الفصل الثاني:

الخواص الجسيميَّة للأمواج

Chapter 2:

Particle Properties of Waves

المحاضرة ٧

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١

قسم الفيزياء – جامعة اليرموك

٢١١٦٣ إربد الأردن

الفصل الثاني : الخواص الجسيميَّة للأمواج

© د.نضال الرشيدات

Lecture 7

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department

Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

Chapter 2 :

Particle Properties of Waves

© Dr. Nidal Ershaidat

http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec2-1

The Concept : Wave & Particle الموجة والجسيم

حتَّى بدايات القرن العشرين، اكتفى الفيزيائيون بمفهوم الموجة والجسيم لتفسير ظواهر عديدة في الكهرُمغناطيسيَّة، الحرارة، وبشكل عام في العالم المحسوس بالنسبة للانسان. من انتشار الأمواج المغناطيسيَّة إلى الحرارة النوعيَّة للمواد والنظريَّة الحركيَّة للغازات حتَّى التفاعلات الكيماويَّة مروراً بالصوت والنظام الشمسي.

في عام 1900 بالضبط واجهت الفيزيائيين مشكلة جديدة، أطلق عليها اسم *"إشعاع الجسم الأسود"* أجبرتهم على عدم الاكتفاء بهذيْن المفهومين كتعبيرين مستقلَّين.

وفي نفس الفترة تقريباً، ظهرت ظاهرة الأثر الكهروضوئي والتي حيَّرت المجتمع العلمي. أظهرت التجربة أنَّ اسقاط ضوء ذي طول موجة محدَّد على سطح معدن يُسبِّب ظهور تيار كهربائي أُطلق عليه اسم التيَّار الكهروضوئي (photoelectric current)

الأمواج Waves

تعريف الموجة

يُستخدم مفهوم الموجة، للتعبير عن انتقال الطاقة. فالموجة الميكانيكيَّة كموجة الصوت، الناتجة عن ازعاج* ميكانيكي لوسط مادي، تُعبِّر عن كيفية انتشار الطاقة الميكانيكيَّة في هذا الوسط. وتُعبِّر الموجة الكهرومغناطيسيَّة عن انتشار الطاقة الكهرومغناطيسيَّة في الفراغ.

* هذه ترجمة لكلمة **disturbance** والتي تعني أيضًا خلخلة

تصنيف الأمواج

1. من حيثُ اعتمادها على الزمكان وانتشارها:

- **دوريَّة**
- **غير دوريَّة**

2. من حيثُ شكل مقدمة الموجة wavefront اثناء الانتشار:

- **الموجة المستوية plane wave: مقدمة الموجة سطح مستوٍ.**
- **الموجة الكرويَّة spherical wave: مقدمة الموجة سطح كروي.**

الأمواج المستعرضة والطوليَّة

3. من حيثُ "ازعاج" الوسط الناقل:

- **الموجة المستعرضة transverse wave: وفيها تكون إزاحة جزيئات الوسط عن وضع الاتزان عمودية على اتجاه انتشار الموجة- مثل الموجة الناشئة عن اهتزاز سلك**
- **الموجة الطوليّة longitudinal wave: وفيها تكون ازاحة جزيئات الوسط عن وضع الاتزان في اتجاه انتشار الموجة- مثل امواج الصوت**

4. من حيثُ الوسط الناقل:

- **الموجة الميكانيكيَّة mechanical wave: وتحتاج الى وسط ناقل كأمواج الصوت وأمواج الماء.**
- **الموجة الكهرُمغناطيسيَّة electromagnetic wave: لا تحتاج الى وسط ناقل بلْ تنتشر في الفراغ.**

مبدأ التراكب Superposition Principle

تنتشر الامواج (الميكانيكيَّة في الوسط الناقل والكهرُمغناطيسيَّة في الفراغ) بشكلٍ مستقِّل الواحدة عن الاخرى. اذا حدث وصادفت هذه الامواج عائقا فإنَّها تتداخل وتكون مُحصِّلة الازعاج disturbance، لجزيئات الوسط في حالة الامواج الميكانيكيَّة وفي الفراغ في حالة الامواج الكهرُمغناطيسيَّة، مساوية لمجموع الازعاجات التي سبَّبتها الامواج كلٌّ على حدة.

نُذَكِّر بانَّ مبدأ التراكب ليس الا عملية جمع تأثيرات وعند تمثيل الامواج بمتَّجهات فانَّ عملية التراكب لموجتيْن او اكثر تُصبح عملية جمع متَّجهات لا اكثر .

نُذَكِّر ايضا بانَّ مبدأ التراكب صالح طالما انَّ الازعاجات المُحصِّلة لا تتعدى حدَّ المرونة وبانَّنا نعيش تراكب امواج الضوء والصوت في حياتنا اليوميّة وفي كلِّ لحظة

** لهذا السبب نستطيع التمييز بيْنَ البيانو والطبل في اوركسترا موسيقيَّة.*

الضوء أمواج كهرُمغناطيسيَّة

في عام 1864، اقترح ماكسويل فكرة أنَّ تسريع الشحنات الكهربائيَّة يُولِّد "إزعاجات" كهربائيَّة ومغناطيسيَّة تنتشر في الفراغ بشكل لانهائي. وإذا كان اهتزاز الشحنة دوريًّا فإنَّ الازعاج يكون على شكل أمواج يتذبذب فيها مجال كهربائي ومجال مغناطيسي عموديًّا الواحد على الآخر وعلى اتجاه انتشار الموجة.

الاكتشاف الأهم كان أنَّ سرعة انتشار هذه الموجات يُساوي بالضبط سرعة الضوء في الفراغ ($c = 3 \times 10^8$ m s^{-1}). والاستنتاج الذي فرض نفسه هو أنَّ الضوء نفسه أمواج كهرُمغناطيسيَّة.

الضوء أمواج كهرُمغناطيسيَّة

وجد ماكسويل أنَّ $c = \sqrt{\frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}}$ حيثُ ε_0 و μ_0 هما على التوالي سماحيَّة وإنفاذيَّة الفراغ.

يعود الفضل لهيرتز (Hertz) في إثبات نظريَّة ماكسويل، وفي التحقق من أنَّ الأمواج الكهرُمغناطيسيَّة تتصرف كما يتصرَّف الضوء (الانعكاس، الانكسار، التداخل والحيود)

تُشكِّل العلاقة $\varepsilon_0 \mu_0 c^2 = 1$ أساس نظام MKS

الضوء أمواج كهرُمغناطيسيَّة

يشكِّل الضوء المرئي جزءً بسيطًا من "طيف" الأمواج الكهرُمغناطيسيَّة. (الشكل 1-2)

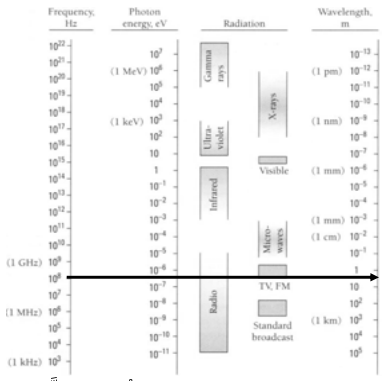
$\lambda\nu = c$

مثال:

λ(X-ray)= 10^{-10} m, $\nu = 3 \times 10^{18}$ Hz

ν(Radio)= 10^5 Hz, $\lambda = 3 \times 10^3$ m

تردد إذاعة عمَّان FM هو 90MHz،
طول الموجة المرادف هو : 3.3m



(الشكل 1-2) :"طيف الأمواج الكهرُمغناطيسيَّة

بلانك وأينشتايْن Planck & Einstein

حلَّ ماكس بلانك مشكلة *"إشعاع الجسم الأسود"* باعتبار أنَّ الضوء وهو، كما كان معروفًا في تلك الأيام، موجات كهرُمغناطيسيَّة، ينتقل على صورة دفقات (quanta) من الطاقة الكهرُمغناطيسيَّة.

