

ويكيبيديا معادلة شرودنجر

معادلة شرودنجر

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \hat{H} \Psi(\mathbf{r}, t)$$

الصيغة

إرفين شرودنجر

سميت
بأسم

تعديل



مقدمة ميكانيكا الكم

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

مبدأ الريبة

المقدمة · الصياغة الرياضية

خلفية

ميكانيكا كلاسيكية
النظرية الكمومية القديمة
تداخل · ترميز برا-كيت
هاملتوني

مصطلحات أساسية

حالة كمومية · دالة الموجة
تراكب · تشابك

القياس · الارتباب أو اللاتحديد

الاستبعاد · المثنوية

Decoherence · مبرهنة إبهرينفست · عبور

النفق

تجارب

تجربة الشق المزدوج
تجربة دافيسون-غيرمر
تجربة شتين-غيرلاش
تجربة لامساواة بل
تجربة بوبر
قطة شرودنجر
Elitzur-Vaidman bomb-tester
ماحي كمومي

معادلات

معادلة شرودنجر
معادلة باولي
معادلة كلاين-غوردون
معادلة ديراك
معادلة رايبيرغ

تفسيرات

تفسير كوبنهاغن · تفسير إحصائي
نظرية المتغير الخفي · Transactional
تفسير العوالم · Consistent histories
Relational · منطق كمومي

مواضيع متقدمة

نظرية الحقل الكمومي
ثقالة كمومية
نظرية كل شيء

علماء

بلانك · أينشتاين · بور · سومرفيلد · بوز · ريس

في ميكانيكا الكم، **معادلة شرودنجر** عبارة عن معادلة تفاضلية جزئية تصف كيفية تغير الحالة الكمية لنظام فيزيائي مع الزمن، وقد صاغها عالم الفيزياء النمساوي إرفين شرودنجر في أواخر عام 1925 ونشرها عام 1926^[1]. تصف هذه المعادلة حالات النظم الكمومية المعتمدة على الزمن. وتحتل هذه المعادلة أهمية خاصة في ميكانيكا الكم حيث تعتبر بمثابة قانون التحريك الثاني لنيوتن الذي يعتبر أساسيا في الفيزياء الكلاسيكية.

حسب التعبير الرياضي لميكانيكا الكم، تتراقف كل جملة فيزيائية مع فضاء هيلبرت المركب (المعقد) (وهو عبارة عن فضاء شعاعي) حيث توصف كل حالة لحظية للجملة بشعاع وحدة في هذا الفضاء الشعاعي، وبالتالي يكون شعاع الحالة بمثابة ترميز لاحتمالات النتائج الممكنة من عمليات القياس بكافة أشكالها على هذه الجملة. عندما تتغير هذه الجملة مع الزمن، يصبح شعاع الحالة (دالة زمنية).

محتويات

المعادلات

المعادلة المعتمدة
على الزمن
المعادلة التي لا
تعتمد على الزمن

من أهم النتائج

طاقة الحركة
وطاقة الوضع
والطاقة الكلية
الكمومية
القياسات ومبدأ
عدم التأكد
النفق الكمومي

استنباط حديث لمعادلة

شرودنجر

جوست · كرامرز · هايزنبرج · يورن · جوردان · ياولي ·
ديراك · دي برولي · شرودنجر · فون نيومان · فيجنر ·
فاينمان · كاندلين · ديفيد بوم · إيفيريت · جون بل ·
فيلهام فين

هذا الصندوق: عرض · ناقش · عدل

تفسير الدالة الموجية

الخلفية التاريخية وتطور

معادلة شرودنجر

تفسير ذرة الهيدروجين

انظر أيضا

مراجع

وصلات خارجية

المعادلات

المعادلة المعتمدة على الزمن

فيما يلي معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن (في شكلها العام)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi$$

في هذه المعادلة تعني ψ دالة موجية تصف النظام الكمومي (نظام صغري مثل حجم الذرة) ، و \hbar وحدة تخيلية، و \hat{H} ثابت بلانك المخفض، و \hat{H} معامل هاميلتوني يصف الطاقة الكلية لكل دالة موجية معتبرة وهو يتخذ عدة صور تعتمد على المسألة الفيزيائية المراد حلها.

معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن في حالة جسيم يتحرك حركة توافقية تحت تأثير مجال :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r}, t) \Psi(\mathbf{r}, t)$$

تتكون المعادلة إلى اليمين من جزئين : الجزء الأول: $\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2$ وهو يمثل مؤثر طاقة الحركة للجسيم ، والجزء الثاني $V(\mathbf{r}, t)$ وهو يمثل مؤثر الطاقة الكامنة للجسيم في المجال التوافقي (مثل مجال نواة الذرة). المجال التوافقي موصوف بالدالة $V(\mathbf{r}, t)$ التي تعتمد على الزمن t والمكان \mathbf{r} .

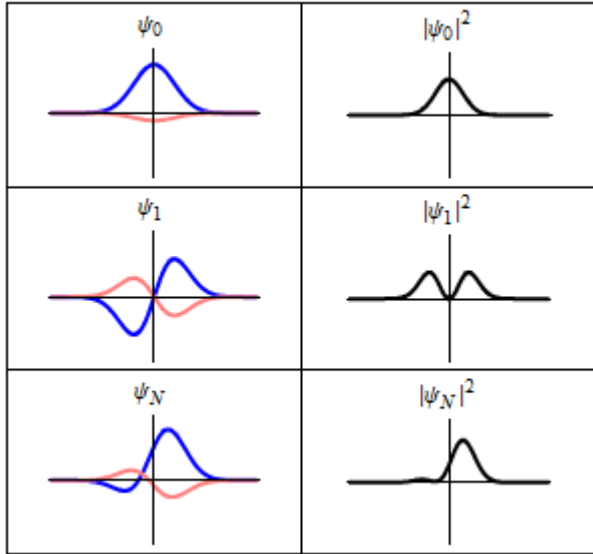
وتتعامل معاملة شرودنجر مع الجسيم (إلكترون مثلا) الذي يتحرك في مجال نواة (مشحونة) على أنه في هيئة دالة موجية :

$$\Psi(\mathbf{r}, t)$$

معتمدة على الزمن t والموقع \mathbf{r} ، حيث يعطي حل المعادلة صفات الجسيم وما يمكن له أن يمتلكه من طاقة.

أي أن معادلة شرودنجر تماثل معادلة هاميلتون التي تعطي الطاقة الكلية لجسيم في هزاز توافقي في الحالة الكلاسيكية (ميكانيكا نيوتن ومعادلات ماكسويل) ، وأما معادلة شرودنجر فهي تعطي الطاقة الكلية للجسيم الذي يتحرك في مجال توافقي كمومي.

لم تنجح معادلة هاميلتون في التعامل مع جسيمات صغرية على المستوى الذري فلم تأتي بحلول صحيحة لحركة الإلكترون في مجال شحنة النواة ، وكان ذلك عند دراسة الطيف الضوئي من الهيدروجين. فكانت الحلول لا تتفق مع القياسات التي نحصل عليها عمليا. ذلك بعكس ميكانيكا الكم والممثلة هنا بمعادلة شرودنجر فقد استطاعت إعطاء الحلول المتفقة مع القياسات العملية وذلك باعتبار أن الجسيم يكون في هيئة موجة مادية وليس جسما ماديا.



تمثل كل من هاتاه الصفوف الثلاثة دالة موجية تحقق معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن لهزاز توافقي كمومي. في اليسار: الجزء الحقيقي (أزرق) والجزء التخيلي (أحمر) للدالة الموجية لجسيم. في اليمين: توزيع احتمال وجود الجسيم الموصوف بتلك الدالة الموجية في مكان معين. الصفان الأول والثاني هما مثالان لحالة مستقرة التي توافق موجات راكدة. الصف الثالث هو مثال لحالة غير مستقرة. العمود في اليمين يوضح لماذا تسمى الحالات المستقرة مستقرة.

