodynamics*, Plenum Press, New York, pp. 37–43
- Jochmann, E., Hermes, O., and Spies, P. (1900): *Grundriß der Experimentalphysik*, 14th edn., Winkelmann, Berlin
- Joos, E. (1990): Die Begründung klassischer Eigenschaften aus der Quantentheorie, *Phil. Nat.* **27**, 31
- Kant, I. (1766): *Träume eines Geistersehers*, Kanter, Königsberg. Engl. Transl. by D. Walford and R. Meerbote (Eds): *The Cambridge Edition of the Works of Immanuel Kant. Theoretical Philosophy, 1755–1770*, Cambridge University Press, Cambridge (1992) pp. 923–989

- Kant, I. (1781/87): *Kritik der reinen Vernunft*, Hartknoch (ed. A/B), Riga. Engl. transl.: P. Guyer and A.W. Wood (Eds.): *The Cambridge Edition of the Works of Immanuel Kant. Critique of Pure Reason*, Cambridge University Press, Cambridge (1998)
- Kant, I. (1786): *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft*, Riga. Engl. Transl.: M. Friedman: *Metaphysical Foundations of Natural Science*, Cambridge University Press, Cambridge (2004)
- Kant, I., Akademie-Ausgabe: Kants gesammelte Schriften. Hrsg. von der königlich preussischen Akademie der Wissenschaften (later: Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin). Bd. 1-23 (Werke, Briefe, Handschriftlicher Nachlaß), Berlin (1900-1955). Bd. 24 ff. (Vorlesungen), Berlin (1966 ff)
- Kastner, R.E. (2005): Why the Afshar experiment does not refute complementarity, *Stud. in Hist. and Phil. of Mod. Phys.* **36**, 649-658
- Keller, M., Lange, B., Hayasaka, K., Lange, W. and Walther, H. (2004): Continuous generation of single photons with controlled waveform in an ion-trap cavity system, *Nature* **431**, 1075-1078
- Kim, Y.-H., Yu, R., Kulik, S.P., Shih, Y.H. and Scully, M.O. (1999): A delayed choice quantum eraser. Available as an e-print (13 March 1999) at www.americanscientist.org/template/PDFDetail/assetid/35556
- Kleinknecht, K., and Burkhard, R. (1987): *Z. Phys. C* **34**, 209
- Knorr-Cetina, K.D. (1981): *The Manufacture of Knowledge. An Essay on the Constructivist and Contextual Nature of Science*, Pergamon Press, Oxford
- Knorr-Cetina, K.D. (1984): *Die Fabrikation von Erkenntnis. Zur Anthropologie der Naturwissenschaft*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt
- Knorr-Cetina, K.D. (1999): *Epistemic Cultures. How the Sciences Make Knowledge*, Harvard University Press, Cambridge (Mass.), London
- Krantz, D.H., Duncan, R., Suppes, L.P., and Tversky, A. (1971): *Foundations of Measurement*, Vol. 1, Academic Press, San Diego
- Kuhlmann, M., Lyre, H., and Wayne, A. (Eds.) (2002): *Ontological Aspects of Quantum Field Theory*, World Scientific, Singapore
- Kuhn, T.S. (1961): The function of measurement in modern physical science, *Isis* **52**, 161-193
- Kuhn, T.S. (1962): *The Structure of Scientific Revolution*, 1st edn., University of Chicago Press, Chicago
- Kuhn, T.S. (1970): *The Structure of Scientific Revolution*, 2nd edn., University of Chicago Press, Chicago
- Kuhn, T.S. (1977): *The Essential Tension. Selected Studies in Scientific Tradition and Change*, University of Chicago Press, Chicago, London
- Kyburg, H.E., Jr. (1984): *Theory and Measurement*, Cambridge University Press, Cambridge
- Lamb, W.E., Jr., and Scully, M.O. (1969): The photoelectric effect without photons. In: *Polarisation, Matière et Rayonnement*, Presses Univ. de France, Paris, pp. 363-369
- Landau, L.D., and Lifschitz, E.M. (1987): *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Vol. I, *Mechanik*, 12th edn., Berlin
- Landau, L.D., and Lifschitz, E.M. (1988): *Lehrbuch der theoretischen Physik*, Vol. III, *Quantenmechanik*, 8th edn., Berlin
- Latour, B., and Woolgar, S. (1979): *Laboratory Life. The Construction of Scientific Facts*, Sage Publications, Beverly Hills, London. Princeton University Press, Princeton (N.J.) (2nd edn. 1986)

