بسم الله الرحمن الرحيم

جامعة السودان المفتوحة

برنامج التربية

مقدمة فى الفيزياء الحديثة

رمز المقرر ورقمه : **فيز 303**

المؤلفان:

أ.د.محمد عثمان سيد احمد

د. عمر ابراهيم عيد

التحكيم العلمي :

د. عبدالله سيدأحمد محجوب

التصميم التعليمي :

أ . مناهل محمد بحر الدين

التصميم الفني :

أسعد جلال الدين محمد بشير

منشورات جامعة السودان المفتوحة، الطبعة الأولى 2007

جميع الحقوق محفوظة لجامعة السودان المفتوحة، لا يجوز إعادة إنتاج أي جزء من هذا المقرر، وبأي وجه من الوجوه، إلا بعد الموافقة المكتوبة من الجامعة.

الوحدة الأولى
نظرية النسبية
الخاصة

محتويات الوحدة الأولى

الموضوع	الصفحة
مقدمة	3
تمهيد	3
أهداف الوحدة	4
1.نظرية النسبية الخاصة	5
1.1. تجربة ميكلسون ومورلي	5
2.1. فرضا النسبية الخاصة	10
3.1. تحويلات جاليلو	12
1. 4 . تحويلات لورنتز	14
5.1. انكماش الطول	18
6.1. تمدد الزمن	20
7.1.تحويلات السرعة في النسبية الخاصة	25
8.1.نسبية الكتلة	29
9.1.الاندفاع (كمية التحرك) في النسبية	34
10.1. طاقة الحركة النسبية	35
11.1. الاجسام التى ليس لها كتلة سكون	38
12.1 وحدات مستخدمة للطاقة والاندفاع	40
الخلاصة	43
لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية	43
إجابات التدريبات	44
مسرد المصطلحات	45

مقدمة

تمهيد

عزيزي الدارس،،

مرحباً بك إلى الوحدة الاولي من مقرر الفيزياء الحديثة وهي بعنوان نظرية النسبية الخاصة ، لقد كان الاعتقاد في علم الميكانيكا القديم بأن الزمان والمكان شيئان مستقلان عن بعضهما البعض. قد تعرض نيوتن للحديث عن المكان المطلق والزمان المطلق و هذا المفهوم يستلزم وجود مناط إسناد ثابت يكون مرجعاً للحركة بالنسبة إليه. عند دراستنا لنظرية النسبية سنجد أنها تغلبت على هذا المفهوم وأوضحت أن حركة الأجسام توصف فقط بالنسبة لبعضها البعض،ولذلك أحدثت نظرية النسبية الخاصة تغيرات جوهرية في أسس علم الميكانيكا الكلاسيكية (ميكانيكا نيوتن) وأدت إلى ظهور علم (الميكانيكا النسبية).

في القسمين الاول والثاني نتعرف علي تجربة ميكلسون ومورلي و أثر حركة الأرض عبر الفضاء في سرعة الضوء ثم فرضيات النسبية الخاصة .

ونتاول في القسمين الرابع والخامس تحويلات جاليلو و تحويلات لورنتز ، اما في القسمين السادس والسابع نتعمق في معرفة معني كل من انكماش الطول وتمدد الزمن،و في الاقسام الباقية سنتاول كل من تحويلات السرعة ثم نسبية الكتلة و الاندفاع في النسبية الخاصة وماذا نعني بتكافؤ الكتلة والطاقة ثم نتطرق إلى الأجسام التي ليس لها كتلة وهي في حالة السكون (كتلة سكونية) وكيفية حساب طاقتها واندفاعها وما هي الوحدات المستخدمة للطاقة والاندفاع

لقد ذيلنا هذه الوحدة بسرد شامل للمصطلحات العلمية التي وردت في النص الرئيسي، وهنالك أسئلة تقويم ذاتي، وتدريبات كفيلة بتلبية احتياجاتك التعليمية والتي تقدمها لمرشدك الميداني.

عزيزي الدارس، أهلاً بك مرة أخري إلي هذه الوحدة ونرجو أن تستمتع بدراستها

أهداف الوحدة

عزيزي الدارس،،

بعد فراغك من دراسة هذه الوحدة يتوقع منك أن تكون قادراً علي أن:

1. تفهم أهمية دراسة نظرية النسبية الخاصة .
2. تستطيع شرح تجربة ميكلسون ومورلي
3. تقارن بين تحويلات جاليلو و تحويلات لورنتز
4. تعرف انكماش الطول وتمدد الزمن
5. تتحصل على تحويلات السرعة في النسبية الخاصة
6. تشرح نسبية الكتلة و الاندفاع في النسبية الخاصة
7. تبين تكافؤ الكتلة والطاقة
8. توضح الاجسام التى ليس لها كتلة
9. تذكر الوحدات المستخدمة للطاقة والاندفاع
10. تحل مسائل وتمارين عن نظرية النسبية الخاصة

1. نظرية النسبية الخاصة

عزيزي الدارس ،،

نجد ان علم الميكانيكا القديم ساد الاعتقاد بأن الزمان والمكان شيئان مستقلان منفصلان عن بعضهما البعض. قد تعرض نيوتن في كتابة "برنسبيا" للحديث عن المكان المطلق والزمان المطلق. هذا المفهوم يستلزم وجود مناط إسناد ثابت يكون مرجعاً للحركة بالنسبة إليه. عند دراستنا لنظرية النسبية سنجد أنها تغلبت على هذا المفهوم وأوضحت بأنه لا يوجد مثل هذا الجهاز المطلق ولا ضرورة إليه حيث أن حركة الأجسام توصف فقط بالنسبة لبعضها البعض.

أحدثت نظرية النسبية الخاصة تغيرات جوهرية في أسس علم الميكانيكا الكلاسيكية (ميكانيكا نيوتن) وأدت إلى ظهور علم (الميكانيكا النسبية).

في أواخر القرن التاسع عشر سيطرت فكرة وجود وسط عالمي، سمي الأثير، يملاء الفراغ الكوني، كان يُعتقد بأن موجات الضوء تنتشر خلال هذا الوسط. من خلال دراستنا سنري أن نظرية النسبية تخلصت من هذه المعضلة "الأثير"، وأيضاً سنتعرض خلال دراستنا لظاهرتي انكماش الطول وتمدد الزمن. من نتائج النسبية معادلتها الكتلة بالطاقة وأصبح بالامكان حساب الطاقة التي تحتويها أي كمية من المادة. أيضاً تطرقت النظرية إلى الأجسام التي ليس لها كتلة وهي في حالة السكون (كتلة سكونية) ومع ذلك فيمكن حساب طاقتها واندفاعها.

1.1. تجربة ميكلسون ومورلي

Morley Experiment &Michelson

عزيزي الدارس ،،

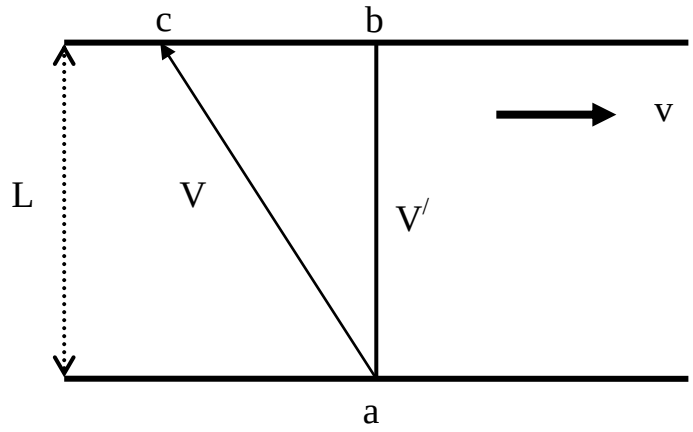
أجرى العالمان ميكلسون ومورلي تجربة لدراسة أثر حركة الأرض عبر الفضاء في سرعة الضوء المقاسه على سطحها. كان الاعتقاد السائد وجود ماده شفافة تسمي الأثير تملأ الفراغ .

من المعلوم أن الأرض تدور حول نفسها دورة واحدة كل 24 ساعة وتجري في فلكها من حول الشمس بسرعة تقدر بنحو $30\ km.s^{-1}$ وهذا يستلزم هبوب "رياح أثيرية " على سطحها. تتلخص تجربة ميكلسون ومورلي في قياس الزمن الذي يستغرقه الضوء فى رحلته الدائرية عندما ينتشر فى اتجاه الرياح الأثيرية (المفترضة) ثم فى رحلة مشابهة عندما ينتشر في اتجاه متعامد عليها. لتقريب فهم هذه التجربة للأذهان سوف نستعرض مسألة " القارب فى النهر " في هذا المثال ندرس حركة قارب يقوم برحلتين يعود في نهايتها إلى نقطة البداية.

عزيزي الدارس ، لندرس اولاً الحالة لتي يقوم فيها برحله على طول النهر ثم بعد ذلك ننتقل إلى الحالة التي يقوم فيها برحلة بعرض النهر . من الواضح ان القارب في الحالة الأولي يجري خلال رحلة الذهاب مع التيار فى النهر وتكون محصلة سرعتة هى ($V + v$) حيث V هي سرعة القارب بالنسبة للماء و v هي سرعة جريان الماء في النهر . عندما يعود القارب فإنه يجري ضد التيار وتكون محصلة سرعته في هذه الحالة هي $(V - v)$. بفرض ان المسافة بين نقطة البداية ونقطة الرجوع هي (L) فإن الوقت اللازم للعودة (t_1) يساوي :

$$t_1 = \frac{L}{V+v} + \frac{L}{V-v} = \frac{2L/V}{1-v^2/V^2} \qquad (1.1)$$

عند دراستنا لحالة القارب الذي يعبر النهر عرضياً شكل (1.1) نفرض أنه يبدأ رحلته من النقطة (a) ليصل النقطة (b) على عرض النهر مباشرة ، نستنتج انه على القارب ان ينحرف قليلاً في بداية خط سيره ضد التيار حتي يعوض ما يحدثه له التيار من ازاحة فى اتجاه انسيابه .