هذا هو عالم الذرات وتأثرها ببعضها البعض وهو عالم غريب عن العالم الذي اعتدنا عليه عند التعامل مع أجسام ذات أبعاد كبيرة ككرة الجولف أو كرة البلياردو أو عالم الكواكب والأجرام السماوية. مع تلك الأبعاد الكبيرة تصلح ميكانيكا نيوتن في إعطاء الحلول السليمة لتلك الأنظمة الكبيرة، أما عند التعامل مع عالم الذرات والجسيمات الأولية فلا بد من استخدام معادلات ميكانيكا الكم فهي وحدها (حتى الآن) التي تعطي حلولاً سليمة لتلك الأنظمة الصغيرة.

المعادلة التي لا تعتمد على الزمن

تعتبر معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن أن الدوال الموجية يمكن أن تكون موجات راكدة تسمى " حالات مستقرة " (أي تسمى "أوربيتال" كما هو الحال في حالة مدارات الإلكترونات حول نواة الذرة أو في مدارات الجزيئات، هذه الحالات تلعب دوراً هاماً في التركيب الذري والجزيئي) ، وعلاوة على ذلك تصنف الحالات المستقرة ونفهم ، ويصبح من السهل حل معادلة شرودنجر المعتمدة على الزمن لأي حالة أخرى.

ومعادلة شرودنجر غير المعتمدة على الزمن هي التي تصف الحالات المستقرة. وتستعمل عندما يكون الهاميلتوني نفسه غير معتمداً على الزمن ، وأما تكون معتمدة على المكان فقط .

معادلة شرودنجر غير المعتمدة على الزمن (الحالة العامة)

$$E\Psi = \hat{H}\Psi$$

نقرأ هذه المعادلة هكذا :

" عندما يؤثر معامل هاميلتون على الدالة الموجية ψ فربما تكون النتيجة متناسبة طردياً مع نفس الدالة الموجية ψ ، فإذا كانت كذلك فتكون ψ حالة مستقرة، ويعطي ثابت التناسب E طاقة الحالة ψ . "

وتتميز تلك المعادلة رياضياً بأنها تعطي معادلة قيم ذاتية Eigenvalue Equation عن النظام.

ومن أهم معادلات شرودنجر التي تصف جسيماً يتحرك في مجال كهربائي (وليس في مجال مغناطيسي) هي :

معادلة شرودنجر غير المعتمدة على الزمن ، فهي تعتمد على المكان فقط (لجسيم يوجد في مجال نواة ذرية أو غير ذلك مثلما في حالة جسيم حر ، ولا تأخذ في الإعتبار تأثيرات النظرية النسبية):

$$E\Psi(\mathbf{r}) = \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\mathbf{r}) + V(\mathbf{r})\Psi(\mathbf{r})$$

وقد سبق تعريف عناصر المعادلة أعلاه.

من أهم النتائج

شكلت معادلة شرودنجر ونتائجها فتحاً جديداً في فهم الفيزياء. فقد كانت معادلاته الأولى من نوعها وأوصلت نتائجها العلماء إلى تبعات لم تتوقع من قبل وغير عادية في ذلك الوقت.

طاقة الحركة وطاقة الوضع والطاقة الكلية

يمكن تفسير عناصر معادلة شرودنجر غير النسبية كالآتي:

$$\text{الطاقة الكلية} = (\text{طاقة الحركة}) + (\text{طاقة الوضع})$$

وفي ذلك فهي مشابهة للفيزياء الكلاسيكية. فمثلا تكون الطاقة الكلية للرقاص ثابتة ، وتنخفض سرعته (أي تقل طاقة حركته) عندما يرتفع ويقترب من نقطة العودة في مجال الجاذبية الأرضية ، وبعد بلوغه أعلى نقطة في مساره القوسي يتوقف لحظة ويبدأ العودة في اتجاه نقطة السكون وتتحول طاقة الوضع له إلى طاقة حركية ثانيا. ويكون مجموع طاقته الحركية وطاقة وضعه دائما ثابتا في كل لحظة.