وفي عام 1905 نشر أينشتايْن مقالة علميَّة تبحث في ظاهرة الأثر الكهروضوئي وفيها استخدم أينشتايْن المفهوم الجديد الذي أدخله بلانك وأطلق اسم فوتونات* على دفقات بلانك (Planck's quanta)

Modern Physics الفيزياء الحديثة

أكدت التجارب النظريَّة التي أسَّس لها العبقريَّان بلانك وأينشتايْن وبدأ بذلك عصر جديد في الفيزياء وأصبحت الفيزياء المبنيَّة على المفهوم الجديد منذ ذلك الحين *فيزياء حديثة*.

حاز بلانك عام 1900 على أول جائزة نوبل للفيزياء تقديراً لأعماله، أمَّا أينشتايْن فقد نال الجائزة عام 1921، بعد 16 عاماً على مقالاته الثلاث المشهورة (بالإضافة إلى المقالة المذكورة سابقاً كانت الثانية في النسبيَّة الخاصة والثالثة في الحرارة النوعيَّة للمواد)

إشعاع الجسم الأسود Black Body Radiation

تُشعِّع الأجسام موجات كهرُمغناطيسيَّة (أي طاقة كهرُمغناطيسيَّة) تعتمد على درجة الحرارة. وتمتص الأجسام أيضاً موجات كهرُمغناطيسيَّة.

في حين إنَّ جسماً ساخناً بالنسبة لمحيطه سوف يُشع أكثر ممَّا يمتص، فإنَّ جسماً أبرد من محيطه سوف يمتص أكثر ممَّا يُشع! (Thermal Radiation)

إذا سخنَّا جسماً (معدنيًّا مثلاً) فإنَّ ضوءاً يصدر. يبدأ الجسم بالاحمرار وكلَّما رفعنا درجة حرارته يتغير لونه إلى الأصفر ثمَّ إلى الأبيض.

إنَّ هذا معناه أنَّ الجسم يُصدر ضوءاً يعتمد تردده (طول موجته) على درجة الحرارة. في الواقع يُصدر الجسم بشكل متصل ترددات مختلفة ولا نراها بالضرورة كلَّها.

الجسم الأسود

الجسم الأسود هو جسم مثالي الاشعاع والامتصاص.

الجسم الأسود هو جسم له القدرة على امتصاص كافة ترددات الطيف كهرُمغناطيسيَّة (من 0 إلى ∞) ويمتلك خاصيَّة اشعاع جميع هذه الترددات!

إنَّ افتراض وجود هذا الجسم المثالي يُسهِّل علينا دراسة ظواهر الاشعاع والامتصاص دون النظر إلى مادة هذا الجسم، شكله أو حجمه. ويصبح كلُّ ما يهمنا هو درجة حرارته.

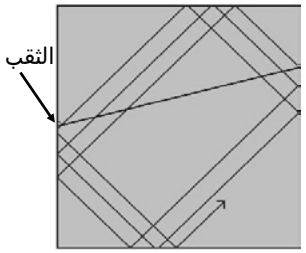
الملحق ٢-١

كيف نحصل على جسم أسود في المختبر؟

http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/App2-1

الجسم الأسود في المختبر

لنعتبر ثقبًا في جسم فارغ من الداخل. إذا دخل شعاع (من الضوء مثلاً) عبر الثقب فإنَّه سوف يرتد مرة تلو المرة عن جدران الجسم الداخليَّة ويستمر هكذا لانهائيًا، ويُصبح حبيسًا داخل الجسم، ويكون احتمال أنْ يخرج من نفس الثقب ضعيفًا جدًّا.



(الشكل ٢-١-١) :ثقب في جسم فارغ

يبدو الثقب هنا وكأنَّه جسم أسود، إذ أنَّ امتصاصه للإشعاع مثالي، ولأنَّه مثالي الامتصاص فمن المنطق أنْ نفترض أنَّه نظريًا مثالي الإشعاع، أي أنَّه يمكن اعتباره جسمًا أسود.

يكون طيف الإشعاع الصادر عن الثقب مشابهًا للطيف الصادر عن جسم أسود.

لهذا نُطلق أحيانًا اسم إشعاع التجويف Cavity Radiation على هذه الظاهرة.

Spectral Radiancy and Radiancy

الاشعاعيَّة الطيفيَّة والاشعاعيَّة

الاشعاعيَّة الطيفيَّة* ونرمز لها بالكميَّة: $R_\nu d\nu$ إذا تعاملنا مع التردد أو $R_\lambda d\lambda$ إذا تعاملنا مع طول الموجة، هي معدَّل إشعاع الطاقة لكلِّ وحدة مساحة من السطح المشع لتردد يقع بيْنَ ν و $\nu \pm d\nu$ (أو لطول موجة يقع بيْنَ λ و $\lambda \pm d\lambda$). (وحدة الإشعاعيَّة الطيفيَّة العمليَّة هي $W/m^2.\mu m$)

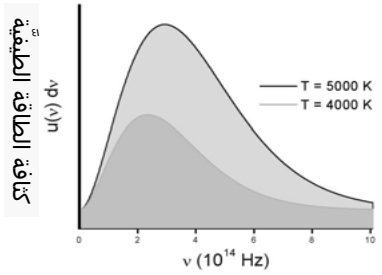
يُسمَّى تكامل القدرة الكليَّة في وحدة المساحة لجسم أسود (أو لفتحة في تجويف) على جميع الترددات (أو أطوال الموجة) شدته الإشعاعيَّة $R(T)$ أو الإشعاعيَّة. وحدة $R(T)$ هي W/m^2 أو J/m^2s. وتُكتب R على الصيغة:**

$$R = \int_0^\infty u(\nu)d\nu = \int_0^\infty R_\nu \, d\nu \qquad 1\text{-}2$$

* Spectral Radiancy
** Radiancy

طيف الجسم الأسود Black Body Spectrum

عند دراسة تغير الاشعاعيَّة الطيفيَّة لجسم بدلالة تردد الاشعاعات الصادرة عنه وذلك عند درجة حرارة معينة فإنَّنا نحصل على الشكل التالي (الشكل 2-2).