- Lattes, C.M.G. (1983): My work in meson physics with nuclear emulsions. In: Brown and Hoddeson (1983) pp. 307–310
- Laudan, L. (1981): A confutation of convergent realism, *Phil. of Science* 48, 19–49. Repr. in: Lepin (1984) pp. 218–249, or Papineau (1996) pp. 107–138
- Leibniz, G.W. (1714): *Monadology*, ed. by N. Rescher, Routledge, London (2002)
- Leibniz, G.W., and Clarke, S. (1715/16): *The Leibniz–Clarke Correspondence*, edited with introduction and notes by H.G. Alexander, Manchester University Press, Manchester (1956, repr. 1998)
- Leonhard, H.S., and Goodman, N. (1940): The calculus of individuals and its use, *Journal of Symbolic Logic* 5, 45–55
- Leonard, C.S. (2003): Ideal or real: What is the “nature of science”? *Philosophy of Education* 2003, 293–295
- Lepin, J. (Ed.) (1984): *Scientific Realism*, University of California Press, Berkeley
- Liss, T., and Tipton, P. (1997): The discovery of the top quark, *Scientific American* 277, 54–59
- Locke, J. (1689): *An Essay Concerning Human Understanding*, London. New edn. by P.H. Nidditch: Clarendon Press, Oxford (1975)
- Lorentz, H.A. (1895): *Versuch einer Theorie der electrischen und optischen Erscheinungen in bewegten Körpern*, Section 12, Brill, Leiden. Repr. in: *Collected Papers*, Vol. 5, Martinus Nijhoff, The Hague (1936)
- Lorenzen, P. (1974): *Konstruktive Wissenschaftstheorie*, Suhrkamp Verlag, Frankfurt
- Losee, J. (1993): *A Historical Introduction to the Philosophy of Science*, 3rd edn., Oxford University Press, Oxford, New York
- Ludwig, G. (1990): *Die Grundstrukturen einer physikalischen Theorie*, 2nd edn., Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- Lyre, H. (2004): *Lokale Symmetrien und Wirklichkeit. Eine naturphilosophische Studie über Eichtheorien und Strukturenrealismus*, Schöningh, Paderborn
- Mach, E. (1883): *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt*, 1st edn., Brockhaus, Leipzig. Quoted from the repr.: *Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt* (1991, repr. of the 9th edn.: Brockhaus, Leipzig 1933). Engl. Transl.: *The Science of Mechanics. A Critical and Historical Account of its Development*, transl. by T.J. McCormack, new introduction by K. Menger, Open Court, La Salle, Ill. (6th edn. 1960)
- Mach, E. (1926): *Erkenntnis und Irrtum. Skizzen zur Psychologie der Forschung*, 5th edn., Barth, Leipzig. Quoted from the repr.: *Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt* (1991). Engl. Transl.: *Knowledge and Error. Sketches on the Psychology of Enquiry*, with an introduction by E.N. Hiebert. Transl. by T.J. McCormack and P. Foulkes: Reidel, Dordrecht (1976)
- Mackie, J.L. (1980): *The Cement of the Universe*, Clarendon Press, Oxford
- MacKinnon, E.M. (1982): *Scientific Explanation and Atomic Physics*, University of Chicago Press, Chicago
- Malament, D.B. (1996): In defense of dogma. Why there cannot be a relativistic quantum mechanics of (localizable) particles. In: R. Clifton (Ed.): *Perspectives on Quantum Reality*, Kluwer, Dordrecht, pp. 1–10
- Mandel, L. (1976): The case for and against semiclassical radiation theory. In: *Progress in Optics*, Vol. 13 (A76–30145), North-Holland, Amsterdam, pp. 13–74
- Margenau, H. (1954): Advantages and disadvantages of various interpretations of the quantum theory, *Physics Today* 7, 6–13

- Matthews, M.R. (2003): Data, phenomena, and theory: How clarifying the concepts can illuminate the nature of science, *Philosophy of Education* 2003, 283–292
- Maxwell, G. (1962): The ontological status of theoretical entities. In: H. Feigl and G. Maxwell (Eds.): *Scientific Explanation, Space, and Time*, Minnesota Studies in the Philosophy of Science, Vol. 3, University of Minnesota Press, Minneapolis, pp. 3–27
- McMullin, E. (1985): Galilean Idealization, *Studies in History and Philosophy of Science* 16, 247–273
- Mehra, J., and Rechenberg, H. (1982): *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer, New York, Heidelberg, Berlin (1982 ff.)
- Meixner, U., and Newen, A. (Eds.) (2004): *Schwerpunkt: Geschichte der Naturphilosophie*, Band 7 von: *Philosophiegeschichte und logische Analyse*, Mentis Verlag, Paderborn
- Messiah, A. (1964): *Mécanique quantique*, Vol. 2, Dunod, Paris. Engl. transl.: North Holland, Amsterdam (7th edn. 1973)
- Messiah, A. (1969): *Mécanique quantique*, Vol. 1, Dunod, Paris. Engl. transl.: North Holland, Amsterdam (7th edn. 1973)
- Meyer-Abich, K.M. (1965): *Korrespondenz, Individualität und Komplementarität*, Steiner, Wiesbaden
- Mill, J.St. (1872): *A System of Logic, Ratiocinative and Inductive, Being a Connected View of the Principles of Evidence and the Methods of Scientific Investigation*, Parker, London (reprint of 2nd edn.)
- Millikan, R.A. (1911): The isolation of an ion, a precision measurement of its charge, and the correction of Stokes's law, *Phys. Rev.* 32, 349–397. Partly reprinted in: Shamos (1959) pp. 238–249
- Millikan, R.A. (1917): *The Electron*, University of Chicago Press, Chicago
- Mittelstaedt, P. (1972): *Philosophische Probleme der modernen Physik*, 4th edn., Bibliographisches Institut, Mannheim
- Mittelstaedt, P. (1986): *Sprache und Realität in der modernen Physik*, Bibliographisches Institut, Mannheim
- Mittelstaedt, P. (1995): Die wechselseitigen Beziehungen zwischen der Quantentheorie und ihrer Interpretation. In: L. Krüger and B. Falkenburg (Eds.): *Physik, Philosophie und die Einheit der Wissenschaften*, Spektrum, Heidelberg, pp. 97–117
- Mittelstaedt, P. (1997a): Is quantum mechanics a probabilistic theory? In: R.S. Cohen et al. (Eds.): *Potentiality, Entanglement and Passion-at-a-Distance*, Kluwer, Dordrecht, pp. 159–175
- Mittelstaedt, P. (1997b): The emergence of statistical laws in quantum mechanics. In: M. Ferrero and A. van der Merwe (Eds.): *New Developments on Fundamental Problems in Quantum Physics*, Kluwer, Dordrecht, pp. 265–274
- Mittelstaedt, P. (1998a): *The Interpretation of Quantum Mechanics and the Measurement Process*, Cambridge University Press, Cambridge
- Mittelstaedt, P. (1998b): The constitution of objects in Kant's philosophy and in modern physics. In: E. Castellani (Ed.): *Interpreting Bodies. Classical and Quantum Objects in Modern Physics*, Princeton University Press, Princeton, pp. 168–180
- Mittelstaedt, P. (1999): Individualistic versus statistical interpretation of quantum mechanics. In: M.L. Dalla Chiara et al. (Eds.): *Language, Quantum, Music*, Kluwer, Dordrecht, pp. 231–239