الكمومية

تنتبأ معادلة شرودنجر أنه إذا قمنا بقياس بعض خواص النظام فمن الممكن أن تكون القياسات "كمومية" بمعنى أن النتائج قد تكون قيم منفصلة $discrete\ values$. فعلى سبيل المثال ، "كمومية الطاقة" : تكون طاقة الإلكترون في الذرة دائما أحد الطاقات الكمومية ، وهي ظاهرة اكتشفت عن طريق دراسة مطيافية الذرات. وهناك مثال آخر يتعلق بالزخم الزاوي فهو أيضا يكون كموميا ، أي يمكنه اتخاذ قيم منفصلة. وقد كان ذلك مجرد فكرة في نموذج بور الابتدائي للذرة ، ولكن معادلة شرودنجر تثبتت به.

القياسات ومبدأ عدم التأكد

مقالة مفصلة: مبدأ عدم التأكد

في الميكانيكا الكلاسيكية يكون لجسيم في جميع الأوقات في مكان محدد بدقة وله زخم حركة معينة دقيقة. وتحدد قوانين نيوتن للحركة بكل دقة تلك المواصفات الخاصة بالجسيم أثناء سيرها. أما في ميكانيكا الكم فلا يكون لجسيم مواصفات بالغة الدقة ، وعندما نقوم بقياسها فتكون تلك النتائج موصوفة بتوزيع احتمالي. وتنتبأ معادلة شرودنجر بأن التوزيعات الاحتمالية لا تستطيع التعرف على النتيجة الدقيقة لكل عملية قياس.

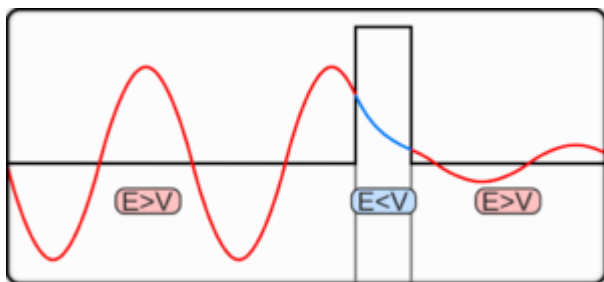
وتمثل مبدأ عدم التأكد الذي صاغه العالم الفيزيائي الألماني هايزنبرج مثلا شهيرا عن عدم التأكد في ميكانيكا الكم. وهذا المبدأ يقول أنه كلما زادت دقة معرفتنا لمكان جسيم فإن معرفتنا بزخم حركته تقل دقتها ، والعكس بالعكس.

وتستطيع معادلة شرودنجر تعيين الدالة الموجية لجسيم بكل دقة ، ولكن حتى معرفة دقيقة للدالة الموجية فإن نتيجة عملية قياس معينة على الدالة الموجية يكون محفوفًا بدرجة من عدم التأكد.

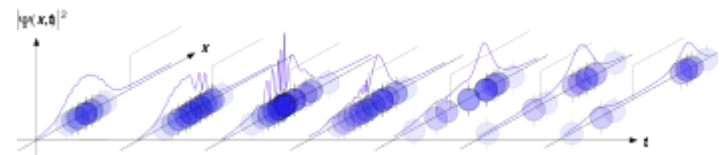
النفق الكمومي

مقالة مفصلة: نفق كمومي

في الفيزياء الكلاسيكية عندما تتدحرج كرة عاليا على جبل تقل سرعتها رويدا رويدا حتى تتوقف ثم تعود متدحرجة ثانيا إلى سفح الجبل ، ذلك لأنها لم تمتلك طاقة كافية لكي تصعد فوق الجبل لتهبط من الناحية الأخرى. أما معادلة شرودنجر فهي تتوقع أنه يوجد احتمال ولو ضعيف أن تنتقل الكرة إلى الناحية الأخرى من الجبل حتى ولو كانت طاقتها الحركية لا تكفي لأن تصل إلى قمة الجبل. وهذا ما يسمى بالنفذية خلال نفق كمومي ، وهذه الظاهرة تنبع من مبدأ عدم التأكد : فمع أن الكرة تبدو وأنها موجودة على ناحية من الجبل إلا أن مكانها فيه ليس أكيدا ، بحيث أنه يوجد احتمال لتواجدها على الناحية الأخرى من الجبل.