الشكل (1.1) : مسألة القارب الذي يعبر النهر بسرعة V من النقطة (a) إلى النقطة (b) ، (L) هو عرض النهر و v سرعة جريان الماء في النهر .

من الشكل (1.1) نجد أن

$$V^2 = V'^2 + v^2 \qquad (2.1)$$

$$V' = V\sqrt{1 - v^2/V^2} \qquad (3.1)$$

حيث V' هي محصلة السرعة ، عليه فإن الزمن اللازم (t_2) لحركة القارب من النقطة (a) مره أخرى يعطي بالآتي:

$$t_2 = \frac{2L/V}{\sqrt{1 - v^2/V^2}} \qquad (4.1)$$

لكي تتمثل امامنا بوضوح تجربة ميكلسون ومورلي عزيزي الدارس ، فإننا سوف نستبدل النهر الجاري بالرياح الأثيرية v ونستبدل سرعة القارب المتحرك بسرعة أمواج الضوء c ،

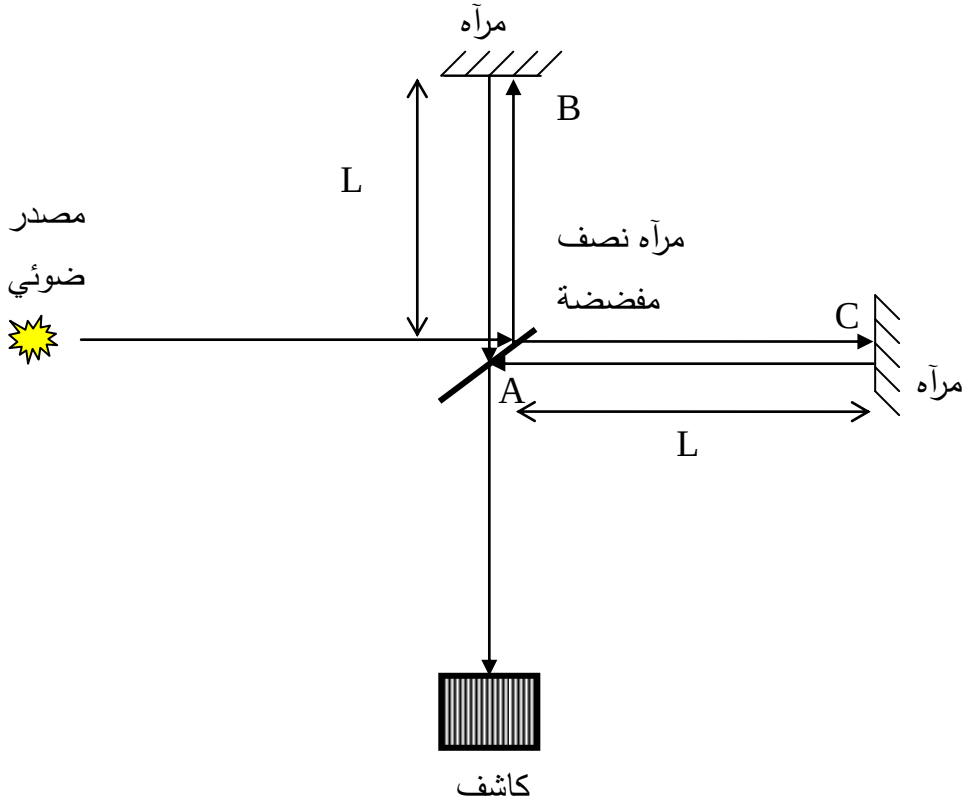
عليه فإن الزمن المستغرق من النقطة (a) إلى النقطة (b) والعودة إلى النقطة (a) يعطي من المعادلتين (1.1) ،(4.1) على التوالي

$$t_1 = \frac{2\ L/c}{(1-\ v^2/c^2)} \qquad (5.1)$$

$$t_2 = \frac{2\ L/c}{\sqrt{1-\ v^2/c^2}} \qquad (6.1)$$

حيث (v) تمثل سرعة الأثير و(c) هي سرعة الضوء في الفراغ.

بالنظر الي الشكل(2.1) إذا سقطت حزمة ضوئية من المصدر الضوئي على المرآة نصف المفضضة انعكست الحزمتان مره أخرى بواسطة المرآتين المستويتين والموضوعتين على بعدين متساويين من المركز . عند وصول الحزمتان إلى المرآة المفضضة نفذ جزء من الشعاع المرتد من المرآة (C)، بعد ذلك سار الشعاعان ووصلا الكاشف. تمت دراسة نمط التداخل في الكاشف ولم يلاحظ أي تغير عليه في حالة إدارة الجهاز في عدة اتجاهات ، عليه فليس هنالك أي تغير في t_1 و t_2 . النتيجة المستخلصة من هذه التجربة هي ان سرعة الضوء ثابتة في جميع الاتجاهات ، هذا الاستنتاج أدى إلى استبعاد فكرة الأثير نهائياً.



الشكل(2.1) جهاز ميكلسون وهو يبين مسارات أشعة الضوء .

يظهر الشعاعان المنعكسان من المرآتين وقد أزيح كل منهما قليلاً وذلك لتوضيح الرسم. نشير الى ان جهاز ميكلسون للتداخل يدرس عادةً عند "دراسة حيود الضوء".

2.1 فرضا النسبية الخاصة

The Postulates of the Special Theory of Relativity

عزيزي الدارس ،

أما في العام 1905 قام العالم اينشتاين بوضع الفرضين التاليين لمعالجة قصور نسبية جاليليو ولتأكيد نتائج تجربة ميكلسون ومورلى

1. تتخذ القوانين والمبادئ الفيزيائية نفس شكلها الرياضي عندما يُعبر عنها في محاور أي من نظم الإسناد القصورية.
2. سرعة الضوء في الفراغ ثابتة بالنسبة لكل المراقبين بغض النظر عن حالتهم من السكون أو الحركة بالنسبة لمصدر الضوء .

تُعرف محاور الإسناد القصورية inertial frame of reference

بأنها تلك المحاور التي يتحقق فيها قانون نيوتن الأول. أي إنها هي تلك المحاور التي تتحرك بسرعة ثابتة فى خط مستقيم بالنسبة إلى بعضها البعض.

الفرض الأول يعني أنه إذا كنا ندرس ظاهرة فيزيائية في نظام الإسناد (s) وتحصلنا على صيغة رياضية لوصفها مثلاً

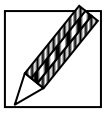
$$Z = X\,Y \qquad (7.1)$$

فإن المراقب (O') الموجود في نظام الإسناد (s') ومتحرك بسرعة ثابتة (v) بالنسبة للنظام (s) عند دراسته لنفس الظاهرة سوف يستتبع القانون التالي:

$$Z' = X' \; Y' \tag{8.1}$$

بعد استخدامه لمجموعة تحويلات تربط ما بين متغيرات الفضاء والزمان في نظام الإسناد (s) ونظام الإسناد (s').

تدريب(1)



لقد قام العالمان ميكلسون ومورلي بدراسة أثر حركة الأرض عبر الفضاء في سرعة الضوء المقاسه على سطحها ؛ ناقش ذلك بوضوح ، مع توضيح المعادلات الخاصة بذلك .

أسئلة تقويم ذاتي

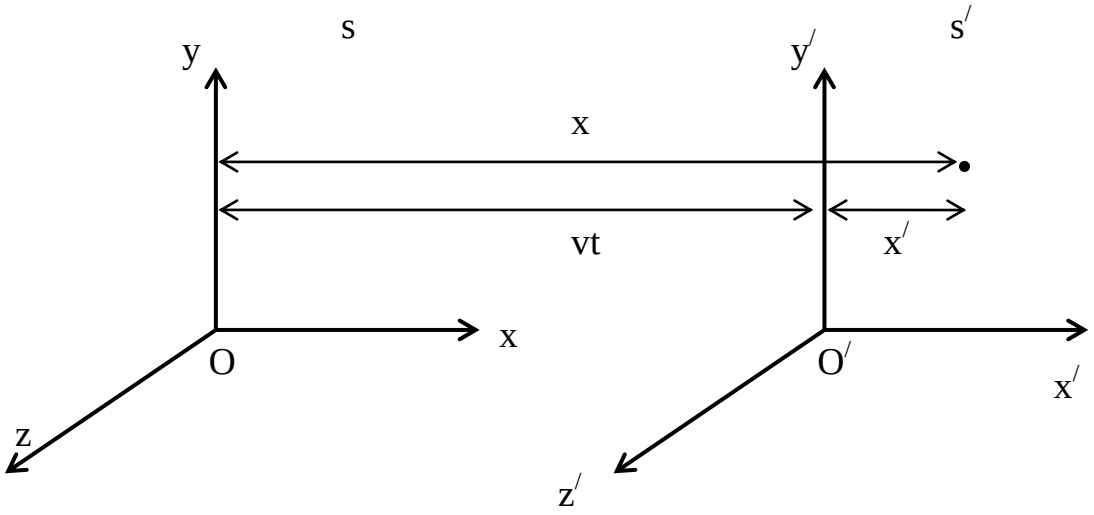
1. اشرح تجربة ميكلسون ومورلي .
2. اذكر فروض النسبية الخاصة .
3. عرف محاور الإسناد القصورية .

3.1 تحويلات جاليليو The Galilean Transformation

الآن عزيزي الدارس ،

لتحديد موضع جسم في القضاء (space) نستخدم نظام إسناد ينسب موضع الجسم بالنسبة إليه، مثلاً نظام الإحداثيات الثلاثية المتعامدة (الكارتيزية) (x, y, z) ويضاف إليه الزمن (t) عند الحديث عن حركة الجسم وعندها تسمي بالإحداثيات الرباعية (x, y, z, t).