- Mittelstaedt, P. (2001): What if quantum mechanics is universally valid? In: E. Agazzi and J. Faye (Eds.): *The Problem of the Unity of Science* World Scientific, Singapore, pp. 177-188
- Mittelstaedt, P. (2004): Interpretationsprobleme der Quantenmechanik, *Phil. Nat.* 42/2, 227-256
- Mittelstaedt, P. (2006): The intuitiveness and truth of modern physics. In: Carson and Huber (2006) pp. 251-266
- Mittelstaedt, P., Prieur, A., and Schieder, R. (1987): Unsharp particle wave duality in a photon split-beam experiment, *Found. Phys.* 17, 891-903
- Mittelstaedt, P., and Weingartner, P. (2005): *Laws of Nature*, Springer, Berlin
- Møller, Ch. (1931): Über den Stoß zweier Teilchen unter Berücksichtigung der Retardation der Kräfte, *Z. Physik* 70, 786-795
- Morgan, M., and Morrison, M. (Eds.) (1999): *Models as Mediators. Perspectives on Natural and Social Science*, Cambridge University Press, Cambridge
- Mott, N.F. (1929): The wave mechanics of α -rays, *Proc. Roy. Soc. A* 126, 79-84. Repr. in: Wheeler and Zurek (1983)
- Mott, N.F., and Massey, H.S. (1965): *The Theory of Atomic Collisions*, Clarendon Press, Oxford
- Murdoch, D. (1981): *Niels Bohr's Philosophy of Physics*, Cambridge University Press, Cambridge
- Nachtmann, O. (1990): *Elementary Particle Physics. Concepts and Phenomena*, Springer, Berlin
- Nagel, E. (1931): Measurement, *Erkenntnis* 2, 313-333
- Nagel, E. (1961): *The Structure of Science. Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Routledge & Kegan Paul, London
- Narens, L. (1985): *Abstract Measurement Theory*, MIT Press, Cambridge (Mass.)
- Natorp, P. (1910): *Die logischen Grundlagen der exakten Wissenschaften*, 2nd edn., B.G. Teubner, Leipzig, Berlin
- Nersessian, N.J. (1987): *The Process of Science*, Reidel, Dordrecht
- Newton, I. (1687): *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, Londinum. Quoted from the new Engl. transl.: *The Principia. Mathematical Principles of Natural Philosophy*, translated by I. Bernard Cohen and Anne Whitman with the assistance of Julia Budenz. University of California Press, Berkeley, London (1999)
- Newton, I. (1704): *Opticks. Or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light. Also two Treatises of the Species and Magnitude of Curvilinear Figures*, London (1st edn.)
- Newton, I. (1729): *Principia. Mathematical Principles of Natural Philosophie and his System of the World*. Translated into English by A. Motte. To which are added the Laws of the Moon's motion, according to gravity, by J. Machin. The preface of Mr. R. Cotes to the second edition, etc., London. Repr.: The translations revised, and supplied with an historical and explanatory appendix by F. Cajori, University of California Press, Los Angeles (1934)
- Newton, I. (1730): *Opticks*, London (4th edn.). Reprint with a Preface by I.B. Cohen, Dover, New York (1979)
- Pais, A. (1986): *Inward Bound*, Clarendon Press, Oxford
- Panofsky, W.K.H. (1968): Rapporteur talk. In: J. Prentki and J. Steinberger (Eds.): *Proc. of the Fourteenth Int. Conf. on High-Energy Physics*, Vienna 1988. Genf: CERN, 23-39