التخلل النفقي : إلى اليسار، داخل النواة، وإلى اليمين خارج النواة. طاقة الجسيم المتسرب لا تتغير، والذي يتغير هو مطال الموجة الكمومية له وهو ينقص في الخارج (وبالتالي ينقص احتمال سريان التسرب).



ضبابية موقع الجسيم حيث لا تحدده تماما ميكانيكا الكم.

التغير الزمني لحزمة موجية كما تصفه حل معادلة شرودنجر في حالة نظام جهدي ذو قمة واحدة مبينا شرائح لمحوري المكان x والزمن t (ويبين المحور الثالث المطال ψ وهو يعبر عن احتمال تواجد الجسيم في المكان المذكور). يبدو الجسيم كدوائر زرقاء وكثافتها اللونية تتناسب مع احتمال وجود الجسيم في الموقع المبين. ويمثل الخط النقطي الجهد الجبلي. واحتمال النفذية أكبر من الانعكاس لأن الطاقة الكلية E تزيد عن طاقة الوضع.

استنباط حديث لمعادلة شرودنجر

صاغ شرودنجر عام 1926 معادلته واضعا فيها بعض المبادئ الفيزيائية التي تتكئ عليها بعض الظواهر الكمومية المعروفة في ذلك الوقت. وتعتمد رياضيات معادلة شرودنجر على مبدأ التواصل لدالة هاميلتون التي تعطي الطاقة الكلية :

$$E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + V(\mathbf{r}, t)$$

وبالتعويض عن الطاقة وزخم الحركة والمكان في الميكانيكا الكلاسيكية باستخدام معاملات ميكانيكية كمومية :

$$\begin{aligned} E &\rightarrow \hat{E} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \\ \mathbf{p} &\rightarrow \hat{\mathbf{p}} = -i\hbar \nabla \\ \mathbf{r} &\rightarrow \hat{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \end{aligned}$$

ثم تطبيق الدالة الموجية $\psi = \psi(\mathbf{r}, t)$ ergibt التي كانت معروفة في علم البصريات :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + V\psi$$

بهذا تحولت دالة هاميلتون إلى معامل هاميلتون Hamilton-Operator.

ومن الوجهة التاريخية طبق شرودنجر وصف دي برولي للجسيم الحر ، وقام بتوليف متناظرات بين الفيزياء والموجات الكهرومغناطيسية في هيئة ازدواجية موجة-جسيم وتطبيق الصفات الموجية للجسيمات :

$$\psi(\mathbf{r}, t) = A \exp\left(-\frac{i}{\hbar} (Et - \mathbf{p} \cdot \mathbf{r})\right)$$

حيث A ثابت.

تلك المعادلة الموجية هي عبارة عن أحد حلول معادلة شرودنجر وتحتوي على $V(\mathbf{r}, t) = 0$.

ويبقى مع ذلك التفسير الفيزيائي للدالة الموجية مفتوحا غير واضحا. وفي التفسيرات الإحصائية الجارية على ميكانيكا الكم تعطي مربع القيمة $|\psi|^2$ احتمال وجود الجسيم في موقع معين (وهذا هو تفسير ماكس بورن الألماني).

تفسير الدالة الموجية

تسمح لنا معادلة شرودنجر لحساب الدوال الموجية لنظام وكيف تتغير مع الزمن. ولكن معادلة شرودنجر لا تقول "ما هي" الدالة الموجية بالضبط. وتعنتي تفسيرات ميكانيكا الكم بأسئلة مثل العلاقة بين الدالة الموجية والحقيقة الواقعية ونواتج قياسات التجارب.