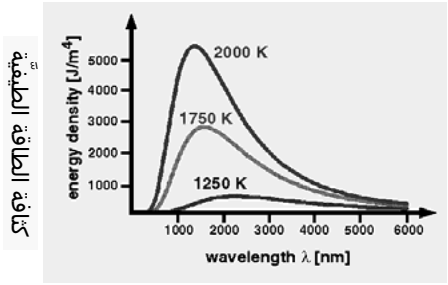


(الشكل 2-2) :"طيف الجسم الأسود"

ويُسمَّى هذا الشكل طيف الجسم الأسود.

طيف الجسم الأسود Spectral Density vs. λ

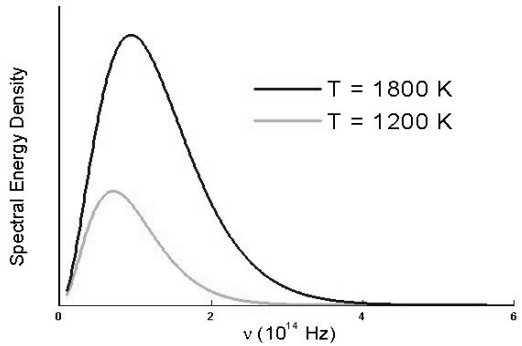
يبين الشكل 2-3 طيف الجسم الأسود بدلالة طول موجة الاشعاع الصادر .



(الشكل 2-3): u(λ) dλ

خصائص طيف الجسم الأسود

1) لا يعتمد "*شكل* طيف" الجسم الأسود على درجة الحرارة



خصائص طيف الجسم الأسود

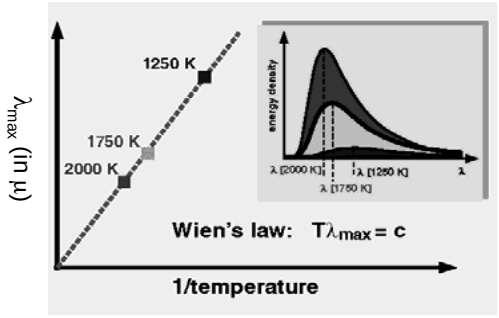
2) تنزاح قمة الطيف بازدياد درجة الحرارة T إلى قيم تردد أكبر.
(تكون الازاحة نحو قيم طول موجة أصغر عند تمثيل كثافة الطاقة الطيفيَّة بدلالة λ، الشكل 2-3)

3) تزداد المساحة المحصورة تحت الطيف بازدياد T.

4) قانون إزاحة فين:
اكتشف فين أنَّ هناك علاقة رياضيَّة بسيطة تربط بينَ طول الموجة (أو تردد) قمة الطيف ودرجة الحرارة. تُسمَّى هذه العلاقة قانون إزاحة فين (Wein's Displacement law)

$$\lambda_{max}\, T = 2.8978 \quad (T \text{ in K}, \lambda \text{ in m}) \qquad 2\text{-}2$$

ازاحة ڤين



الشكل 2-4: إزاحة ڤين

The Stefan-Boltzmann Law

قانون ستيفان-بولتزمان

وجد ستيفان وبولتزمان علاقة تربط بينَ R و T وتُدعى قانون ستيفان-بولتزمان أو قانون القوة الرابعة.

$$R = \sigma T^4 \qquad 3\text{-}2$$

حيث σ ثابت ستيفان، لا يعتمد على مادة الجسم ولا على مساحة السطح ولا على درجة الحرارة.

$$\sigma = 6.67 \times 10^{-8}\ J / m^2\ s\ K^4 \qquad 4\text{-}2$$

الاصداريَّة Emissivity

لأنَّ جسماً عادياً لا يُشع الطاقة أو يمتصها بشكل فعَّال فإنَّ قانون ستيفان-بولتزمان يُعمَّم لجميع الأجسام ويُكتب على الصيغة التالية:

$$R = \varepsilon \sigma T^4 \qquad 5\text{-}2$$

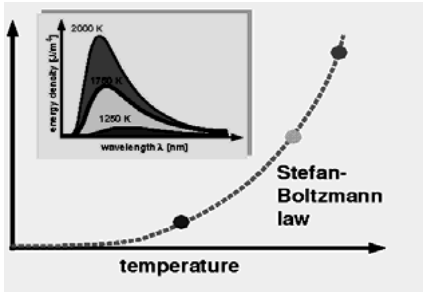
$0 \le \varepsilon \le 1$ هي الاصداريَّة والتي تعتمد على نوعيَّة مادة الجسم ومساحة سطحه وعلى درجة الحرارة طبعاً.

مع أنَّ اسمها الاصداريَّة إلاَّ أنَّها تستخدم للتعبير عن امتصاص الاشعاع أيضاً.

الجسم الأسود هو جسم قيمة ε له تساوي 1. تُسمَّى الأجسام التي ε لها تساوي صفراً الأجسام البيضاء و تُسمَّى الأجسام الأخرى ($0 < \varepsilon < 1$) الأجسام الرماديَّة.

قانون ستيفان-بولتزمان

يبيِّن الشكل 2-5 قانون ستيفان-بولتزمان. إنَّ هذا القانون يعني أنَّ المساحة المحصورة تحت المنحنى تتناسب طرديًّا مع القوة الرابعة لدرجة حرارة الجسم



صيغة ريليه - جينز Rayleigh-Jeans Formula

بافتراض أنَّ اشعاع التجويف عبارة عن موجات واقفة (standing waves) في التجويف استخرج ريليه وجينز بحل معادلة الموجة لهذا النظام ومن طيف الجسم الأسود التجريبي صيغة رياضيَّة هي:

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi k}{c^3} T \nu^2 \, d\nu \qquad 6\text{-}2$$

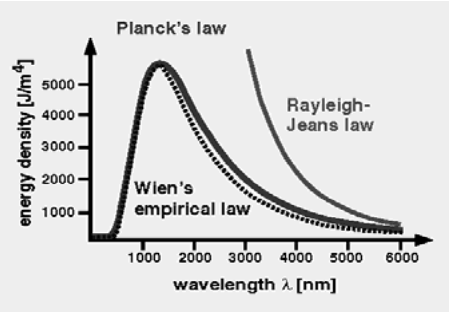
حيثُ:

ثابت بولتزمان	$k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K
سرعة الضوء في الفراغ	$c = 3 \times 10^{9}$ m/s

مع أنَّ صيغة ريليه-جينز فسَّرت الجزء من الطيف لترددات صغيرة (الجزء الأيسر) إلاَّ أنَّها فشلت في تفسير الجزء الأيمن (الترددات العالية) منه.

صيغة ريليه - جينز لا تفسِّر كلَّ الطيف!

يبيِّن الشكل 2-6 صيغة ريليه-جينز. ويبدو واضحًا عجزها عن تفسير الطيف!



صيغة بلانك Planck Radiation Formula

بعد محاولات ريليه-جينز من جهة ومحاولات فين من جهة أخرى استطاع ماكس بلانك تفسير طيف الجسم الأسود.