- Papineau, D. (Ed.) (1996): *The Philosophy of Science*, Oxford University Press, Oxford
- Particle Data Group (2004): *Particle Physics Booklet*, extracted from: S. Eidelman et al.: Review of Particle Physics, Physics Letters B 592
- Peres, A. (1993): *Quantum Theory: Concepts and Methods*, Kluwer, Dordrecht
- Peres, A., and Zurek, W.H. (1982): Is quantum theory universally valid? *Am. J. Phys.* 50, 807-810
- Perkins, D.H. (1987): *Introduction to High Energy Physics*, 3rd edn., Addison-Wesley, Menlo Park (Calif.)
- Perkins, D.H. (1989): Cosmic-ray work with emulsions in the 1940s and 1950s. In: Brown et al. (1989) pp. 89-108
- Perkins, D.H. (2000): *Introduction to High Energy Physics*, 4th edn., Addison-Wesley, Menlo Park (Calif.)
- Perkins, D.H. (2003): *Particle Astrophysics*, Oxford University Press
- Pfeegor, R.L., and Mandel, L. (1967): Interference of independent photon beams, *Physical Review* 159, 1084-1088
- Pickering, A. (1984): *Constructing Quarks*, Edinburgh University Press, Edinburgh
- Pinsker, Z.G. (1953): *Electron Diffraction*, Butterworth, London
- Planck, M. (1901): Über das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum, *Ann. Phys.* 4, 553-563
- Planck, M. (1908): Die Einheit des physikalischen Weltbildes. In: Planck (1965) pp. 28-51
- Planck, M. (1965): *Vorträge und Erinnerungen*, 9th edn., Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt
- Poser, H. (1981): Gottfried Wilhelm Leibniz. In: O. Höffe (Ed.): *Klassiker der Philosophie I*, Beck, München
- Povh, B., Rith, K., Scholz, C., and Zetsche, F. (1999): *Particles and Nuclei. An Introduction to the Physical Concepts*, Springer, Berlin, London
- Powell, C.F., Fowler, P.H., and Perkins, D.H. (1959): *The Study of Elementary Particles by the Photographic Method. An Account of the Principal Techniques and Discoveries Illustrated by an Atlas of Photomicrographs*, Pergamon Press, London
- Pringe, H. (2006): Critic of the quantum power of judgement, Dissertation (University of Dortmund)
- Psillos, St. (1999): *Scientific Realism. How Science Tracks Truth*, Routledge, London
- Putnam, H. (1975): What is mathematical truth? In: *Mathematics, Matters and Methods. Philosophical Papers*, Vol. I, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 60-78
- Putnam, H. (1980): Models and reality, *Journal of Symbolic Logic* 45.3, 464-482. Repr. in: *Realism and Reason. Philosophical Papers*, Vol. III, Cambridge University Press, Cambridge (1983) pp. 1-25
- Putnam, H. (1990): *Realism with a Human Face*, ed. by James Conant, Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Quine, W.V.O. (1951): Two dogmas of empiricism. In: Quine (1953) pp. 20-46
- Quine, W.V.O. (1953): *From a Logical Point of View*, Harvard University Press, Harvard
- Quine, W.V.O. (1969): *Ontological Relativity and Other Essays*, Columbia University Press, New York and London

- Raether, H. (1957): Elektroneninterferenzen. In: *Handbuch der Physik*, Bd. 32, 443
- Ramsay F.P. (1929): Theories. In: R.B. Braithwaite (Ed.): *The Foundations of Mathematics*, Kegan Paul, London (1931) pp. 212–236
- Redhead, M. (1983): Quantum field theory for philosophers. In: P.D. Asquith and T. Nickles (Eds.), *PSA* 2, pp. 57–99
- Redhead, M. (1987): *Incompleteness, Nonlocality and Realism: A Prolegomenon to the Philosophy of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, Oxford
- Redhead, M. (1988): A philosopher looks at quantum field theory. In: Brown and Harré (1988) pp. 9–23
- Reichenbach, H. (1957): *The Philosophy of Space and Time* (Philosophie der Raum-Zeit-Lehre), translated by M. Reichenbach and J. Freund, Dover Publications, New York
- Reicher N. (1955): Axioms for the part relation, *Phil. Stud.* 6, 8–11
- Riordan, M. (1987): *The Hunting of the Quark*, Simon & Schuster, New York
- Robertson, H.P. (1929): The uncertainty principle, *Phys. Rev.* 34, 163–164
- Rosenbluth, M.N. (1950): High energy elastic scattering of electrons on protons, *Phys. Rev.* 79, 615–619
- Rossi, B. (1952): *High-Energy Particles*, Prentice Hall, New York
- Rossi, B. (1983): The decay of “mesotrons” (1939–1943). Experimental particle physics in the age of innocence. In: Brown and Hoddeson (1983) pp. 183–205
- Rutherford, E. (1911): The scattering of α and β particles by matter and the structure of the atom, *Philo. Mag.* 21, 669–688
- Rutherford, E., Chadwick, J., and Ellis, C.D. (1930): *Radiations from Radioactive Substances*, Cambridge University Press, Cambridge. Repr.: Cambridge University Press, Cambridge (1951)
- Sachs, R.G., and Wali, K.C. (1989): Comments on electromagnetic form factors of the nucleon. In: Brown et al. (1989) pp. 144–146
- Scheibe, E. (1973): *The Logical Analysis of Quantum Mechanics*, Pergamon Press, Oxford
- Scheibe, E. (1997a): Mißverständene Naturwissenschaft. In: *Wissenschaft und Aufklärung*, Montagsvorträge der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, ed. by R. Enakat, Leake and Budrich, Opladen, pp. 9–29
- Scheibe, E. (1997b): *Die Reduktion physikalischer Theorien*. Teil I: *Grundlagen und elementare Theorie*, Springer, Berlin
- Scheibe, E. (1999): *Die Reduktion physikalischer Theorien*. Teil II: *Inkommensurabilität und Grenzfallreduktion*, Springer, Berlin
- Scheibe, E. (2001): *Between Rationalism and Empiricism. Selected Papers in Philosophy of Physics*, ed. by B. Falkenburg, Springer, New York
- Schilpp, P.A. (Ed.) (1949): *Albert Einstein: Philosopher – Scientist*, Library of Living Philosophers, Evanston, Illinois
- Schmidt, H.-J. (1993): A definition of mass in Newton–Lagrange mechanics, *Phil. Nat.* 30, 189–207
- Schrödinger, E. (1927): Über den Comptoneffekt, *Annalen der Physik* 82, 257–264
- Schweber, S.S. (1994): *QED and the Men Who Made It. Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), Chichester (1994)
- Sully, M.O., and Drihl, K. (1982): Quantum eraser: A proposed photon correlation experiment concerning observation and “delayed choice” in quantum mechanics, *Phys. Rev. A* 25, 2208–2213