يوضح الشكل (3.1) نظام الإسناد (s) الذي نحتاجه لوصف أي حدث من خلال الإحداثيات (x, y, z, t). أيضاً يمكن وصف نفس الحدث من خلال نظام الاسناد (s') بالإحداثيات (x', y', z', t') والذي يتحرك بسرعة ثابتة (v) بالنسبة للنظام (s) في الاتجاه الموجب لمحور (x). أيضاً كما يلاحظ من الشكل أن المحاور المتناظرة تكون متوازية.



شكل(3.1): نظاما إسناد (s) و(s') يتحركان بالنسبة إلى بعضهما بسرعة ثابتة v.

نفرض أنه يوجد مراقب (O) في النظام (s) ومراقب آخر (O') في النظام (s'). كل واحد من المراقبين يحمل ساعة لقياس الزمن الذي يبدأ عندما تكون نقطتا الأصل للنظامين منطبقتان أي عند $t = t' = 0$. الآن لوصف أي حدث فسوف نجد أن موضع الحدث (x) كما يقيسه المراقب (O) يزيد عن (x' الذي يقيسه المراقب (O') بمقدار المسافة بين النظامين (vt) أي أنه

$$x = x' + vt$$

إذن يمكن أن يعبر عن العلاقة التي تربط ما بين الإحداثيات (x, y, z, t) و (x', y', z', t') كالآتي

$$\left.\begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= t \end{aligned}\right\} \qquad (9.1)$$

أو بالعلاقة العكسية :

$$\left.\begin{aligned} x &= x' + vt \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= t' \end{aligned}\right\} \qquad (10.1)$$

مجموعة المعادلات (9.1) تسمي تحويلات جاليلو والأخرى (10.1) هي تحويلات جاليلو العكسية.

تحويلات السرعة تأخذ الشكل

$$\left.\begin{aligned} \frac{dx'}{dt'} &= v'_x = v_x - v \\ \frac{dy'}{dt'} &= v'_y \\ \frac{dz'}{dt'} &= v'_z \end{aligned}\right\} \qquad (11.1)$$

يمكن استخدام تحويلات جاليليو لوصف حركة الأجسام التي لا تتحرك بسرعات عالية. تعارضت هذه المعادلات مع النظرية الكهرومغناطيسية للضوء، مثلاً نجد أن القوة المؤثرة على شحنة كهربائية مقاسة بواسطة المراقب (O) في النظام (s) تكون مختلفة عما يقيسه المراقب (O') في نظام الإسناد (s').

هذا يعني أن قوانين الكهرومغناطيسية لا تأخذ نفس الشكل الرياضي في نظم الإسناد التي تتحرك بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضها البعض ، لقد إتضح بأن تحويلات جاليلو لا تتسق مع فرضا اينشتاين حيث ان سرعة الضوء في الفراغ لن تظلّ ثابتة وايضاً قوانين ومبادئ الفيزياء سوف لن تحتفظ بنفس شكلها الرياضي، عليه فقد كانت الحاجة ماسة لنوع آخر من التحويلات ينسجم مع فرضي اينشتاين.

4.1 تحويلات لورنتز The Lorentz Transformation

إستخدم اينشتاين فرضي النسبية للحصول على تحويلات لورنتز والنتائج المتحصلة أثبتت صحة الفرضين. لندرس معادلة الموجة الكروية في نظاما الإسناد (s) و(s') والذي يتحرك بسرعة ثابتة (v) في اتجاه موازي لمحور (x). معادلة الموجة التي سرعتها c معبراً عنها في النظام (s') تعطي بالآتي:

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2 = 0 \qquad (12.1)$$

أما بالنسبة لمراقب متواجد في النظام (s) فإن معادلة الموجة تأخذ التعبير التالي:

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t = 0 \qquad (13.1)$$

يلاحظ من المعادلتين أن الموجة لها نفس الشكل الرياضي مما يحقق الفرض الأول في النسبية، إضافة إلى ذلك فإن سرعة الضوء في الفراغ (c) لم تتغير في المعادلتين وهذا هو فرض النسبية الثاني.

باستخدام المعادلتين (12.1) و (13.1) يمكن كتابة

$$x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2t'^2 \qquad (14.1)$$

لتحويل أي من المعادلتين (12.1) و(13.1) إلى الأخرى يجب الحصول على تحويل يربط بين المتغيرات (x, y, z) و (x', y', z'). إفترض اينشتاين علاقات خطية بين المتغيرات (للحركة في اتجاه x) بحيث أن:

$$x' = \alpha_1 x + \alpha_2 t \qquad (15.1)$$

$$t' = \beta_1 x + \beta_2 t \qquad (16.1)$$

حيث $\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ ثوابت .

بفرض أنه عند $x' = 0$ في نظام الإسناد (s′) فإن x = vt، باستخدام هذا الشرط في المعادلة (15.1) نجد أن:

$$\alpha_2 = -\alpha_1 v \qquad (17.1)$$

بالتعويض في معادلة (15.1) ينتج:

$$x' = \alpha_1 x - \alpha_1 vt$$

$$x' = \alpha_1 (x - vt) \qquad (18.1\ )$$

بإدراج المعادلتين(16.1) (18.1) في المعادلة (12.1) نجد:

$$\alpha_1^2(x-vt)^2+y^2+z^2=c^2(\beta_1 x+\beta_2 t)$$

بعد الترتيب نجد أن :

$$(\alpha_1^2-c^2\beta_1^2)x^2+y^2+z^2=c^2(\beta_2^2-\alpha_1^2v^2)t^2+2xt(\alpha_1^2v-c^2\beta_1\beta_2) \quad (19.1)$$

بمقارنة المعاملات للمعادلتين(13.1) و(19.1) يتضح أن :

$$\alpha_1^2-c^2\beta_1^2=1 \quad (20.1)$$

$$c^2\beta_2^2-\alpha_1^2v^2=c^2 \quad (21.1)$$

$$\alpha_1^2v+c^2\beta_1\beta_2=0 \quad (22.1)$$

بحل المعادلات الثلاث الأخيرة نحصل على:

$$\alpha_1=\beta_2=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (23.1)$$

$$\beta_1=-\frac{v}{c^2}\alpha_1=\frac{-\frac{v}{c^2}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \quad (24.1)$$

تصبح معادلة (18.1) كالآتى

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (25.1)$$

ونحصل على تحويل الزمن بالتعويض في معادلة (16.1)

$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (26.1)$$

عليه فإن مجموعة تحويلات لورنتز للحركة في اتجاه (x) تكتب كالآتي

$$\left.\begin{aligned} x' &= \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t' &= \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}\right\} \qquad (27.1)$$

أما تحويلات لورنتز العكسية فهي

$$\left.\begin{aligned} x &= \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \\ y &= y' \\ z &= z' \\ t &= \frac{t' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \end{aligned}\right\} \qquad (28.1)$$

حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ ($c = 3\times10^8 m.s^{-1}$) . لاحظ انه في حالة السرعات المنخفضة بالنسبة إلى سرعة الضوء في الفراغ فإن تحويلات لورنتز تؤول إلى تحويلات جاليلو

أسئلة تقويم ذاتي

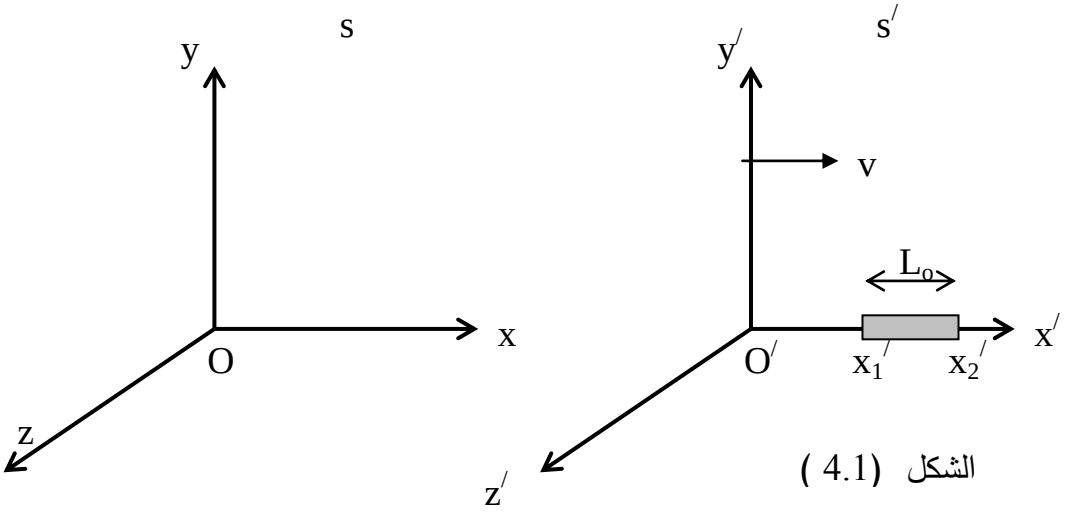
1. كيف تتحصل على تحويلات جاليلو والتحويلات العكسية لجاليلو.
2. ناقش هذه العبارة تحويلات جاليلو لا تتسق مع فرضا اينشتاين
3. ناقش تحويلات لورنتز.
4. وضح كيف إستخدم اينشتاين فرضا النسبية للحصول على تحويلات لورنتز .
5. إستنتج المعادلة (28.1) من المعادلة (27.1).

5.1 انكماش الطول Length contraction

عزيزي الدارس ،

لدراسة انكماش الطول نفرض أن لدينا قضيب طوله (L_o) مقاساً في نظام الإسناد (s') كما موضح في الشكل التالي المراقب (Observer) في نظام الإسناد (s') سيجد طول القضيب مساوياً

$$L_o = x_2' - x_1' \qquad (29.1)$$



الشكل (4.1)

ما هو طول القضيب بالنسبة لمراقب آخر(O) موجود في نظام الإسناد s ؟

لاحظ ان نظام الإسناد (s') يتحرك بسرعة ثابتة (v) في الاتجاه الموجب لمحور (x) .