استخدم بلانك صيغة لكثافة الطاقة الطيفيَّة للجسم الأسود، مستفيداً من المحاولات السابقة ووجد أنَّها تُطابق الطيف التجريبي، وهذه الصيغة هي:

$$u(\nu)d\nu = \frac{8\pi h}{c^3} \frac{\nu^3 \, d\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} \qquad 7\text{-}2$$

حيثُ h ثابت يُسمَّى ثابت بلانك:

ثابت بلانك	$h = 6.626 \times 10^{-34}$ J.s

تفسير بلانك – كوانتا الضوء

لتفسير ما يحدث فيزيائيًا، كان على بلانك أنْ يبتدع مفهومًا جديدًا.

فرضيَّة بلانك: الاشعاع الكهرومغناطيسي الذي يُصدره الجسم الأسود ناتج عن اهتزازات التجويف التوافقيَّة، والذي يبدو كعدد كبير جدًّا من الهزَّازات التوافقيَّة البسيطة. ولكي يبرِّر صيغته أضاف بلانك الشرط التالي: هذه الاهتزازات لا تحدث بشكل متصل وإنَّما على شكل دفقات من الطاقة سمَّاها بلانك "كوانتا" quanta (جمع كوانتم quantum) بحيث تكون طاقة كل اهتزاز تساوي:

$$\varepsilon_n = n\,h\,\nu \qquad 8\text{-}2$$

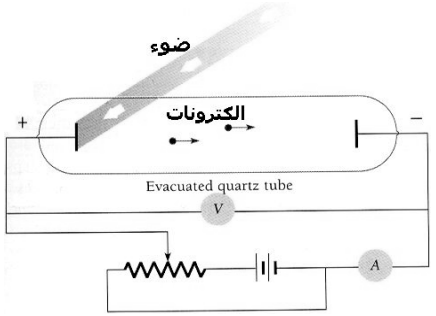
حيث $h\nu$ طاقة هزَّاز توافقي بسيط

يُصدر الهزَّاز كمًّا من الطاقة ($h\nu$) إذا انتقل من حالة طاقة عليا إلى حالة طاقتها أقل بمقدار $h\,\nu$. وإذا امتص هذا الهزَّاز كمًّا من الطاقة فإنَّه ينتقل من حالة طاقة دنيا إلى حالة طاقتها أكبر بمقدار $h\,\nu$ أيضًا.

الأثر الكهرُضوئي
The Photoelectric Effect

الأثر الكهروضوئي

إذا سقط ضوء على سطح معدن، فإنَّ تيَّارًا ينبعث لحظيًّا من سطح المعدن (الشكل 2-7).

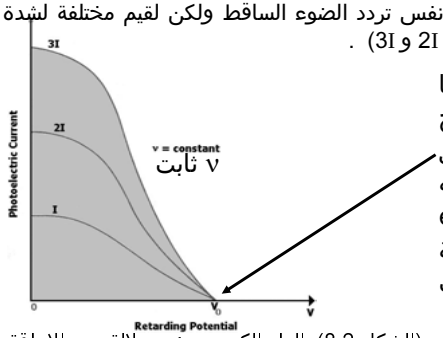


(الشكل 2-7) :الأثر الكهروضوئي

طيف التيار الكهروضوئي The Photoelectric Current

يُستخدم جهد يسمَّى جهد الاعاقة لقياس التيار الكهروضوئي والنتيجة هي التوزيع التالي (الشكل 2-8) باستخدام نفس تردد الضوء الساقط ولكن لقيم مختلفة لشدة الضوء الساقط(ثلاث قيم هنا I ، 2I و 3I) .

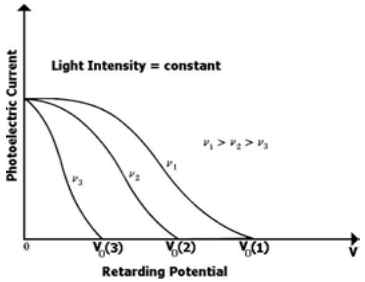
هناك قيمة للجهد، مهما كانت قيمة الشدَّة، يصبح عندها التيار الكهربائي يساوي صفرًا، أي أنه يختفي. عندها تكون eV_0 هي بالضبط أقصى طاقة تمتلكها الالكترونات الضوئيَّة.



(الشكل 2-8) :التيار الكهروضوئي بدلالة جهد الاعاقة

طيف التيار الكهروضوئي، نفس الشدة، ترددات مختلفة

إذا استخدمنا عدة ترددات (هنا ν_1 ، ν_2 و ν_3) بنفس الشدة فإنّنا نحصل على الشكل التالي. يزداد جهد الاعاقة اللازم بازدياد التردد! وهناك قيمة دنيا للتردد لا يظهر قبلها التيار!



(الشكل 2-9) :التيار الكهروضوئي بدلالة جهد الاعاقة ($\nu_1 > \nu_2 > \nu_3$)

© Dr. N. Ershaidat

الأثر الكهروضوئي والنظريَّة الكلاسيكيَّة

إذا أردنا تفسير الأثر الكهروضوئي باستخدام النظريَّة الكهرومغناطيسيَّة والتي تتعامل مع الضوء كأمواج كهرومغناطيسيَّة فإنّنا نواجه صعوبات جمَّة.

1) حسب النظريَّة الكلاسيكيَّة فإنَّ لحظية انبعاث الالكترونات غير ممكنة. لدقَّة تصل إلى 10^{-9} s، فإنّه لا توجد فترة زمنيَّة بينَ وصول الضوء وانبعاث التيار الكهروضوئي!

لنأخذ مثالاً بسيطاً: اعتبر ضوءاً ساقطاً على سطح من الصوديوم. تحتاج الكترونات السطح إلى 2.3 eV لكي تتحرر، ولكي يبدأ التيار الكهروضوئي بالظهور نحتاج إلى 10^{-6} W/m^2 (شدة الضوء والمعرَّفة بقدرة في وحدة المساحة). إذا أخذنا سطحاً من الصوديوم سمكه = سمك ذرة واحدة ومساحة سطحه 1m^2 (عدد الذرات يساوي في هذه الحالة 10^{19}) فإنَّ هذا يعني أنَّ كلَّ ذرة ستتلقى طاقة بمعدَّل (10^{-25}) وهذا يعني أنّه يلزمنا أكثر من شهر لكي يُجمِّع أحد الكترونات السطح الطاقة اللازمة لتحرره!!.

طاقة الالكترونات الضوئيَّة لا تعتمد على شدة الضوء الساقط

2) حسب النظريَّة الكلاسيكيَّة فإنَّ زيادة الشدة (زيادة عدد الأمواج الساقطة) يجب أنَّ يرافقها زيادة في طاقة الالكترونات المتحررة وهذا يناقض المشاهدة المخبريَّة التي رأيناها في الشكل 2-7 والتي تُظهر أنَّ طاقة الالكترون لا تتغير بتغير الشدة!

3) لا تستطيع النظريَّة الكلاسيكيَّة تفسير لماذا تزداد طاقة الالكترونات الضوئية بازدياد تردد الضوء الساقط (الشكل 2-8) ! ولا تستطيع تفسير وجود قيمة دنيا للتردد لا يظهر الأثر الكهروضوئي قبلها!

من الواضح أنّنا يجب أنْ نبحثَ عن تفسير آخر، وهذا ما فعله البرت أينشتاين عام 1905.