وبينما تحسب الميكانيكا التقليدية مسار $\mathbf{r}(t)$ جسيم بدقة يظهر مكان الجسيم في ميكانيكا الكم كقيمة محتملة لدوال توزيع ψ ، تعطيها معادلة شرودنجر. ويوصف الجسيم كحزمة موجية فإذا كان اتساع الحزمة الموجية قصيرا جدا فيمكن تحويل معادلة شرودنجر إلى معادلة نيوتن للحركة. تصاغ الدوال الموجية في معادلة شرودنجر في صورة معاملات طبقا لتصور شرودنجر. وفي تصور هايزنبرج الذي حل مسألة طيف الهيدروجين بميكانيكا الكم فقد صاغ معادلات الحركة مباشرة بدلا من المعاملات. وتسمى طريقة هايزنبرج التي استخدم فيها حساب المصفوفات وتسمى "معادلات هايزنبرج للحركة". وكلا الطريقتين : معادلة شرودنجر أو معادلات الحركة لهايزنبرج متماثلتان من وجهة النتائج. وقد توصل هايزنبرج لطريقته عام 1923 أي قبل توصل شرودنجر لمعادلته التي صاغها عام 1926.

رفض أينشتاين ميكانيكا الكم باعتبارها لا تصف مكان جسيم بدقة مثلما في الميكانيكا الكلاسيكية وتعطي فقط احتمال وجود الجسيم في مكان معين ت. ولكن التوافق بين طريقة هايزنبرج الكمومية ومعادلة شرودنجر والنجاح التي حازته ميكانيكا الكم في تفسير ظواهر طبيعية كثيرة تعجز الميكانيكا الكلاسيكية عن حسابها وتفسيرها ثبتت من مركز ميكانيكا الكم كطريقة يمكن الاعتماد عليها في تفسير الظواهر الطبيعية على المستوى الصغري في عالم الذرات والجزيئات والجسيمات الأولية.

الخلفية التاريخية وتطور معادلة شرودنجر

بعد اكتشاف ماكس بلانك لكمومية الضوء (انظر اشعاع الجسم الأسود) وتفسير أينشتاين بأن تسمية "الكم" $quanta$ الذي استخدمها بلانك هو عبارة عن فوتون أو "جسيم ضوئي" ، واقترح اعتبار أن تكون طاقة الفوتون متناسبة مع تردده ، فكانت تلك الفكرة من أول الافتراضات الخاصة بازدواجية الموجة والجسيم.

ونظرا لكون الطاقة وزخم الحركة ينتسبان إلى التردد والعدد الموجي في النظرية النسبية الخاصة ، فينتج عن ذلك أن زخم الحركة p للفوتون يكون متناسبا طرديا مع عدده الموجي k .

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar k$$

وافترض لويس دي برولي أن هذا ينطبق على جميع الجسيمات ، بما فيها الإلكترون. وبين انه بافتراض أن الموجة المادية تتقدم مزاملة لجسيمها ، فإن الإلكترون يكون موجة راكدة ، بمعنى أنه يحتوي على ترددات زاوية منفصلة فقط حول النواة الذرية وهي التي تكون مسموحة له باتخاذها [2].

تلك المدارات الكمومية في الذرة تنتمي إلى مستويات طاقة منفصلة (أي لها قيم خاصة ذاتية)، واستطاع دي برولي تفسير نموذج بور للبنية الذرية وما تحويه من مستويات للطاقة. وكان نموذج بور معتمدا على التصور الكومومي للزخم الزاوي (أي تكون له قيم خاصة ذاتية) :

$$L = n \frac{h}{2\pi} = n\hbar.$$

وطبقا لـ "دي برولي" يوصف الإلكترون بموجة ذات عدد صحيح من طول الموجة ، وأنه في الذرة لا بد وأن يناسب العدد الموجي محيط مدار الإلكترون:

$$n\lambda = 2\pi r.$$

ولكن هذا الافتراض يحصر موجة الإلكترون في بُعد واحد ويدور في مدار دائري.

وابتداء من تلك الافتراضات علق الفيزيائي بيتر ديبياي بأنه إذا كان الجسيمات تتصرف بخصائص الموجات فلا بد لها أن تفي بنوع من أنواع دالة موجية. ومن ذلك التعليق الذي قدمه "ديبياي" حاول شرودنجر التوصل إلى معادلة موجية في ثلاثة أبعاد تنطبق على الإلكترون. واستعان بما قام به هاميلتون من بيان التناظر بين ميكانيكا الأجسام وخواص الضوء والذي يتمثل في المشاهدة أن الحد الصفري لطول الموجة (أي عندما يصل طول الموجة إلى 0) يعادل حالة نظام في الميكانيكا الكلاسيكية.[3]. وتوصل شرودنجر إلى المعادلة: [4].