من الواضح بالنسبة للمراقب (O) ان طول القضيب (L) يعطي من

$$L = x_2 - x_1 \qquad (30.1)$$

حتي نوجد العلاقة بين (L_o) و (L) لابد من استخدام تحويلات لورنتز معادلة(27.1)

$$x_1^{/} = \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$x_2^{/} = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\therefore L_o = \frac{x_2 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{x_1 - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$= \frac{x_2 - x_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{L}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

أي ان

$$\boxed{L = L_o \sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (31.1)$$

بما ان $v < c$ فإن قيمة الجذر التربيعي في المعادلة(31.1) تكون دائماً اصغر من الواحد الصحيح ، هذا يعني ان طول القضيب مقاساً في نظام الإسناد (s) يكون دائماً اصغر من طوله في النظام (s')، أي انه حدث انكماش للطول.الانكماش هو انكماش نسبى يحدث فى اتجاه الحركة النسبية.

◄◄ مثال (1)

أحسب طول مسطره مترية متحركة بسرعة تساوى 90% من سرعة الضوء في الفراغ.

الحل

باستخدام معادلة انكماش الطول

$$L = L_o \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

$$\frac{v}{c} = 90\% = 0.9$$

$$\sqrt{1 - v^2/c^2} = \sqrt{1 - (0.9)^2} = 0.436$$

$$\therefore L = (1)\ (0.436) = 0.436\ m$$

أي ان طول المسطرة المترية انكمش (تقلص) إلى أقل من النصف .

مثال (2)

أحسب الانكماش في الطول الذي يحدث لجسم يتحرك في اتجاه محور (x) بسرعة 0.99 c ، حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ .

الحل

$$L = L_o\sqrt{1-v^2/c^2}$$

$$\frac{L}{L_o} = \sqrt{1-(0.99)^2} \quad = 0.141$$

$$\therefore \frac{L}{L_o}\times 100 \quad = \quad 14.1\%$$

6.1 تمدد الزمن The Time Dilation

عزيزي الدارس ،

بالنظر إلى معادلات تحويل لورنتز (27.1)، نجد أن الزمن نسبي وهذا يعني أن الفترة الزمنية الفاصلة بين حدثيين تختلف باختلاف حركة المراقب الذي يقوم بقياسها. لتوضيح الصورة أكثر نفترض أنه تم رصد حدث في نظام الإسناد (s') وكانت لحظة بدايته بالنسبة للمراقب (O') هي (t_1') ولحظة نهايته هي (t_2'). أما بالنسبة للمراقب (O) فإنه يقيس (t_1) و(t_2) ويمكن الحصول عليهما باستخدام تحويلات لورنتز العكسية (1.28) كالآتي

$$t_1 = \frac{t_1' + \frac{v}{c^2}x'}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (32.1)$$

وبنفس الطريقة نجد t_2

المراقب (O') يحسب الفترة الزمنية لتكون

$$t_o = t'_2 - t'_1 \qquad (33.1)$$

اما بالنسبة للمراقب الآخر (O) فسوف يجد :

$$t = t_2 - t_1 \qquad (34.1)$$

بالتعويض عن قيم (t_1) و (t_2) يمكن الحصول على (t)

$$t = \frac{t'_2 + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \frac{t'_1 + \frac{v}{c^2} x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$= \frac{t'_2 - t'_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

أي إن العلاقة بين (t) و(t_o) تصبح

$$t = \frac{t_o}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (35.1)$$

عزيزي الدارس ،

هذه العلاقة يطلق عليها تمدد الزمن وهي تعني ان الفترة الزمنية (t) لساعة تتحرك بالنسبة لمراقب ستكون أطول من نفس الفترة الزمنية في حالة سكون الساعة بالنسبة للمراقب.

بمقارنة معادلات تحويل جاليليو ومعادلات تحويل لورنتز يظهر الفرق جلياً في تحويلات الزمن، فبينما افترض جاليليو أن الزمن مطلق وليس نسبي نجد باستخدام معادلات تحويل لورنتز أن الزمن نسبي وليس مطلقاً.

بينت التجارب أن الساعات الذرية تخضع لظاهرة تمدد الزمن أما بالنسبة لخلايا الجسم (الساعات البيولوجية) فإن كثير من العلماء يؤكدون بأن خلايا الجسم تخضع لنفس الظاهرة التي تحدث للساعات الذرية والجسيمات الأولية.

◄◄ مثال (3)

جسيم أولى غير مستقر هو الميون كتلته تزيد عن كتلة الإلكترون بحوالي 207 مرة وله نفس شحنة الإلكترون. يُنتج الميون على ارتفاع 15 كلم فوق سطح الأرض من تصادم الأشعة الكونية بالغلاف الجوي . سرعة الميون هي 0.998 من سرعة الضوء في الفراغ، متوسط العمر لهذا الجسيم في نظام إسناد ساكن بالنسبة له هو $2.2x10^{-6}s$ أحسب المسافة التي يقطعها الميون قبل أن يتحلل.

الحل

بالنسبة لمراقب (O) موجود على سطح الأرض (s) فإن الفترة الزمنية (t) التي يقيسها تخضع لظاهرة تمدد الزمن.

$$t = \frac{t_o}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2.2x10^{-6}s}{\sqrt{1-(0.998)^2}} = 3.5x10^{-6}s$$

عليه تكون المسافة التي يقطعها الميون هي

$$d = vt = (0.998)\times 3\times 108\times 3.5\times 10\text{-}6 = 10.5\ km$$

◄◄ مثال (4)

ساعة في نظام إسناد (S') يتحرك بالنسبة إلى نظام إسناد آخر (S) بسرعة ثابتة فى خط مستقيم مقدارها 60% من سرعة الضوء في الفراغ . المراقب (O') في نظام الإسناد (S') استخدم الساعة لحساب فترة زمنية بين حادثين فكانت $10\ min$ (دقيقة) . ما هي الفترة الزمنية بين الحادثين التي سيحسبها المراقب (O) المتواجد في نظام الإسناد (S)؟.

الحل

بالنسبة للمراقب (O')

$$t_o = t_2' - t_1' = 10 \ \min$$

إما بالنسبة للمراقب (O) فإن

$$t = t_2 - t_1$$

باستخدام معادلة تمدد الزمن فإن

$$t = \frac{t_o}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$= \frac{10 \ \min}{\sqrt{1-(0.6)^2}} = \frac{10}{0.8} = \underline{\underline{12.5 \ \min}}$$

أي أنه بالنسبة للمراقب (O) فإن الفترة الزمنية بين الحادثين زادت بمقدار .2.5 min.

◄◄ مثال(5)

سفينة فضائية تتحرك بالنسبة للأرض بسرعة (v) فإذا كان هنالك مراقباً على الأرض وقام بقياس الفترة الزمنية بين الساعة 1:00 والساعة 2:00 فوجد انها تساوي 3601s على ساعة مثبتة على جدار السفينة الفضائية. أوجد v .

الحل

الزمن على سطح الأرض $t_o = 3600 \ \ sec$

الزمن داخل السفينة الفضائية $t_o = 3601 \ \ sec$

$$t_o = \frac{t_o}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$1 - v^2/c^2 = \left(\frac{t_o}{t}\right)^2$$

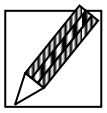
$$v = c\sqrt{1 - \left(\frac{t_o}{t}\right)^2}$$

$$= (3\times 108\ \text{m.s}^{-1})\sqrt{1 - \left(\frac{3600}{3601}\right)^2}$$

$$= 7.1\times 10^6\ \ \text{m.s}^{-1}$$

إذن فإن سرعة السفينة الفضائية هي $7.1\times 10^6\ \ \text{m.s}^{-1}$

تدريب(2)



1. من المثال(3) أحسب المسافة باستخدام قوانين الميكانيكا التقليدية.
2. تثبت ساعة في نظام إسناد (S') يتحرك بالنسبة إلى نظام إسناد آخر (S) بسرعة ثابتة فى خط مستقيم مقدارها 80% من سرعة الضوء في الفراغ . المراقب (O') في نظام الإسناد (S') استخدم الساعة لحساب فترة زمنية بين حادثين فكانت30 ثانية . ما هي الفترة الزمنية بين الحادثين التي سيحسبها المراقب (O) المتواجد في نظام الإسناد (S)؟.

أسئلة تقويم ذاتي

1. ما الفرق بين معادلات تحويل جاليليو ومعادلات تحويل لورنتز ؟
2. ماهي الساعات الذرية والساعات البيولوجية ؟

7.1 تحويلات السرعة في النسبية الخاصة

The Velocity Transformation of Special Relativity

عزيزي الدارس ،،

بفرض ان هنالك جسيماً يتحرك بالنسبة للناظمين (s) و (s′) فإن المراقب المتواجد في نظام الإسناد (s) سوف يحسب سرعة الجسم لتكون :

$$\left.\begin{aligned} V_x &= \frac{dx}{dt} \\ V_y &= \frac{dy}{dt} \\ V_z &= \frac{dz}{dt} \end{aligned}\right\} \qquad (36.1)$$

اما بالنسبة للمراقب المتواجد في النظام (s′) فسوف يعطي:

$$\left.\begin{aligned} V_x' &= \frac{dx'}{dt'} \\ V_y' &= \frac{dy'}{dt'} \\ V_z' &= \frac{dz'}{dt'} \end{aligned}\right\} \qquad (37.1)$$

بالرجوع إلى تحويلات لورنتز ، معادلة(27.1) فإن

$$dx' = \frac{dx - v\,dt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$dy' = dy$$

$$dz' = dz$$

$$dt' = \frac{dt - \frac{v}{c^2}\,dx}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

بالتعويض في معادلة (37.1) نجد أن

$$\left.\begin{aligned} V_x' &= \frac{v_x - v}{1-\frac{v}{c^2}V_x} \\ V_y' &= \frac{V_y\sqrt{1-v^2/c^2}}{1-\frac{v}{c^2}V_x} \\ V_z' &= \frac{V_z\sqrt{1-v^2/c^2}}{1-\frac{v}{c^2}V_x} \end{aligned}\right\} \qquad (38.1)$$

اما بالنسبة لتحويلات السرعة العكسية فتأخذ الشكل

$$\left.\begin{aligned} V_x &= \frac{v_x' + v}{1+\frac{v}{c^2}V_x'} \\ V_y &= \frac{V_y'\sqrt{1-v^2/c^2}}{1+\frac{v}{c^2}V_x'} \\ V_z &= \frac{V_z'\sqrt{1-v^2/c^2}}{1+\frac{v}{c^2}V_x'} \end{aligned}\right\} \qquad (39.1)$$

◄◄ مثال (6)

افرض ان لدينا شعاع من الضوء ينطلق في اتجاه محور (x) في نظام الإسناد (S) . أحسب سرعة الشعاع الضوئي بالنسبة لمراقب آخر متواجد في نظام الإسناد (S') والذي يتحرك بسرعة v في الاتجاه الموجب لمحور (x) .