- Scully, M.O., and Walther, H. (1989): Quantum optical test of observation and complementarity in quantum mechanics, *Phys. Rev. A* **39**, 5229–5236
- Scully, M.O., Englert, B.-G., and Schwinger, J. (1989): Spin coherence and Humpty-Dumpty. III. The effects of observation, *Phys. Rev. A* **40**, 1775–1784
- Scully, M.O., Englert, B.-G., and Walther, H. (1991): Quantum optical tests of complementarity, *Nature* **351**, 111–116
- Seibt, J. (2002): Quanta, tropes, and processes: On ontologies for QFT beyond the myth of substance. In: Kuhlmann et al. (2002) pp. 53–93
- Shamos, M.H. (Ed.) (1959): *Great Experiments in Physics*, Henry Holt & Co, New York
- Shapere, D. (1982): The concept of observation in science and philosophy, *Phil. of Sci.* **49**, 485–525
- Shillady, C., and Busch, P. (2006): Complementarity in Mach–Zehnder interferometry. Publication in preparation
- Simons, P. (1987): *Parts. A Study in Ontology*, Clarendon Press, Oxford
- Smart, J.J.C. (1963): *Philosophy and Scientific Realism*, Routledge & Kegan Paul, London
- Sneed, J.D. (1971): *The Logical Structure of Mathematical Physics*, Reidel, Dordrecht
- Sneed, J.D. (1983): Structuralism and scientific realism, *Erkenntnis* **19**, 345–370
- Stegmüller, W. (1970): *Probleme und Resultate der Wissenschaftstheorie und Analytischen Philosophie*, Vol. 2: *Theorie und Erfahrung*, Springer, Berlin, Heidelberg, New York
- Stöckler, M. (1984): *Philosophische Probleme der relativistischen Quantenmechanik*, Duncker & Humblot, Berlin
- Stoney, G.J. (1891): On the cause of double lines and of equidistant satellites in the spectra of gases, *Scientific Transactions of the Royal Dublin Society* **4**, 563–608
- Storey, E.P., Tan, S.M., Collet, M.J., and Walls, D.F. (1994): Path detection and the uncertainty principle, *Nature* **367**, 626–628
- Storey, E.P., Tan, S.M., Collet, M.J., and Walls, D.F. (1995): Complementarity and uncertainty, *Nature* **375**, 368
- Streater, R.F. (1988): Why should anyone want to axiomatize quantum field theory? In: Brown and Harré (1988) pp. 137–148
- Streater, R.F., and Wightman, A.S. (1964): *PCT, Spin and Statistics, and All That*, Benjamin, New York
- Suppes, P. (1962): Models of data. In: E. Nagel, P. Suppes, and A. Tarski (Eds.): *Logic, Methodology and Philosophy of Science*, Proceedings of the 1960 International Congress, Stanford University Press, Stanford 252–261
- Suppes, P. (1969): *Studies in the Methodology and Foundations of Science*, Reidel, Dordrecht
- Suppes, P. (1980): Article “Messung” in: J. Speck (Ed.): *Handbuch wissenschaftstheoretischer Begriffe*, Vol. 2., Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen
- Swoyer, C. (1987): The metaphysics of measurement. In: Forge (1987) pp. 235–290
- Taraki, A. (1956): *Logic, Semantics, Metamathematics. Papers from 1929 to 1938*, translated by J.H. Woodger, Clarendon Press, Oxford
- Teller, P. (1995): *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory*, Princeton University Press, Princeton (N.J.)
- Tetens, H. (1987): *Experimentelle Erfahrung*, Meiner, Hamburg
- Tetens, H. (1994): *Geist, Gehirn, Maschine: Philosophische Versuche über ihren Zusammenhang*, Reclam Verlag, Stuttgart