© Dr. N. Ershaidat Phys.251 Chapter 2 : Particle Properties of Waves Lecture 7

نظريَّة الضوء الكميَّة
Quantum Theory of Light

© Dr. N. Ershaidat Phys.251 Chapter 2 : Particle Properties of Waves Lecture 7

41

نظريَّة الضوء الكميَّة - الفوتونات

قدَّم أينشتايْن (1905) تفسيراً لهذه الظاهرة أساسه افتراض أنَّ الضوء، والذي كان معروفاً أنَّه عبارة عن موجات كهرُمغناطيسيَّة، عبارة عن حزم من جسيمات، سمَّاها الفوتونات، طاقة كل منها = $h\nu$ ، حيثُ h ثابت بلانك و ν تردد الضوء الساقط.

يُعطي فوتون ساقط كلَّ طاقته ($h\nu$) للإلكترون الذي يتحرَّر من سطح المعدن ويُسمَّى هذا الإلكترون *الإلكترون الضوئي* (photoelectron)

42

دالة الشغل Work Function

لأنَّ الكترونات المعدن مُقيَّدة فإنَّ هناك كميَّة من الطاقة ضرورية لاقتلاعها. تسمَّى هذه الكميَّة *"دالة الشغل"* للمعدن. والطاقة المرادفة لدالة الشغل هذه هي $h\nu_0$ (حيثُ هو أقل تردد يمكن استخدامه لكي يحدث الأثر الكهروضوئي)

43

تردد العتبة The Threshold Frequency

لتفسير طيف الالكترونات الناتجة، وضع أينشتايْن العلاقة التالية لحساب الطاقة الحركيَّة العظمى للالكترونات (KE_{max}).

$$h\nu = KE_{max} + \Phi_0 \qquad \text{أ-9-2}$$

أي أنَّ طاقة الفوتون تُساوي حاصل جمع دالة الشغل + الطاقة الحركيَّة للإلكترونات المتحرِّرة.

نرى من العلاقة السابقة أنَّ أقل طاقة يجب أنْ يمتلكها الفوتون لتحرير إلكترون من سطح المعدن تُساوي Φ_0 دالة الشغل، ويُسمَّى التردد المُرادف (ν_0) لهذه الطاقة الدنيا تردد العتبة.

$$h\nu_0 = \Phi_0 \qquad \text{ب-9-2}$$

44

$$h\,\nu = eV_0 + \Phi_0$$

تُكتب العلاقة (2-9-أ) السابقة على الصيغة التالية:

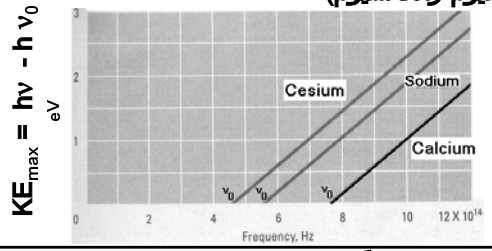
$$h\nu = KE_{max} + \Phi_0 = KE_{max} + h\nu_0 \Rightarrow KE_{max} = h(\nu - \nu_0) \qquad \text{ج-9-2}$$

إذا كان الجهد المستخدم لإعاقة الالكترونات هو V_0 فإنَّ هذا يعني أنَّ طاقة الإلكترونات الضوئيَّة (K_{max}) تُساوي eV_0 ، وعمليَّاً عند إجراء التجربة في المختبر فإنَّنا نستعمل العلاقة التالية:

$$h\nu = eV_0 + \Phi_0 = h\nu_0 + eV_0 \qquad 10\text{-}2$$

طاقة الالكترونات القصوى

يُبيِّن الشكل (2-10) طاقة الالكترونات القصوى بدلالة التردد لثلاثة معادن (السيزيوم، الصوديوم والكالسيوم)



العلاقة بينَ KE_{max} و ν خطيَّة، ميلها يُساوي h ثابت بلانك ومقطعها من المحور العمودي هو دالة الشغل $\Phi_0 = h\nu_0$

$Y = hX - b$

دالة الشغل

	رمزه	Φ_0 (eV)	ν_0 (10^{14} Hz)
السيزيوم	Cs	1.9	4.60
البوتاسيوم	K	2.2	5.32
الصوديوم	Na	2.3	5.56
الليثيوم	Li	2.5	6.05
الكالسيوم	Ca	3.2	7.74
النحاس	Cu	4.5	10.89
الفضَّة	Ag	4.7	11.37
البلاتين	Pt	5.6	13.55

تُستخرج قيمة دالة الشغل للمعادن من الخطوط المستقيمة السابقة وتُبيَّن في الجدول (2-1) التالي هذه القيمة لبعض المعادن وقيمة تردد العتبة المرادف لكُلٍّ منها

Constants الثوابت

ثابت بولتزمان	$k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K
ثابت بلانك	$h = 6.626 \times 10^{-34}$ J.s $= 4.14 \times 10^{-15}$ eV.s
سرعة الضوء في الفراغ	$c = 3 \times 10^{9}$ m/s
ثابت ستيفان	$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ J / m^2 s K^4

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2} = \frac{\pi^2 k^4}{60 \hbar^3 c^2}$$

Lecture 8

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department
Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

Dual Nature of Light

© Dr. Nidal Ershaidat

http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec2-2

المحاضرة ٨

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١

قسم الفيزياء – جامعة اليرموك
٢١١٦٣ إربد الأردن

الطبيعة المزدوجة للضوء

© د.نضال الرشيدات

الضوء موجة وجسيمات

الضوء موجة وجسيم

يتصرف الضوء كأمواج (كهرُمغناطيسيَّة) في ظواهر مثل التداخل والحيود، ويتصرف كجسيمات ماديَّة (فوتونات) في اشعاع الجسم الأسود وفي الأثر الكهروضوئي.

لا تستطيع النظريَّة الكميَّة الجديدة تفسير التصرف الموجي للضوء وتعجز نظريَّة الأمواج عن تفسير التصرف الجسيمي للضوء!

وبالتالي يجب أنْ نُسلِّم بأنَّ للضوء طبيعة مزدوجة: موجيَّة وجسيميَّة

أي أنَّ النظريَّة الكميَّة و نظريَّة الأمواج تُكمِّلان الواحدة الأخرى.

الطبيعة المزدوجة للأمواج الكهرُمغناطيسية

هل تتصرَّف جميع الأمواج الكهرُمغناطيسيَّة مثل الضوء أمْ أنَّ هذه الخاصيَّة محصورة بالضوء؟

تُشكِّل الاجابة على السؤال السابق نقطة هامة في صالح تعميم الطبيعة المزدوجة للأمواج الكهرُمغناطيسيَّة بشكل عام.