الحل

المراقب في (S') سيقيس السرعة لتكون c أي ان $V_x' = c$

إما بالنسبة للمراقب في (S) فإن السرعة ستكون

$$V_x = \frac{V_x' + v}{1 + \frac{v}{c^2} V_x'}$$

$$= \frac{c + v}{1 + \frac{v}{c^2} c}$$

$$= c \frac{c(1 + v/c)}{(1 + v/c)}$$

$$= c$$

أي ان كل من المراقبين سوف يجد سرعة الشعاع الضوئي مساوية c وهذا يحقق الفرض الثانى فى نظرية النسبية (سرعة الضوء ثابتة بالنسبة لكل المراقبين).

◄◄ مثال (7)

تتحرك السفينة الفضائية (A) بسرعة 0.9 c بالنسبة للأرض (حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ) . إذا كانت هنالك سفينة فضائية أخري (B) تتحرك بسرعة 0.5 c بالنسبة للسفينة (A) وفي نفس اتجاه حركتها ، أحسب السرعة التي تتحرك بها السفينة (B) بالنسبة للأرض .

الحل

$$V_x' = 0.5\,c, v = 0.9c$$

$$V_x = \frac{V_x' + v}{1 - \frac{v}{c^2} V_x'}$$

$$= \frac{0.5\,c + 0.9\,c}{1 + (0.9c)(0.5c)}$$

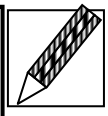
$$= \underline{\underline{0.97\,c}}$$

أي ان السرعة التي تتحرك بها السفينة الفضائية (B) بالنسبة للأرض تساوي $0.97c$ ، لاحظ انه في حالة استخدام تحويلات جاليلو للسرعات فإن سرعة السفينة (B) ستكون

$$0.9c + 0.5\,c = 1.4c > c$$

وهي إجابه غير مقبولة حيث انه لا يمكن لأي جسم مادي أن يتحرك بسرعة مساوية أو أكبر من سرعة الضوء .(أنظرفقرة: نسبية الكتلة وفقرة : العلاقة بين الطاقة والاندفاع).

تدريب(3)



1. من المعادلة (38.1)برهن انه في حالة $v << c$ فإن تحويلات السرعة النسبية تؤول إلى تحويلات جاليلو للسرعات أي ان :

$$V_x' = V_x - v$$

$$V_y' = V_y$$

$$V_z' = V_z$$

2.تتحرك السفينة الفضائية (A) بسرعة $0.9\ c$ بالنسبة للأرض (حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ) . إذا كانت هنالك سفينة فضائية أخري (B) تتحرك بسرعة $0.5\ c$ بالنسبة للسفينة (A) وفي نفس اتجاه حركتها ، أحسب السرعة التي تتحرك بها السفينة (B) بالنسبة للأرض .

أسئلة تقويم ذاتي

باستخدام (38.1) برهن العلاقات (39.1)

8.1 نسبية الكتلة Relativity of Mass

عزيزي الدارس ،،

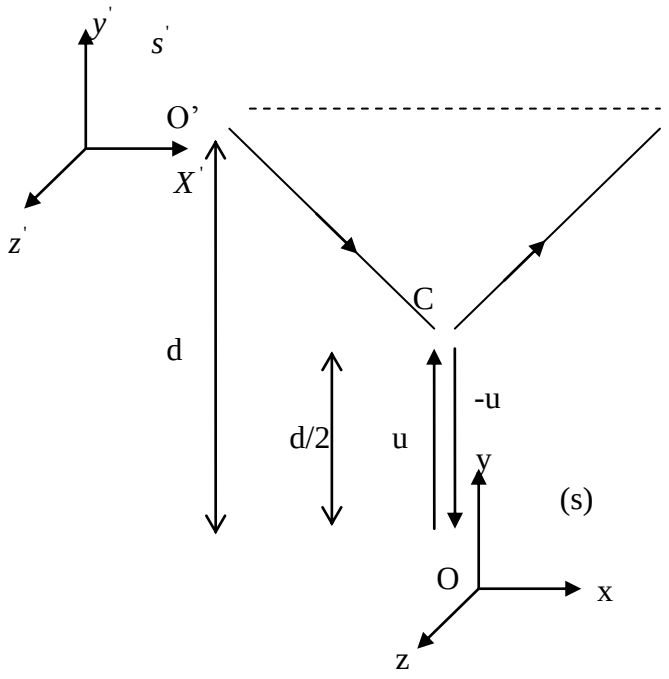
من قانون نيوتن الثاني للحركة نجد ان القوة F تساوي

$$F= \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(mv) \qquad (1.40)$$

حيث p هو الاندفاع، m كتلة الجسم و F القوة المؤثرة عليه. لاحظ أن مفهوم النسبية يتطلب عدم ثبات الكتلة واعتبارها دالة في سرعة الجسم أي أن

$$m = m(v) \qquad (1.41)$$

يمكن استنتاج علاقة نسبية الكتلة بدراسة تصادم كرتين. الكرة الأولى في نظام الإسناد (s) والثانية في نظام الإسناد (s') المتحرك بسرعة (v) في الاتجاه الموجب لمحور (x) وعلى بعد عمودي (d) من النظام (s).



الشكل(5.1): تصادم كرتين من وجهة نظر المراقب (O) المتواجد في النظام (s).

اولا: نفرض ان المراقب (O) في النظام (s) يقذف الكرة بسرعة (u) في الاتجاه الموجب لمحور (y) حيث ترتد بسرعة (-u) في الاتجاه السالب لمحور (y)، باعتبار أن التصادم مرن ، فإن زمن تحليق الكرة.

$$T_o = \frac{d}{2} \qquad (42.1)$$

ثانيا: المراقب (O') في النظام (s') يقذف الكرة في الاتجاه السالب لمحور (y) بسرعة (u)،لاحظ أنه نتيجة لحركة المراقب (O') بسرعة (u) بالنسبة للمراقب (O) فإن مسار الكرة بالنسبة للمراقب (O) سيكون في اتجاه (O'C) وتكون حركة سرعة الكرة في اتجاه (y) هي (-u'). تصطدم الكرتان عند النقطة (C) حيث ترتد كرة المراقب (O') بسرعة (+u')، بالنسبة للمراقب (O) فإن زمن تحليق الكرة الثانية سيكون

$$T = \frac{d}{u'} \qquad (43.1)$$

إما بالنسبة للمراقب (O') فإن كرته تكون في حالة سكون بالنسبة إليه وعليه فإن زمن التحليق المقاس بواسطته هو To. باسترجاع علاقة تمدد الزمن (معادلة (1.35)) فإن:

$$T = \frac{T_o}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad (44.1)$$

بتعويض (1.44) في (1.43) وباستخدام (1.42) نجد أن

$$u' = \frac{d}{T} = \frac{d}{T_o}\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = u\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \qquad (45.1)$$

لاحظ عزيزي الدارس ، أنه بسبب تمدد الزمن فإن المعادلة (1.45) تبين أن مركبة سرعة الكرة الثانية في اتجاه محور (y)، u′ ، تكون أصغر من (u)..بتطبيق قانون حفظ الاندفاع بالنسبة للمراقب (O) في اتجاه محور (y)، (الاندفاع الكلي قبل التصادم يساوي الاندفاع الكلي بعد التصادم)

$$m_o u - m u' = -m_o u + m u' \qquad (46.1)$$

$$m_o u = m u' \qquad (47.1)$$

لايجاد (u) نعوض u' من المعادلة (45.1)

$$m_o u = mu\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad (48.1)$$

ومنها

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} \qquad (49.1)$$

حيث m_o تسمي الكتلة السكونية (rest mass) و m هي كتلة الجسم المتحرك بسرعة (u) بالنسبة للمراقب، يطلق على m الكتلة النسبية (relativistic mass).

ملاحظات من المعادلة (49.1)نجد ان

- m>mo لأن المقدار $\left(1-\frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$ دائماً أكبر من الواحد الصحيح، بالتالي هذا يعني أن كتلة الجسم تزداد تبعاً لإزدياد سرعته.
- و عند السرعات المنخفضة أي أنه عند v<<c فإن $m \approx mo$.

من الواضح ان الكتلة تزداد بزيادة السرعة (v). لاحظ ان العلاقة (1.49) تؤكد حقيقة فيزيائية وهي انه لا يمكن لأي جسم مادى ان يتحرك بسرعة مساوية لسرعة الضوء في الفراغ ، حيث أنه عند $v=c$ فإن $m\to\infty$. أيضاً يمكن استنتاج ان الفوتون ليس له كتلة سكون.

◄◄ مثال (8)

أحسب الزيادة المئوية في كتلة جسم يتحرك بسرعة :

(i) 10% من سرعة الضوء في الفراغ.

(ii) 90% من سرعة الضوء في الفراغ.