- Thomson, J.J. (1897): Cathode rays, *Phil. Mag.* **44**, 293–316
- Thomson, J.J. (1899): On the masses of the ions in gases at low pressures, *Phil. Mag.* **48**, 547–567
- Townsend, J.S. (1897): On electricity in gases and the formation of clouds in charged gases, *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **9**, 244–258
- Trigg, G.L. (1971): *Crucial Experiments in Modern Physics*, Crane Russak & Co, New York
- van Fraassen, B.C. (1980): *The Scientific Image*, Clarendon Press, Oxford
- van Fraassen, B.C. (1987): The semantic approach to scientific theories. In: Nersessian (1987) pp. 105–124
- van Fraassen, B.C. (1991): *Quantum Mechanics. An Empiricist View*, Clarendon Press, Oxford
- von Neumann, J. (1932): *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer, Berlin. Engl. transl. by R. Beyer: *Mathematical Foundation of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, Princeton (1955)
- von Weizsäcker, C.F. (1971): *Die Einheit der Natur*, Hanser, München, Wien
- von Weizsäcker, C.F. (1985): *Der Aufbau der Physik*, Hanser, München, Wien
- von Wright, G.H. (1971): *Explanation and Understanding*, Cornell University Press, Ithaca
- Walborn, St.P., Terra Cunha, M.O., Pádua, S., and Monken, C.H. (2003): Quantum erasure, *American Scientist* **91**, 336–343
- Walls, D.F., and Milburn, G.J. (1994): *Quantum Optics*, Springer, Berlin
- Weingard, R. (1988): Virtual particles and the interpretation of quantum field theory. In: Brown and Harré (1988) pp. 43–59
- Wheaton, B.R. (1983): *The Tiger and the Shark*, Cambridge University Press, Cambridge
- Wheeler, J.A. (1979–1981): Law without law. In: Wheeler and Zurek (1983) pp. 182–213
- Wheeler, J.A., and Feynman, R.P. (1945): Interaction with the absorber as the mechanism of radiation, *Rev. Mod. Phys.* **17**, 157–181
- Wheeler, J.A., and Zurek, W.H. (1983): *Quantum Theory and Measurement*, Princeton University Press, Princeton (N.J.), Guildford
- Wigner, E.P. (1939): On unitary representations of the inhomogeneous Lorentz group, *Annals of Mathematics* **40**, 149–204
- Wigner, E.P. (1964): Symmetry and conservation laws, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA* **51**, 956–965. Repr. in: *Philosophical Reflections and Syntheses*, Springer, Heidelberg (1997) pp. 297–333
- Wigner, E.P. (1967): *Symmetries and Reflections*, Indiana University Press, Bloomington. Repr.: Woodbridge, Connecticut (1979)
- Wind, E. (1934): *Das Experiment und die Metaphysik. Zur Auflösung der kosmologischen Antinomien*, Mohr, Tübingen. Repr. ed. by B. Buschendorf and introduced by B. Falkenburg, Suhrkamp Verlag, Frankfurt am Main (2001). Engl. transl.: *Experiment and Metaphysics. Towards a Resolution of the Cosmological Antinomies*, transl. by C. Edwards and introduced by M. Rampley, European Humanities Research Centre, University of Oxford, Oxford (2001)
- Wiseman, H., and Harrison, F. (1995): Uncertainty over complementarity? *Nature* **377**, 584
- Wooters, W.K., and Zurek, W.H. (1979): Complementarity in the double-slit experiment: Quantum nonseparability and a quantitative statement of Bohr's principle, *Phys. Rev. D* **19**, 473–484

- Worrall, J. (1989): Structural realism: The best of both worlds? *Dialectica* **43**, 99–124. Repr. in: Papineau (1996) pp. 139–165
- Wu, Ch.-Sh. (1957): Experimental test of parity conservation in beta decay, *Phys. Rev.* **105**, 1413–1415
- Zajonc, A.G. (1983): Proposed quantum-beats, quantum-eraser experiment. In: Mandel, L., and Wolf, E. (Eds.): *Coherence and quantum optics V: Proceedings of the Fifth Rochester Conference on Coherence and Quantum Optics*, held at the University of Rochester, June 13–15, 1983, Plenum Press, New York (1984) pp. 323–329
- Zou, X.Y., Wang, L.J., and Mandel, L. (1991): Induced coherence and indistinguishability in optical interference, *Phys. Rev. Lett.* **67**, 318–321

معجم إنجليزي - عربي

Action-at-a-distance	الفعل عن بُعد
Agnostic	لا أدري
Amplitude of the pendulum	سعة البندول
A posteriori	البعدي
A priori	القبلي
Categories	للمقولات
Causal realism	الواقعية العلية
Cloud chamber	الغرفة السحابية
Constructive empiricism	التجريبية البنائية
Copenhagen interpretation	تفسير كوبنهاجن
Correlation	ترابط
Correspondence	التناظر
Counterfactual	مفارقة للواقع
Critical realism	الواقعية النقدية
Detection	الرصد / الكشف
Electron gun	قاذف الإلكترون

Empiricism	التجريبية
Epicycle	فلك التدوير
Expert's dilemma	معضلة الخبير
Form factor	مُعامل الشكل
Geiger counter	عداد جيجر
Global Realism	الواقعية الشاملة
Group theoretical particle concept (GT)	مجموعة المفهوم النظري للجسيم
Hilbert space	فراغ هيلبرت
Idealization	الأمثلة/ المعالجة المثالية
Incommensurability	لا مقياسية (غير قابلة للقياس)
Instrumentalism	الأداتية
Isospin	اللف التماثلي
Joint product	المنتجات المتزامنة
Lie Groups	مجموعات "لاي"
Mereology	ميرولوجي
Moderate empiricism	التجريبية المعتدلة
Monads	المونادات
Neutral weak currents	التيارات الضعيفة المتعادلة