الطبيعة الجسيميَّة للأمواج الكهرُمغناطيسيَّة

العلاقة بين طاقة الفوتون، تردده وطول موجته

إذا كان طول موجة الضوء (الساقط على سطح المعدن في الأثر الكهروضوئي) هو λ، أي أنَّ تردده هو $\nu = c/\lambda$، فإنَّ طاقته الكليَّة تُعطى بالعلاقة التالية:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \qquad 11\text{-}2$$

باستخدام تعريف عدد الموجة k والتردد الزاوي ω، أي:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad \text{و} \quad \omega = 2\pi\nu \rightarrow \omega = k\,c$$

فإنَّنا نستطيع أنْ نكتب:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega$$

hc

في هذا المساق سوف لن نستخدم وحدات نظام MKS، وإنَّما النظام الذي أساسه الالكترون-فولت والأنغستروم (eV و Å)

في هذا النظام

$h = 6.626 \times 10^{-34}\ \text{J.s} = 4.14125 \times 10^{-15}\ \text{eV.s}$

$h\,c = 6.626 \times 10^{-34}\ \text{J.s} \times 3 \times 10^{8}\ \text{m.s}^{-1}$

$= 1.9878 \times 10^{-25}\ \text{J m}$

$h\,c \cong 12400\ \text{eV Å}$

$\cong 1240\ \text{MeV F}$

الأشعة السينيِّة – أشعة رونتغن

في عام ١٨٩٥، اكتشف ڤيلهلم كونراد رونتغن أنَّ سقوط الكترونات الأنبوب الكاثودي على معدن تُسبب ظهور أشعة ذات خصائص لمْ تكن معروفة في تلك الأيام*، ولجهله التام بطبيعتها أسماها رونتغن *"أشعة X"* أو الأشعة السينيَّة (أي المجهولة).

* احتاج الأمر إلى ١٧ سنة قبل أنْ يُعطي نيلز بور تفسيراً لهذه الظاهرة

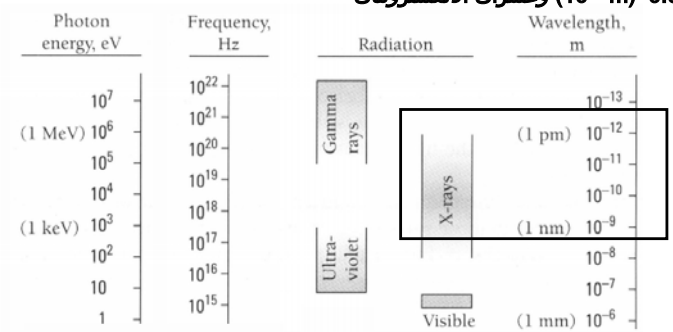
توليد الأشعة السينيَّة

خصائص الأشعة السينيِّة

أثبتت التجارب أنَّ أشعة رونتغن تتصرف تماماً كما الأمواج الكهرُمغناطيسيَّة، فهي لا تتأثر بمجال كهربائي ولا بمجال مغناطيسي وكما دُرس حيودها ووُجد أنَّها تتصرف عند وضع عائق في طريقها كما الضوء عند اجباره على المرور عبر شقيْن أو عدة شقوق أو (محززة حيود مكونة من عدد كبير جداً من هذه الشقوق).

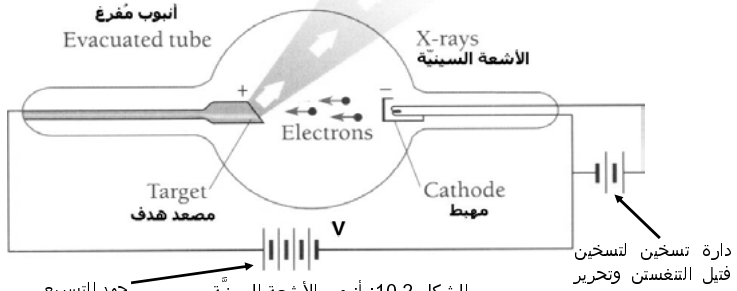
الأشعة السينيِّة أمواج كهرُمغناطيسيَّة

وباستخدام تجارب الحيود، أمكن قياس أطوال موجة هذه الأشعة والتي تتراوح بينَ 0.01 Å (10^{-12}m) وعشرات الأنغستروم



أنبوب الأشعة السينيَّة X-Ray Tube

يبيِّن الشكل 2-10 الجهاز المستخدم لتوليد أشعة X، والمسمَّى **أنبوب أشعة X**. تُسرَّع الكترونات باستخدام فرق جهد عال (50 KV – 10) وينتج عن اصطدامها بالمصعد ظهور الأشعة السينيَّة.



الشكل 2-10: أنبوب الأشعة السينيَّة

61

طيف الأشعة السينيَّة X-Ray Spectrum

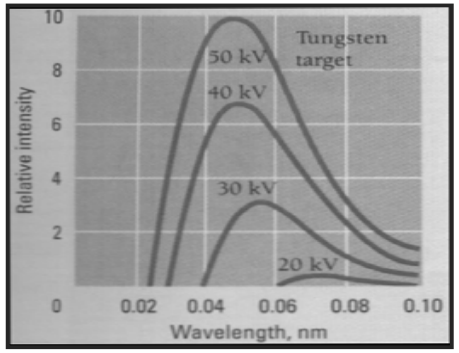
تثبت النظريَّة الكهرُمغناطيسيَّة أنَّ شحنة متسارعة تخسر جزءاً من طاقتها على شكل اشعاعات (أمواج) كهرُمغناطيسيَّة مُسبِّبة تباطؤها ولذا يُسمَّى هذا الاشعاع "اشعاع التباطؤ" (Braking Radiation). لأسباب تاريخيَّة بحتة سوف نستخدم الكلمة الألمانيَّة المستخدمة للتعبير عن هذا الاشعاع وهي Bremsstrahlung

نمثِّل بيانيًّا شدة الأشعة السينيَّة الصادرة عن المصعد بدلالة طول الموجة (أو التردد) وهذا هو طيف الأشعة السينيَّة.

عند دراسة طيف الأشعة السينيَّة باستخدام مصعد هدف من معدن التنغستن لعدة قيم لجهد التسريع V فإنَّنا نحصل على طيف كالمبين في الشكل 2-11.ومصدر هذه الأطياف هو "اشعاع التباطؤ".

62

طيف الأشعة السينيَّة للتنغستن

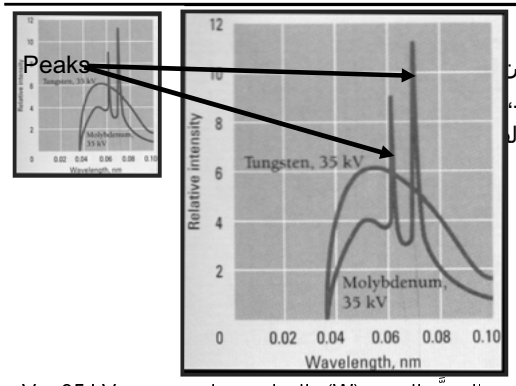


الشكل 2-11: طيف الأشعة السينيَّة للتنغستن (W) لعدة قيم لجهد تسريع الالكترونات

63

طيف الأشعة السينيَّة للعنصر Mo

يختلف طيف الأشعة
تسريع V = 35kV عن
باستخدام نفس الجهد،
محدَّدة لطول الموجة ل



الشكل 2-12: طيف الأشعة السينيَّة للعنصر (W) وللموليبدنوم لجهد تسريع V = 35 kV

64

خصائص طيف الأشعة السينيَّة

الشكل 2-11:

1) تنزاح قمة الطيف بازدياد جهد التسريع V نحو قيم طول موجة أصغر.