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\mathbf{r}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\mathbf{r}, t) + V(\mathbf{r})\Psi(\mathbf{r}, t).$$

تفسير ذرة الهيدروجين

تستخدم معادلة شرودنجر ذات الثلاثة أبعاد في التطبيق على ذرة الهيدروجين: [5][6]

$$E\psi = -\frac{\hbar^2}{2\mu} \nabla^2 \psi - \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \psi$$

حيث :

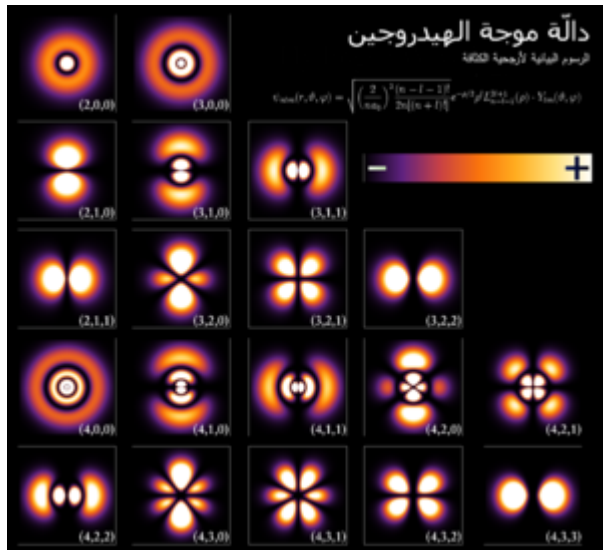
e شحنة الإلكترون،

r بُعد الإلكترون عن النواة ($\mathbf{r} = |\mathbf{r}|$)،

الجزء الممثل للجهد هو الجهد الكهربائي ، وفيه

ϵ_0 السماحية الكهربائية في الفراغ ،

$$\mu = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p}$$



كثافة احتمال وجود الإلكترون في المدارات الأولى لذرة الهيدروجين مبينة كمقاطع مستوية ؟ أحجام المدارات ممثلة هنا بمقاييس رسم مختلفة.

والأخيرة هي الكتلة المخفضة المكونة من نواة الهيدروجين (وهي بروتون واحد) كتلتها m_p وكتلة الإلكترون m_e . ومعنى الإشارة السالبة، أنه يوجد تجاذب بين شحنة النواة الموجبة وشحنة الإلكترون السالبة. ونأخذ الكتلة المخفضة في الاعتبار حيث يتحرك كل من النواة والإلكترون حول مركز الثقل، فهما يكونان نظاماً مكون من جسمين. وحركة الإلكترون هي التي تهمننا حيث كتاته هي الأصغر.

وتشكل الدالة الموجية للهيدروجين هي دالة لموقع الإلكترون ويمكن فصلها إلى ثلاثة دوال في الاتجاهات الثلاث [7] ويتم ذلك للسهولة بتطبيق النظام الإحداثي الكروي:

$$\psi(r, \theta, \phi) = R(r)Y_{\ell}^m(\theta, \phi) = R(r)\Theta(\theta)\Phi(\phi)$$

حيث :

R دوال شعاعية ،

$Y_{\ell}^m(\theta, \phi)$ توافقية كرية من الدرجة ℓ والنوع m .