Non sequitur	استدلال غير لازم منطقيًا
Orthogonal	مُتعامد
Parity	ندية
Pauli's exclusion principle	مبدأ باولي للاستبعاد
Perpendicular	عمودي
Phlogiston	اللاهوب (الفلوجستون)
Potential	الجهد (القوة الدافعة الكهربائية معبرًا عنها بالفولتات)
Primary qualities	الكيفيات الأولية
Principle of complementarity	مبدأ التتام
Principle of energy conservation	مبدأ حفظ الطاقة
Quantum computer	الكمبيوتر الكمي
Quantum eraser	الممحاة الكمية
Refraction coefficient of light rays	معامل انعطاف أشعة الضوء
Regularized	مُطردة
Reliability condition	شرط الجدارة بالثقة
Reproducible	قابل للتكرار
Scientific realism	الواقعية العلمية

Space-time	الزمان
Spin	اللف
Strict empiricism	التجريبية الصارمة
Superstring theory	نظرية الأوتار الفائقة
Symbiosis	تكافل/ تعايش (أحياء)
Theory-laden	محملة بالنظرية
Thought experiments	التجارب الذهنية (الفكرية)
Work	الشغل

معجم عربي - إنجليزي

Instrumentalism	الأداتية
Non sequitur	استدلال غير لازم منطقيًا
A posteriori	البعدي
Empiricism	التجريبية
Constructive empiricism	التجريبية البنائية
Thought experiments	التجارب الذهنية (الفكرية)
Strict empiricism	التجريبية الصارمة

Moderate empiricism	التجريبية المعتدلة
Copenhagen interpretation	تفسير كوبنهاجن
Symbiosis	تكافل/ تعايش (أحياء)
Correspondence	التناظر
Correlation	ترابط
Idealization	الأمثلة/ المعالجة المثالية
Neutral weak currents	التيارات الضعيفة المتعادلة
Potential	الجهود (القوة الدافعة الكهربائية معبراً عنها بالفولتات)
Detection	الرصد/ الكشف
Space-time	الزمكان
Amplitude of the pendulum	سعة البندول
Reliability condition	شرط الجدارة بالثقة
Work	الشغل
Geiger counter	عداد جيجر
Perpendicular	عمودي
Cloud chamber	الغرفة السحابية
Hilbert space	فراغ هيلبرت

Action-at-a-distance	الفعل عن بُعد
Epicycle	فلك التدوير
Reproducible	قابل للتكرار
Electron gun	قاذف الإلكترون
A priori	القبلي
Quantum computer	الكمبيوتر الكمي
Primary qualities	الكيفيات الأولية
Agnostic	لا أدري
Incommensurability	لا مقياسية (غير قابلة للقياس)
Phlogiston	اللاهوب (الفلوجستون)
Spin	اللف
Isospin	اللف التماثلي
Quantum eraser	الممحاة الكمية
Pauli's exclusion principle	مبدأ باولي للاستبعاد
Principle of energy conservation	مبدأ حفظ الطاقة
Principle of complementarity	مبدأ التتام
Orthogonal	مُتعامد
Lie groups	مجموعات "لاي"

Group theoretical particle concept (GT)	مجموعة المفهوم النظري للجسيم
Theory-laden	محملة بالنظرية
Regularized	مُطَرَدَة
Refraction coefficient of light rays	مُعَامِل انعطاف أشعة الضوء
Form factor	مُعَامِل الشكل
Expert's dilemma	معضلة الخبير
Counterfactual	مفارقة للواقع
Categories	المقولات
Joint product	المنتجات المترامنة
Monads	المونادات
Mereology	ميريولوجي
Parity	ندية
Superstring theory	نظرية الأوتار الفائقة
Global realism	الواقعية الشاملة
Scientific realism	الواقعية العلمية
Causal realism	الواقعية العلية
Critical realism	الواقعية النقدية

بريجيته فالكينبورج

درست الفيزياء في إرلانين، بيرين وهايدلبرج، والفلسفة في بايفيلد. حصلت على منحة دكتوراه في عام ١٩٨٥، ثم درجة الدكتوراه في فيزياء الجسيمات التجريبية في العام التالي. أصبحت منذ عام ١٩٩٧ أستاذًا متفرغًا للفلسفة النظرية وفلسفة العلم والتقنية في جامعة نورتموند. وهي عضو في "الأكاديمية الدولية لفلسفة العلوم" ببروكسل، و"الأكاديمية الأوروبية للعلم"، ومتحدثة للمجموعة العاملة بفلسفة الفيزياء للجمعية الفيزيائية العلمية. حصلت على جوائز عن عملها في مجال فلسفة العلم، كما نشرت العديد من الكتب والأبحاث عن جوانب متعددة في الفيزياء والميتافيزيقا.

المترجمان في سطور:

نبيل ياسين البكري

أستاذ غير متفرغ بقسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة حلوان. حصل على البكالوريوس والماجستير والدكتوراه من كلية العلوم جامعة القاهرة. تدرج في العمل الوظيفي والإداري بدءاً من: فيزيائي بالمعهد القومي لبحوث الأورام - جامعة القاهرة، ثم مدرس مساعد وصولاً إلى أستاذ بقسم الفيزياء بكلية العلوم بالفيوم - جامعة القاهرة فرئيس لمجلس قسم الفيزياء بالكلية فوكيل للكلية، ثم عميد لكلية العلوم جامعة الفيوم لفترتين.