2) تزداد المساحة المحصورة تحت الطيف بازدياد V .

3) تزداد الشدة بزيادة V.

4) هناك قيمة دنيا لطول الموجة (λ_0).

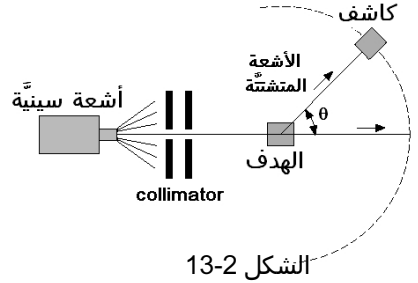
الشكل 2-12 :

يختلف أصل القمم الحادة عن باقي الطيف، والذي يبدو وكأنَّه حاصل جمع طيفيْن، الأول شبيه بالأطياف في الشكل 2-11 والثاني يمثِّل القمم الحادة والتي مصدرها تكميم الطاقة على مستوى الذرة.

أثر كومبتون
Compton Effect

أثر كومبتون Compton Effect

في عام 1923 وأثناء دراسته لتشتيت المواد لأشعة رونتغن، لاحظ آرثر هولي كومبتون أنَّ طول موجة ألاشعة بعد التشتيت يكون أطول من موجة ألاشعة قبل التشتيت.



الشكل 2-13

أثر كومبتون والفيزياء الكلاسيكيَّة

لا تُعطي النظريَّة الموجيَّة الكلاسيكيَّة تفسيراً لهذه الظاهرة واقترح كومبتون تفسيراً يستخدم طبيعة الأمواج الجسيميَّة، أي اعتبار أنَّ الأشعة الساقطة عبارة عن كمَّات الطاقة (الكهرُمغناطيسيَّة) أي الفوتونات.

© Dr. N. Ershaidat Phys.251 Chapter 2 : Particle Properties of Waves Lecture 7

الفوتون، كمُّ الطاقة، جسيم عديم الكتلة

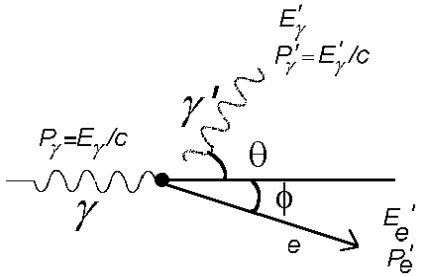
تفسير كومبتون افترض أنَّ ما يحدث في الأثر الذي يحمل اسمه هو تصادم غير مرن بين فوتون عديم الكتلة (أي أنَّ طاقته الكليَّة هي $E = h\nu = pc$) وأحد إلكترونات الهدف ينتج عنه تشتت الفوتون (الأشعة)!

لاحظنا أنَّ أينشتاين لم يحتج لكتلة الفوتونات.

في الملحق A2 تفصيل لحسابات كومبتون

أثر كومبتون = تصادم غير مرن بين جسيمين

يبيِّن الشكل 2-13رسماً تخطيطيًّا لتصادم غير مرن بين فوتون طول موجته (λ) طاقته الكليَّة (E = hc/ λ) والكترون *ساكن*.



الشكل 2-14: أثر كومبتون = تصادم غير مرن بين فوتون وإلكترون

أثر كومبتون: المتغيرات الديناميكيَّة

يبيِّن الجدول 2-2 المتغيرات الديناميكيَّة للتصادم غير المرن بين الفوتون والإلكترون.

	الطاقة الزخم الخطي	الفوتون	الالكترون
قبل التصادم	الطاقة الزخم الخطي	$E\gamma = h\nu = hc/\lambda$ $\vec{P}_\gamma = \frac{h\vec{\nu}}{c}$	$E_e = m_e c^2$ $\vec{P}_e = 0$
بعد التصادم	الطاقة الزخم الخطي	$E'\gamma = h\nu' = hc/\lambda'$ $\vec{P}'_\gamma = \frac{h\vec{\nu}'}{c}$	$E_e' = \gamma\, m_e c^2$ $\vec{P}'_e = \gamma\, m_e \vec{v}$

أثر كومبتون $\lambda' = f(\lambda)$

يُعطى طول موجة الفوتون المتشتت λ′ بدلالة طول موجة الفوتون الساقط λ بالعلاقة التالية:

$$\lambda' = \lambda\left[1 + \frac{h(\nu/c)}{m_e c}(1-\cos\theta)\right] \qquad 12\text{-}2$$

ويُعطى الفرق بيْنَ λ′ و λ والذي يُسمَّى "إزاحة كومبتون" * بالعلاقة:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c}(1-\cos\theta) = \lambda_C(1-\cos\theta) > 0 \qquad 13\text{-}2$$

* Compton Displacement

طول موجة كومبتون للإلكترون

يُسمَّى طول الموجة λ_C طول موجة كومبتون للإلكترون ويُعطى بالعلاقة التالية:

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c} = \frac{hc}{m_e c^2} \cong \frac{12400\ \text{eV}.\text{Å}}{511000\ \text{eV}} = 0.0243\ \text{Å} \qquad 14\text{-}2$$

Lecture 8

Phys. 251: Modern Physics

Physics Department
Yarmouk University 21163 Irbid Jordan

Chapter 2 : Problems

© Dr. Nidal Ershaidat

http://ctaps.yu.edu.jo/physics/Courses/Phys251/Lec2_Pbs

المحاضرة ٨

ف ٢٥١ : فيزياء حديثة ١

قسم الفيزياء – جامعة اليرموك
٢١١٦٣ إربد الأردن

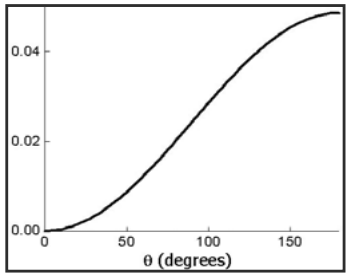
مسائل في الخواص الجسيميَّة للأمواج

© د.نضال الرشيدات

أثر كومبتون $\Delta\lambda = \lambda_C (1 - \cos\theta)$

يُبيِّن الشكل 2-15 العلاقة بينَ إزاحة كومبتون والزاوية θ.

θ	0^0	0^0	45^0	60^0	90^0
Δλ(Å)	0	0.0071	0.01215	0.0243	



الشكل 2-15: $\Delta\lambda = \lambda_C (1 - \cos\theta)$

إنتاج الأزواج Pair Production

رأينا أنَّ الفوتونات تتفاعل مع المادة عبر ظاهرتيْن هما: الأثر الكهروضوئي حيث يُعطي الفوتون كلَّ طاقته إلى أحد الكترونات المادة وأثر كومبتون حيث يُعطي جزءاً من طاقته إلى أحد الكترونات المادة.

هناك ظاهرة ثالثة لهذا التفاعل تتمثَّل في أنَّ الفوتون يتحول إلى مادة (materialization) مختفيًا تماماً على إثر ذلك.