الحل

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\frac{m}{m_o} = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

(i) $v = 0.1c$

$$\frac{m}{m_o} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{0.1\,c}{c})^2}} = 1.005$$

$$\frac{m - m_o}{m_o} \times 100 = (\frac{m}{m_o} - 1) \times 100 = 0.5\%$$

أي انه إذا تحرك جسم مادى بسرعة 10% من سرعة الضوء فإن الزيادة المئوية في كتلته تبلغ $0.5\ \%$

(ii) $v = 0.9\,c$

$$\frac{m}{m_o} = \frac{1}{\sqrt{1 - (\frac{0.9c}{c})^2}} = 2.29$$

$$\frac{m - m_o}{m_o} \times 100 = (\frac{m}{m_o}) \times 100 = \underline{\underline{129\ \%}}$$

هذه النتيجة تعني انه لجسم مادى متحرك بسرعة $90\ \%$ من سرعة الضوء فإن الزيادة المئوية في مقدار كتلته $129\ \%$.

◄◄ مثال (9)

ماهي السرعة التى يجب ان يتحرك بها جسم مادى لتصبح كتلته ضعف ما كانت عليه في حاله سكونه ؟

الحل

$$m = 2\, m_o$$

حيث m_o كتلة الجسم في حالة السكون

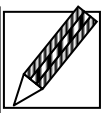
$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = 2\, m_o$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{4}$$

$$\frac{v}{c} = \frac{\sqrt{3}}{2} \quad ;$$

$$v = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 3 \times 10^8 \ \ m.s^{-1} = 0.87C$$

تدريب(4)



أحسب الزيادة المئوية في كتلة جسم يتحرك بسرعة :

(i) 20% من سرعة الضوء في الفراغ.

(ii) 80% من سرعة الضوء في الفراغ.

أسئلة تقويم ذاتي

1. قانون نيوتن الثاني للحركة
2. اذكر قانون حفظ الطاقة
3. وضح ان كتلة الجسم تزداد تبعاً لإزدياد سرعته
4. متي تكون الكتلة الكتلة السكونية (rest mass) مساويةً للكتلة النسبية (relativistic mass).

9.1. الاندفاع (كمية التحرك) في النسبية

Relativistic Momentum

عزيزي الدارس ،،

نجد ان الاندفاع (p)، في النسبية الخاصة ، لجسم مادى كتلته (m) يتحرك بسرعة (v) يعطي بالعلاقة التالية

$$p = mv = \frac{m_o v}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \qquad (50.1)$$

مثال (10)

تحرك إلكترون بسرعة $0.75\,c$ بالنسبة لمراقب ثابت. أحسب كتلة الإلكترون النسبية واندفاعه ، قارن بين الاندفاع النسبي بالاندفاع الكلاسيكي . علماً بأن كتلة الإلكترون السكونيه هي $9.1\times10^{31}kg$.

الحل

الكتلة النسبية

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{9.1\times10^{-31}\text{kg}}{\sqrt{1-(\frac{0.75\,c}{c})^2}} = 13.8\times10^{-31}\ \text{kg}$$

الاندفاع النسبي

$$p = mv = (13.8\times10^{-31}\text{kg})\ (0.75\times3\times10^{8}\ \text{m.s}^{-1}) = 3\times10^{-22}\ \text{kg. m.s}^{-1}$$

اما الاندفاع الكلاسيكي فهو

$$p_o = m_o v = (9.1\times10^{-31}kg)\ (0.75\times3\times10^{8}\ m.s^{-1}) = 2.0\times10^{-22}\ kg.\ m.s^{-1}$$

10.1 طاقة الحركة النسبية

Relativistic Kinetic Energy

لاحظنا في دراستنا السابقة ، عزيزي الدارس ، بأن الاندفاع وقوانين الحركة تحتاج إلى تعميم لتتناسب مع مبدأ النسبية . عليه فإن العلاقة بين الشغل (work) وطاقة الحركة (Kinetic energy) يجب تعميمها .

بفرض ان هنالك قوة مقدارها (F) تؤثر في جسيم كتلته السكونيه (m_o) وإزاحته لمسافة dx من (x_1) إلى (x_2) في فترة زمنية قدرها (t) في اتجاه محور (x) بحيث تصل السرعة النهائية للجسيم (v) فإن الشغل (W) الناتج يكون

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F \ dx \qquad (51.1)$$

باستخدام قانون نيوتن الثاني فإن القوة (F) يعُبر عنها بمعدل التغير في الاندفاع الخطى (p)

$$F = \frac{d\,p}{d\,t} \qquad (52.1)$$

$$W = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dp}{dt} \ dx$$

$$= \int v\, d\, p = \int \frac{d\, p}{d\, v} \ v\, d\, v \qquad (53.1)$$

حيث اننا استخدمنا $\frac{\mathrm{d\,x}}{\mathrm{d\,t}} = \mathrm{v}$

الاندفاع النسبى (p) من المعادلة (50.1)

$$\mathrm{p} = \mathrm{m\ v} = \frac{\mathrm{m_o\ v}}{\sqrt{1-\mathrm{v^2/c^2}}}$$

بتفاضل الاندفاع النسبى (P) بالنسبة للسرعة (v) ينتج

$$\frac{d\,p}{d\,v} = \frac{d}{d\,v}\left[\frac{m_o\,v}{\sqrt{1-v^2/c^2}}\right] = \frac{m_o}{(1-v^2/c^2)^{\frac{3}{2}}}$$

بالتعويض في المعادلة(28.1)

$$W = \int_o^v \frac{d\,p}{dv}\; v\,dv$$

$$= \int_o^v \frac{m_o}{(1-v^2/c^2)^{\frac{3}{2}}}\; v\,d\,v$$

$$W = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1-v^2/v^2}} - m_o c^2 \qquad (54.1)$$

أيضاً يمكن كتابتها

$$W = mc^2 - m_o c^2 \qquad (55.1)$$

عزيزي الدارس ،،

اذا اعتبرنا ان الجسم تحرك من السكون $(v=0)$ عند $(x=x_1)$ إلى (v) عند $(x=x_2)$. أيضاً استخدمنا معادلة الكتلة النسبية.

بما ان الشغل المبذول على جسم يساوى التغير في طاقة حركته (K) وبما ان طاقة الحركة الابتدائية للجسم تساوى صفراً $(v=0)$ فإن الشغل يكون مساوياً للطاقة الحركية للجسم أي ان

$$K = mc^2 - m_o c^2 = \Delta mc^2 \qquad (56.1)$$

من المعادلة السابقة ، عزيزي الدارس ، نجد ان

- الحد m_oc^2 لا يعتمد على السرعة (v) ولذلك يسمي هذا المقدار بالطاقة السكونيه (Rest – energy) للجسيم ويرمز لها بالرمز (E_o) .

- الكمية mc^2 والتى تعتمد على السرعه (v) هي الطاقة الكلية ويرمز لها الرمز (E). العلاقة السابقة تبين ان الكتلة شكل من اشكال الطاقة.

$$E = m\,c^2 = K + m_o c^2 = K + E_o \qquad (57.1)$$

أيضاً يمكن كتابة الطاقة الكلية للجسيم كالآتي

$$E = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (58.1)$$

مثال (11)

أحسب الطاقة المكافئه لواحد كيلو جرام من المادة .

الحل

طاقة السكون تُعطي من

$$\begin{aligned} E_o &= m_o c^2 \\ &= (1.0\ \text{kg})\,(3\times10^8\ \text{m.s}^{-1})^2 \\ &= \underline{\underline{9\times10^{16}\ \text{J}}} \end{aligned}$$

مثال (12)

برهن انه في حالة السرعات المنخفضة $(v << c)$ فإن طاقة الحركة لأي جسيم تؤول إلى التعبير الكلاسيكي ، أي ان $K = \frac{1}{2} m_o v^2$.

الحل

تعطي طاقة الحركة بالتعبير

$$\begin{aligned} K &= E - E_o \\ &= mc^2 - m_o c^2 \\ &= \frac{m_o c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_o c^2 \end{aligned}$$

باستخدام نظرية ذات الحدين يمكن التخلص من الحذر التربيعى ، لاحظ انه عندما تكون (x) مقداراً صغيراً جداً مقارنة بالواحد الصحيح أي ان $x<<1$ فيمكن استخدام التقريب.

$$(1+x)^n \simeq 1+n\,x$$

الآن يمكن كتابة $\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = (1-v^2/c^2)^{\frac{-1}{2}}$

$$\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \simeq 1+\frac{1}{2}\,\frac{v^2}{c^2}$$

بما ان $\frac{v}{c}<<1$ إذن

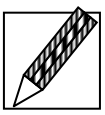
بالتعويض في معادلة طاقة الحركة

$$K \approx m_o c^2(1+\frac{1}{2}\,\frac{v^2}{c^2}) - m_o c^2$$

$$= m_o c^2 + \frac{1}{2}\, m_o v^2 - m_o c^o$$

$$= \frac{1}{2}\, m_o v^2$$

تدريب(5)



تحرك إلكترون بسرعة $0.70\,c$ بالنسبة لمراقب ثابت. أحسب كتلة الإلكترون النسبية واندفاعه ، قارن بين الاندفاع النسبي بالاندفاع الكلاسيكي . علماً بأن كتلة الإلكترون السكونيه هي $9.1\times10^{31}kg$.

11.1 الأجسام التى ليس لها كتلة سكون

Massless Particles

عزيزي الدارس،

لكي نوجد العلاقة التي تربط بين الطاقة الكلية (E) لجسم واندفاعه (p) نسترجع المعادلتان (58.1),(50.1)

$$P = \frac{m_o v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$E = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

بتربيع المعادلتين ينتج :

$$P^2 = \frac{m_o v}{1 - v^2 c^2} \quad ,$$

$$E^2 = \frac{m_o^2 \, c^4}{1 - v^2/c^2}$$

بضرب المعادلة الأولي في مربع سرعة الضوء أي (c^2) وطرحها من المعادلة الثانية نحصل على

$$E^2 - c^2 p^2 = m_o^2 c^4$$

أي ان

$$\boxed{E^2 = p^2 c^2 + m_o^2 c^4} \qquad (59.1)$$

إذن الطاقة الكلية (E) لجسيم بدلالة اندفاعه (p) عبارة عن

$$\boxed{E = \sqrt{p^2 c^2 + m_o^2 c^4}} \qquad (60.1)$$

المعادلة (60.1) تبين انه في حاله سكون الجسم $p = 0$ فإن طاقته الكلية (E) تساوى طاقته السكونيه $(E_o = m_o c^2)$.