أنشطة علمية متنوعة:

- ١- عضو لجنة ترقية الفيزياء للأساتذة والأساتذة المساعدين بهيئة الطاقة الذرية لدورتين في الفترة ٢٠٠٨ - حتى الآن.
- ٢- خبير بمجمع اللغة العربية من ٢٠١٢ حتى الآن.
- ٣- أمين الجمعية الفيزيائية المصرية ٢٠٠٢ حتى الآن.
- ٤- عضو مجلس إدارة مركز البحوث النووية بهيئة الطاقة الذرية ٢٠٠٨ حتى الآن.
- ٥- رئيس شعبة الفيزياء والرياضيات والفلك بنقابة المعلمين العامة من ١٩٩٣ في فترات منقطعة تخللها سفر للخارج حتى أكتوبر ٢٠١٠.

- ٦- رئيس نقابة المهن العلمية بالفيوم من أكتوبر ٢٠١١ ، ثم وكيل أول لنقابة العلميين بمصر حتى الآن..
- ٧- له أكثر من ٥٠ بحثاً في مجال فيزياء الطاقة العالية إضافة إلى بعض الأبحاث في مجال الفيزياء الفلكية وطاقة الرياح، وأشرف على العديد من رسائل الماجستير والدكتوراه.
- ٨- شارك في العديد من الكتب المؤلفة باللغة العربية (٥) في الفيزياء النووية وفيزياء العلوم الأساسية والنسبية وقوى الطبيعة وميكانيكا الكم والفيزياء العملية وتجارب المحاكاة، منشورة بدار الفكر العربي من ٢٠٠١ حتى ٢٠٠٩.
- ٩- شارك في مؤتمرات دولية عديدة بالداخل والخارج "سويسرا وألمانيا وإيطاليا" وساهم في التحكيم الدولي للبحوث العلمية.
- ١٠- أمين عام المؤتمر القومي الأول لعلوم الفيزياء والرياضيات عام ١٩٩٥. ثم أمين عام المؤتمر الدولي للفيزياء النووية المنعقد بالفيوم عام ٢٠٠٣.
- ١١- قام بالتدريس والانتداب بالعديد من الجامعات بمصر والسعودية.
- ١٢- مدير مشروع التطوير المستمر للجودة والاعتماد (CIQAP) في الفترة من ٢٠٠٩-٢٠١٠ ومدير مشروع الحزم الإلكترونية التابع لمشروع تطوير التعليم العالي بكلية العلوم جامعة الفيوم ٢٠٠٧/٢٠٠٨، ومشروع توكيد الجودة والاعتماد (QAAP) في الفترة من ٢٠٠٦-٢٠٠٩ بكلية علوم الفيوم.
- ١٣- ساهم في إعداد وتنفيذ جانب من خطة تنمية محافظة الفيوم عام ٢٠٠٩.
- ١٤- كتابة العديد من المقالات العلمية والبيئية في عدة صحف وفي مجلة "العلميون".

أحمد حمدي مصطفى

- حصل على المركز الثاني في مسابقة القصة القصيرة على مستوى جامعة القاهرة ٢٠٠٣.
- حصل على درجة الليسانس في الآداب من جامعة القاهرة - قسم الفلسفة - بتقدير عام جيد ٢٠٠٤.
- حصل على دبلومة إدارة الموارد البشرية من الجامعة الأمريكية بالقاهرة ٢٠٠٨.
- حصل على درجة الماجستير في فلسفة العلوم من جامعة القاهرة في موضوع "المنهج العلمي عند وليم ويول" ٢٠١٠ ، بتقدير ممتاز مع التوصية بالطبع والتداول. بإشراف أ.د. يمنى طريف الخولي.
- حصل على جائزة الدكتور زكي نجيب محمود ٢٠١١ عن رسالته لنيل درجة الماجستير.
- حصل على دبلومة الترجمة الفورية من الجامعة الأمريكية بالقاهرة ٢٠١٤.
- قام بترجمة كتاب "اللبات الأساسية للطبيعة البشرية" للمركز القومي للترجمة (تحت الطبع).
- قام بنشر عدد من المقالات في الصحف المصرية.

التصحيح اللغوي: نعيمة عاشور

المشرف الفني: حسن كامل



الميتافيزيقا لغة هي ما بعد الطبيعة، وهي في التقليد الفلسفي الموعغل في تاريخ الفكر الإنساني البحث عن العلل الأولى، أو البحث في الموجود بما هو موجود. أما اليوم فالميتافيزيقا مصطلح جامع لأي بحث يثير التساؤلات حول واقعية ما لا يمكن التعامل معه بالمنهج العلمي.

أما الجسيمات فهي جسيمات مادون الذرة، إذ يعرف فيزيائيو الجسيمات اليوم أن هناك مجموعتان من هذه الجسيمات التي تُبنى منها المادة، وهما الكواركات واللبتونات. يندرج تحت كل مجموعة من هاتين المجموعتين ستة أنواع؛ فبالنسبة للكواركات هناك: الأسفل والأعلى والغريب والفتنة والقاع والقمة، أما في مجموعة اللبتونات فهناك: الإلكترون ونيوترينو الإلكترون والميون ونيوترينو الميون والتاو ونيوترينو التاو. والسؤال الآن إذا كان العلم قد قطع خطوات واسعة نحو تفكيك بنية المادة والنفاذ إلى جسيماتها الدقيقة، فماذا نحن فاعلون إذا بالميتافيزيقا؟!



مكتبة
الفكر الجديد

01-06-2018