انتاج الأزواج $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

يتحول الفوتون (في وجود جهد النواة) إلى الكترون وبوزيترون.
البوزيترون هو الأخ غير الشقيق للالكترون. إذ يُشبهه في كل خواصه باستثناء الشحنة فهو موجب الشحنة! ونقول عن البوزيترون أنَّه ضديد الالكترون.

إنَّ الشرط الأساسي لهذه العمليَّة هي أنْ تكون طاقة الفوتون تُساوي على الأقل ضعف طاقة السكون للالكترون اي: $E_\gamma = h\nu \geq 2\, m_e c^2$

المسألة 1: اشعاع الجسم الأسود

إذا كانت درجة حرارة الشمس تساوي 5780 K، فأحسب إشعاعيَّتها بافتراض أنَّها جسم أسود.

الحل:

$$R = \sigma T^4 = 5.67 \times 10^{-8} \times (5780)^4$$
$$= 6.33 \times 10^{+7}\ W\ m^{-2} = 63.3\ MW\ m^{-2}$$

© Dr. N. Ershaidat Phys.251 Chapter 2 : Particle Properties of Waves Problems

المسألة 2: الفوتونات

أ) جد طاقة فوتون طول موجته يساوي 700 nm.(5 صفحة 82)
ب) ما هو تردد فوتون طاقته تساوي 100 MeV، ما هو طول موجته وما هو زخمه الخطي؟ (6 صفحة 87)

* 1 nm= 10^{-9} m = 10 Å

الحل:

أ) $$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{12400\ eV.\mathring{A}}{7000\ \mathring{A}^*} = 1.77\ eV$$

ب) $$\nu = \frac{E}{h} = \frac{E}{hc}c = \frac{100\ X10^6 eV}{12400\ eV\ \mathring{A}} \times 3\times10^{18}\ \mathring{A}\ s^{-1} = 2.4\times10^{22}\ Hz$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{12400\ eV.\mathring{A}}{100\times10^6\ eV} = 124\times10^{-6}\ \mathring{A} = 12.40\ F$$

$$p = \frac{E}{c} = \frac{100\ MeV}{c} = 100\ MeV/c$$

لاحظ أنَّنا لم نستخدم وحدات MKS.

المسألة 3: الفوتونات

يُصدر جهاز ارسال قدرته 1 kW موجات بتردد 880 kHz، ما هو عدد الفوتونات التي يُصدرها بالثانية؟ (7 صفحة 87)

الحل:

طاقة كل فوتون تساوي:

$$E_{photon} = h\nu = hc\frac{\nu}{c} = 12400\ eV.\mathring{A} \times \frac{880\times10^3\ Hz}{3\times10^{18}\ \mathring{A}\ s^{-1}} = 3.64\ 10^{-9}\ eV$$

$$c = 3\times10^8\ m/s = = 3\times10^{18}\ \mathring{A}/s$$

عدد الفوتونات الصادرة في وحدة الزمن يُساوي:

$$n = \frac{E_{tot}/s}{E_{photon}} = \frac{10^3}{5.83\times10^{28}} = 1.72\times10^{24}\ photons/s$$

لاحظ أنَّنا استخدمنا وحدات MKS هنا لأنَّ ذلك أسهل.

المسألة 4: الأثر الكهرضوئي

طول موجة العتبة (λ_0) للأثر الكهرُضوئي للتنغستن يُساوي 2300 Å،
أ) ما طول موجة الضوء اللازمة لانبعاث الكترونات ضوئية طاقتها القصوى 1.5 eV ؟(11 صفحة 82)
ب) ما هي قيمة دالة الشغل للتنغستن؟

الحل:

$$KE_{max} = h(\nu - \nu_0) \quad \Rightarrow KE_{max} = hc\left(\frac{\nu}{c} - \frac{\nu_0}{c}\right) = hc\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_0}\right)$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{\lambda_0} + \frac{KE_{max}}{hc} = \frac{1}{2300} + \frac{1.5}{12400} \Rightarrow \lambda = 1799.4\ \mathring{A}$$

$$\nu_0 = \frac{c}{\lambda_0} = \frac{3\times10^{18}}{2300} = 1.3\times10^{15}\ Hz$$

$$\Phi_0 = h\nu_0 = \frac{hc}{\lambda_0} = \frac{12400}{2300} = 5.39\ eV$$

المسألة 5: الأشعة السينيَّة

ما هو جهد التسريع اللازم استخدامه في أنبوب أشعة سينيَّة لكي يكون أقل طول موجة للأشعة السينيَّة الناتجة هو 30 pm؟ (20 صفحة 87)

الحل:

$$KE_{max} = e\,V_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} = \frac{12400}{30\times10^{-2}} = 41.333\,keV$$

$$V_{max} = 41.333\,kV$$

المسألة 6: أثر كومبتون

تتشتت حزمة أشعة سينيَّة أحاديَّة الموجة طول موجتها 0.558 Å بزاوية 46°، ما هو طول موجة الحزمة المتشتتة؟(28 صفحة 88)

الحل:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e\,c}(1-\cos\theta) = 0.0243\,(1-\cos 46^0) = 0.0074$$

$$\lambda' = \lambda + 0.0074 = 0.5954\ Å$$

المسألة 7: أثر كومبتون

اعتبر حزمة أشعة سينيَّة أحاديَّة الموجة طاقتها 100 keV، ما هي الزاوية التي تتشتت بها، إذا كانت طاقة الحزمة المتشتتة تُساوي 90 keV؟(33 صفحة 88)

الحل:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e\,c}(1-\cos\theta)$$

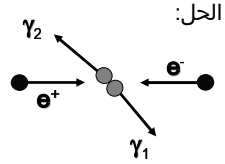
$$\frac{hc}{E'} - \frac{hc}{E} = \frac{h}{m_e\,c}(1-\cos\theta)$$

$$\cos\theta = 1 - \frac{\frac{hc}{E'} - \frac{hc}{E}}{\lambda_C} = 1 - \frac{12.4\left(\frac{1}{90} - \frac{1}{100}\right)}{0.0243} = 0.567 \quad \Rightarrow \theta = 55.46°$$

المسألة 8: انتاج الأزواج

يصطدم بوزيترون طاقته الحركيَّة 1.00 MeV بإلكترون يمتلك نفس الطاقة الحركيَّة. تحدث هنا ظاهرة جديدة هي اختفاء البوزيترون والإلكترون* ويكون الناتج فوتونان (بما أنَّهما متشابهان فإنَّهما يمتلكان نفس الطاقة). أحسب طول موجة الفوتونين الناتجين؟

الحل:



$$E_{initial} = E_{final}$$

$$2\,(m_e c^2 + K) = 2\,E_\gamma = 2\,h\,\nu = 2\,hc/\lambda$$

$$\lambda = \frac{0.124}{0.511+1} = 0.082\ Å^0$$

لاحظ أنَّنا استخدمنا النسبيَّة هنا لأنَّ $K/m_e c^2 = 2$.

* Annihilation

وظيفة

المسائل : 19، 41 و 42

Next Lecture الحلقة القادمة

Chapter 3:
Wave Properties of Particle s

الفصل الثالث:
الطبيعة الموجيَّة للجسيمات

End of Lecture 8