بالتمعن في العلاقة (60.1) يظهر جلياً تنبؤ نظرية النسبية بوجود جسميات ليس لها كتلة سكون $m_o = 0$ ولكن لديها طاقة (E) واندفاع (p) . ومن امثلة هذه الجسيمات الفوتون (كم طاقة الاشعاع الكهرومغناطيسى). يمكن إستخدام هذه العلاقة لوصف الفوتون، أي ان طاقة الفوتون (E) واندفاعه (p) يرتبطان معاً كالآتي

$$\boxed{E = pc} \qquad (61.1)$$

12.1 وحدات مستخدمة للطاقة والاندفاع

Units for Energy & Momentum

عزيزي الدارس ،

لقد درج العلماء على استخدام وحدة الإلكترون – فولت (eV) بدلاً عن الجول (J) لطاقات الجسيمات الأولية .

يعُرف الإلكترون فولت بأنه

هو مقدار الطاقة الحركية لجسيم مشحون بشحنة مساوية لشحنة الإلكترون عندما يتحرك هذا الجسيم بين نقطتين فرق الجهد بينهما يساوي (1 V)

$$1\text{eV} = (1.6\times10^{-19}\,\text{C})(1\text{V}) = 1.6\times10^{-19}\,\text{J}$$

حيث e مقدار شحنة الإلكترون

في كثير من المسائل تُعطي الطاقة بمضاعفات الإلكترون– فولت مثل الميجا إلكترون فولت (MeV) والجيجا إلكترون فولت (GeV) حيث ان

$$1\ \text{MeV} = 10^{6}\ \text{eV}$$
$$1\,\text{GeV} = 10^{9}\ \text{eV}$$

الوحدات القياسية المستخدمة للاندفاع هي kg.m.s^{-1} ، اما في النسبية الخاصة فيمكن استخدام MeV/c كوحدة للاندفاع ، حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ . بالامكان استنتاج هذه الوحدة للاندفاع بالرجوع للمعادلة (60.1) وكتابتها على الصورة التالية

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{C}}$$

◄◄ مثال (13)

ما هي طاقة الإلكترون السكونيه (E_o) مُعبراً عنها بالميجا إلكترون – فولت (MeV) علماً بان كتلة الإلكترون السكونيه تساوى $9.1\times10^{-31}\,kg$

الحل

طاقة السكون لجسم كتلته m_o تساوى

$$E_o = m_o c^2$$
$$= (9.1\times10^{-31}\ kg)\,(3\times10^{8}\ m.s^{-1})^2$$
$$= 8.1\times10^{-14}\ J$$

باستخدام التحويل بين الجول والإلكترون– فولت

$$E_o = \frac{8.1\times10^{-14}\ J}{1.6\times10^{-19}\ J/eV}$$
$$= 0.511\times10^{6}\ eV$$
$$= \underline{\underline{0.511\ \ MeV}}$$

◄◄ مثال (14)

انشطر جسم ساكن إلى جسيمين كتلة كل منهما $1.0\ kg$. تحرك الجسيمان بعيداً عن بعضهما بسرعة $0.6\,c$ بالنسبة للجسم الأصلي . ما هي كتلة الجسم الأصلي؟

الحل

طاقة السكون للجسم الأصلي يجب ان تساوى مجموع طاقتي الجسيمين ، إذن :

$$E_o = M_o c^2 = \frac{2\,m_o c^2}{\sqrt{1-v^2c^2}}$$

$$M_o = \frac{2\ (1.0\ kg)}{\sqrt{1-(0.6)^2}} \qquad = \underline{\underline{2.5\quad kg}}$$

أسئلة تقويم ذاتي

1. اثبت ان الطاقة الكلية (E) لجسيم بدلالة اندفاعه (p) تعطي بالعلاقة التالية

$$E = \sqrt{p^2c^2 + m_o^2c^4}$$

ثم بين انه في حاله سكون الجسم فإن طاقته الكلية (E) تساوى طاقته السكونيه فقط

2. انشطر جسم ساكن إلى جسيمين كتلة كل منهما 1.0 kg . تحرك الجسيمان بعيداً عن بعضهما بسرعة 0.6 c بالنسبة للجسم الأصلي . ما هي كتلة الجسم الأصلي؟

الخلاصة

عزيزي الدارس,

في النهاية، نؤكد على ما أكدناه في البداية عن ضرورة تقويم هذه الوحدة، وإبداء ملاحظاتك للاستفادة منها. ولكن ما الذي ناقشناه ؟

شرحنا تجربة ميكلسون ومورلي و فشل جميع التجارب التي أجريت لإيجاد السرعة المطلقة للأرض بالنسبة للأثير. لقد نجحت النسبية في إلغاء فكرة الأثير وأثبات انه لا وجود له. و يقول اينشتاين إننا نستطيع فقط الحديث عن حركة أي جسم مادى بالنسبة إلى جسم آخر أو الى نظم إسناد بالنسبة إلى نظم أخرى.

ثم انتقلنا الي تحويلات جاليلو و تحويلات لورنتز و انكماش الطول وتمدد الزمن وايضا تحويلات السرعة في النسبية الخاصة ونسبية الكتلة ومعرفة ما هو الاندفاع في النسبية الخاصة ثم علاقة الكتلة بالطاقة. ثم عرفنا ماذا نعني بالاجسام التى ليس لها كتلة وكذلك الوحدات المستخدمة للطاقة والاندفاع .

ومع نهاية هذا القسم الاخير نكون قد انهينا هذه الوحدة، ونأمل أن تكون قد أضافت الكثير إلى معلوماتك الثرة وان تسعد بالوحدة القادمة إنشاء الله.

لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية

عزيزي الدارس، بعد أن فرغت من دراسة هذه الوحدة الآن، أصبح لديك حصيلة كبيرة من المعلومات المفيدة

الان سوف سنقل الي الوحدة الثانية و سوف نستعرض الطبيعة الجسيمية. نرجو إن تكون وحدة مفيدة لك وان تساهم معنا في نقدها وتقييمها.

إجابات التدريبات

التدريب(1)

الاجابة ارجع لتجربة ميكلسون ومورلي

التدريب(2)

1. الإجابة $d = 660m$

2. الاجابة ارجع للمثال (4)

التدريب(3)

1. الاجابة : بالتعويض في المعادلة (38.1)عن السرعة =0 نتحصل على المعادلات السابقة

$$V_x^{/} = V_x - v$$

$$V_y^{/\cdot} = V_y$$

$$V_z^{/} = V_z$$

2. الحل راجع مثال (7)

التدريب(4)

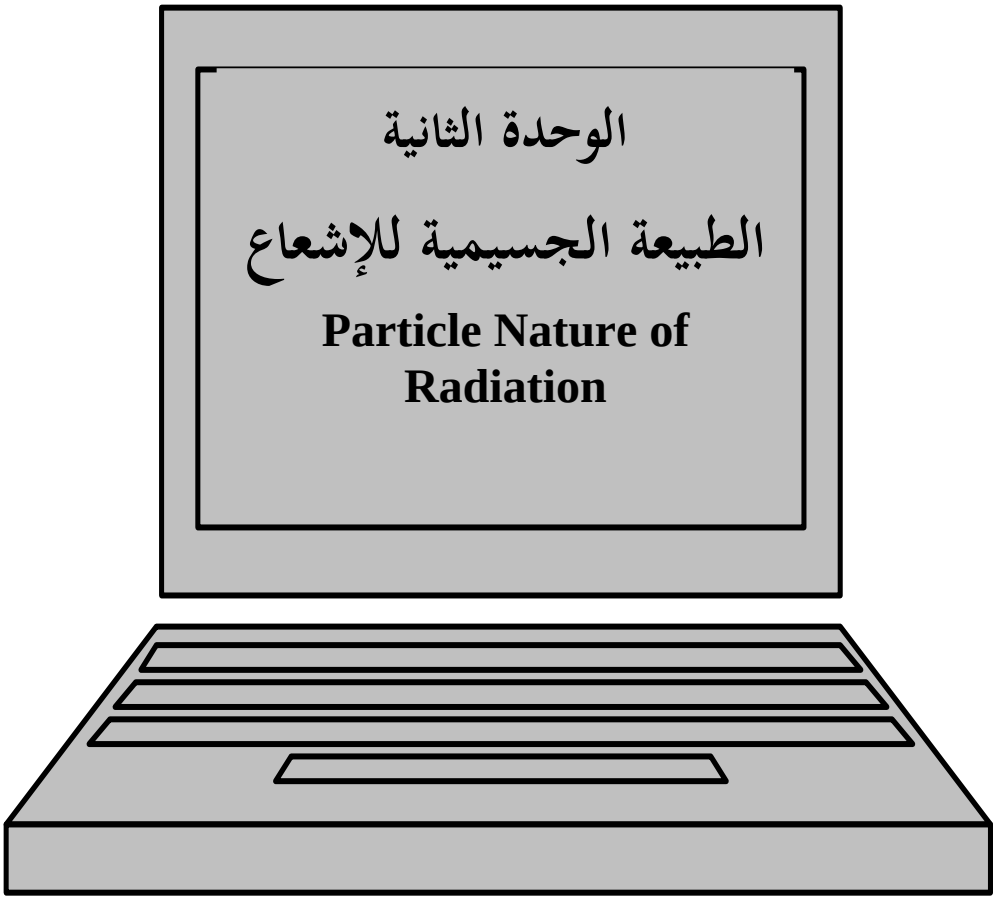
الاجابة راجع المثال (8)

التدريب(5)

راجع المثال (10)