وتلك هي الذرة الوحيدة التي حلت لها معادلة شرودنجر بدقة. أما بالنسبة إلى الذرات الأخرى المحتوية على أكثر من إلكترون واحد فهي تتطلب طرق تقريبية نابعة من معادلة شرودنجر. مجموعة الحلول هي: [8]

$$\psi_{nlm}(r, \theta, \phi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-\ell-1)!}{2n[(n+\ell)!]^3}} e^{-r/na_0} \left(\frac{2r}{na_0}\right)^{\ell} L_{n-\ell-1}^{2\ell+1}\left(\frac{2r}{na_0}\right) \cdot Y_{\ell}^m(\theta, \phi)$$

حيث:

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0\hbar^2}{m_e e^2} \quad \text{■ نصف قطر بوهر،}$$

$$L_{n-\ell-1}^{2\ell+1}(\dots) \quad \text{■ كثيرة حدود لاجير العامة من الدرجة } n - \ell - 1$$

$$n, \ell, m \quad \text{■ عدد كم رئيسي، عدد كم مداري، وعدد كم مغناطيسي، وهم يتخذون القيم :}$$

$$n = 1, 2, 3 \dots$$

$$\ell = 0, 1, 2 \dots n - 1$$

$$m = -\ell \dots \ell$$

ينطبق هذا الحل تماماً مع قياسات طيف ذرة الهيدروجين، وكان ذلك نجاحاً عظيماً لمعادلة شرودنجر والتي أيدت طريقة ميكانيكا المصفوفات الكمية التي اتبعها هايزنبرج قبله بثلاثة سنوات عام 1923، بذلك أعلنت ميكانيكا الكم مكانتها كواحدة من أعظم النظريات الفيزيائية.

ومن الجدير بالذكر أن خلال السنوات التالية اكتشف بأن الإلكترون يدور حول محوره أي أن له عزم مغزلي، واكتشفت تلك الظاهرة من إنشقاق خطوط الطيف للعناصر، فكان ذلك داعياً لإدخال عدد كم مغزلي وأكتملت الأعداد الكمية الخاصة بذرة الهيدروجين وكذلك لكافة الذرات المعروفة، وأصبحت الأعداد الكمومية كالآتي :

$$1. \text{ عدد كم رئيسي } n$$

$$2. \text{ عدد كم مداري } \ell$$

$$3. \text{ عدد كم مغناطيسي } m_{\ell}$$

$$4. \text{ عدد كم مغزلي } m_s$$

انظر أيضا

- [قطة شرودنجر](#)
- [ازدواجية موجة-جسيم](#)
- [موجة مادية](#)
- [ذرة الهيدروجين](#)
- [جسيم في صندوق](#)
- [تقييد كمومي](#)

مراجع

1. <http://web.archive.org/web/20081217040121/http://home.tiscali.nl/physics/HistoricPaper/Schroedinger/Schroedinger1926c.pdf>
2. de Broglie. L. (1925). "Recherches sur la théorie des quanta" [On the Theory of Quanta] (PDF). *Annales de Physique*. **10** (3): 22–128. Translated version
3. Schrodinger, E. (1984). *Collected papers*. Friedrich Vieweg und Sohn. ISBN 3-7001-0573-8. See introduction to first 1926 paper
4. Encyclopaedia of Physics (2nd Edition), R.G. Lerner, G.L. Trigg, VHC publishers, 1991, (Verlagsgesellschaft) 3-527-26954-1, (VHC Inc.) ISBN 0-89573-752-3
5. (ردمك 0-19-855493-1), Quanta: A handbook of concepts, P.W. Atkins, Oxford University Press, 1974
6. Molecular Quantum Mechanics Parts I and II: An Introduction to Quantum Chemistry (Volume 1), P.W. Atkins, (ردمك 0-19-855129-0), Oxford University Press, 1977
7. Physics for Scientists and Engineers - with Modern Physics (6th Edition), P. A. Tipler, G. Mosca, Freeman, 2008, ISBN 0-7167-8964-7
8. David Griffiths (2008). *Introduction to elementary particles*. Wiley-VCH ISBN 978-3-527-40601-2. اطلع عليه بتاريخ 27 يونيو 2011.

وصلات خارجية

في كومنز صور وملفات عن: [معادلة شرودنجر](#)

مجلوبة من "https://ar.wikipedia.org/w/index.php?title=معادلة_شرودنجر&oldid=27733398"

آخر تعديل لهذه الصفحة كان يوم 15 مارس 2018، الساعة 07:11.

النصوص منشورة برخصة المشاع الإبداعي. طالع شروط الاستخدام للتفاصيل.