مسرد المصطلحات

The special theory of relativity	نظرية النسبية الخاصة
Michelson – Morley Experiment	تجربة ميكلسون ومورلي
The Postulates of the Special Theory of Relativity	**فروض النسبية الخاصة**
The Galilean Transformation	تحويل جاليليو
The Lorentz Transformation	تحويل لورنتز
Length contraction	انكماش الطول :
The Time Dilation	تمدد الزمن
The Velocity Transformation of Special Relativity	تحويل السرعة في النسبية الخاصة
Relativity of Mass	نسبية الكتلة
Relativistic Momentum	الاندفاع (كمية التحرك) في النسبية
Relativistic Kinetic Energy	طاقة الحركة النسبية
Massless Particles	الاجسام التى ليس لها كتلة سكون
Units for Energy & Momentum	وحدات مستخدمة للطاقة والاندفاع


الوحدة الثانية
الطبيعة الجسيمية للإشعاع
Particle Nature of Radiation

محتويات الوحدة الثانية

الموضوع	الصفحة
مقدمة	49
تمهيد	49
أهداف الوحدة	50
2.الطبيعة الجسيمية للإشعاع	51
1.2. شعاع الجسم الأسود .	51
2.2. نظرية رايلي – جينز .	53
3.2. نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع	56
4.2. تفاعل الاشعاع مع المادة	61
1.4.2.التأثير الكهروضوئي	61
2.4.2. نظرية اينشتاين الكمية حول التأثير الكهروضوئي	66
3.4.2. أثر (ظاهرة) كومبتون	69
4.4.2. إنتاج الزوج	75
الخلاصة	79
لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية	79
إجابات التدريبات	80
مسرد المصطلحات	81

مقدمة

تمهيد

عزيزي الدارس,

مرحباً بك إلى الوحدة الثانية من مقرر الفيزياء الحديثة وهي بعنوان الطبيعة الجسيمية للإشعاع و تتألف من اربعة أقسام رئيسية. حيث نتعرف في القسم الأول على إشعاع الجسم الأسود، أما القسمان الثاني والثالث فيتضمنان دراسة نظرية رايلي – جينز وايضا نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع .

و في القسم الأخير سنتناول تفاعل الاشعاع مع المادة وهذا ينقسم الي اربعة اجزاء اولا التأثير الكهروضوئي ثم نظرية اينشتاين الكمية حول التأثير الكهروضوئي ثم أثر (ظاهرة) كومبتون واخيراً إنتاج الزوج .

وقد ذيلنا هذه الوحدة بسرد شامل للمصطلحات العلمية التي وردت في النص الرئيسي، كما حرصنا في هذه الوحدة على وضع أسئلة تقويم ذاتي، وتدريبات كفيلة بتلبية احتياجاتك التعليمية والتي تقدمها لمرشدك الميداني.

عزيزي الدارس،،

أهلاً بك مرة أخري إلي هذه الوحدة ونرجو أن تستمتع بدراستها وأن تستفيد منها وأن تشاركنا في نقدها وتقييمها.

أهداف الوحدة

عزيزي الدارس،،

بعد فراغك من دراسة هذه الوحدة يتوقع منك أن تكون قادراً علي أن:

1. تفهم أهمية دراسة إشعاع الجسم الأسود .
2. تعرف نظرية رايلي – جينز .
3. تستطيع ان توضح نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع .
4. تتقن تفاعل الاشعاع مع المادة .
5. تقارن بين التأثير الكهروضوئي و أثر (ظاهرة) كومبتون ثم إنتاج الزوج .
6. تحل مسائل الطبيعة الجسيمية للإشعاع .

2. الطبيعة الجسيمية للإشعاع

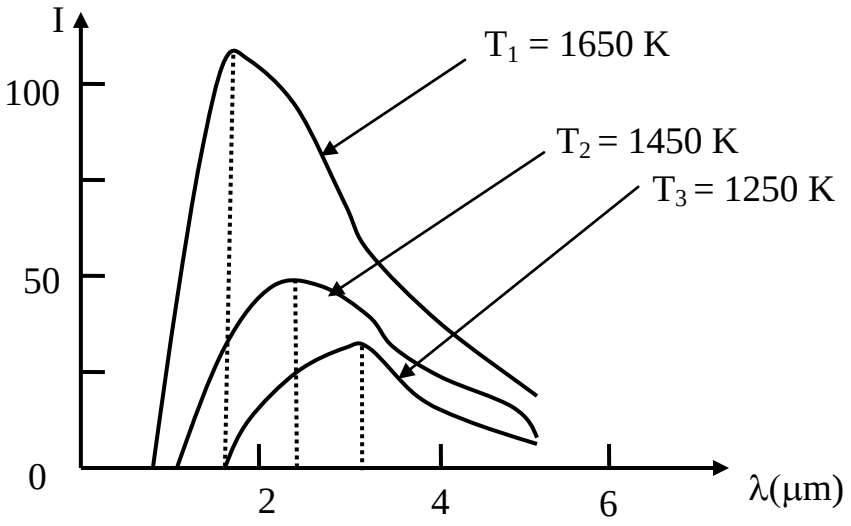
عزيزي الدارس ،،

لكي نفهم الطبيعة الجسيمية للإشعاع سنقوم باستعراض بعض الأفكار والتجارب الفيزيائية التي ساهمت في توضيح حقيقية هامة للغاية وهي إن الإشعاعات الكهرومغناطيسية (مُكَمَّاه quantized) أي في كميات صغيرة كل واحدة تسمى كمه بالإضافة إلى ذلك فإن هذه الكمات من الطاقة – تسمي الفوتونات– تمتلك خاصيتي الجسيمات والموجات . هذا التناقض الظاهري في الطبيعة المزدوجة للفوتونات يمكن ادراكه باسترجاع فكرة أن الفوتون عبارة عن باقة (رزمة) موجية Wave packet وهذه الخاصية تمكن الفوتون من التفاعل كموجة أو كجسيم مادي.

1.2.إشعاع الجسم الأسود Blackbody Radiation

عزيزي الدارس ،،

تصدر من جميع الأجسام الساخنة عند اى درجة حرارة إشعاعات تسمي الإشعاعات الكهرومغناطيسية الحرارية (Electromagnetic Radiation) . تعتمد كمية الإشعاعات ونوعيتها على درجة حرارة الجسم المشع. عند درجات الحرارة المنخفضة (أقل من 500K) تكون الموجات المنبعثة ذات أطوال موجية تقع في منطقة الأشعة تحت الحمراء Infrared (IR) (أكبر من 700nm). عند ارتفاع درجة الحرارة تنبعث من الجسم طاقة حرارية (Thermal Energy) أكبر، تبعاً لذلك تبدأ الأطوال الموجية في الانحراف نحو منطقة الموجات القصيرة فيلاحظ ظهور الأشعة فوق البنفسجية Ultraviolet (UV) كما مبين بالشكل (2.1)



الشكل (2.1) التوزيع الطيفي للإشعاعات الكهرومغناطيسية الصادرة من الجسم الأسود عند درجات حرارة مختلفة (T_1, T_2, T_3)

فيما يلي سوف ندرس العلاقة بين قدرة الجسم على امتصاص او اصدارالاشعاع وبين درجة حرارة الجسم. و يُعرف الجسم الأسود (Blackbody)

> بأنه الجسم الذي يمتص جميع الإشعاعات الساقطة عليه ولا يعكس منها اى شئ دون مراعاة لأطوالها الموجية.

عزيزي الدارس . توصل العَالِم فين (Wien) إلى علاقة تجريبية تربط ما بين طول الموجة المناظرة لأكبر شدة للإشعاع λ_{max} ودرجة حرارة الجسم على الصورة

$$\lambda_{max} = \frac{0.2898 \times 10^{-2}}{T} \qquad (1.2)$$

حيث λ_{max} ، مقاسة بالأمتار، تمثل طول الموجة التي تكون عندها شدة الإشعاع قيمة عظمي، T هي درجة الحرارة المطلقة (كلفن)، والعلاقــة (2.1) تسمي

بقانون فين للإزاحــة Wien's displacement law . القدرة الكلية الصادرة من وحدة المساحة E من الجسم الأسود تعطي بالعلاقة

$$\boxed{E(T) = \sigma T^4} \qquad (2.2)$$

حيث σ تمثل ثابت استيفان – بولتزمان $(\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \ W.m^{-2}.k^{-4})$، T هي درجة الحرارة المطلقة. تعُرف العلاقة (2.2) بقانون استيفان (Stefan Law). القدرة الكلية الصادرة من الجسم الأسود عند طول موجي محدد $E(\lambda.T)$ ترتبط بالقدرة الكلية المنبعثة في وحدة المساحة E(T) كالآتي

$$\boxed{E(T) = \int_0^\infty E(\lambda, T)\, d\lambda} \qquad (3.2)$$

ولقد أقترح فين علاقة تجريبية للقدرة الصادرة عند طول موجي محدد كالاتى

$$\boxed{E(\lambda,T) = a\lambda^{-5}\ e^{-b/\lambda T}} \qquad (4.2)$$

حيث b,a ثابتان .

وعند مقارنة علاقة فين (4.2) مع النتائج التجريبية للطيف الصادر من الجسم الأسود وجد أنها تتفق مع النتائج التجريبية لأطوال الموجات القصيرة فقط ولكنها لا تتوافق مع الأطوال الموجية الطويلة.

2.2 نظرية رايلي –جينز

The Rayleigh – Jeans Theory

عزيزي الدارس ،،

قام العالمان رايلي وجينز بدراسة طيف الجسم الأسود، واستخدما صيغة كلاسيكية لتفسير الطيف ولقد كان النموذج الذي اختاراه نموذجاً بسيطاً وفيه يُعامل الجسم المشع كأنه مجموعة كبيرة جداً من متذبذبات خطية (Linear Oscillators) تحت تأثير حركة توافقية بسيطة (Simple harmonic motion).

من المعلوم في الفيزياء الكلاسيكية ان الأجسام المشحونة المعجلة (المتسارعة) تبث إشعاعاً كهرومغنطيسياً، في حالة الجسم ألأسود الذي يمكن اعتباره تجويفاً (Cavity) ذي فتحة صغيرة جداً مقارنة مع مساحة سطحه الداخلية ، فان التجويف يعمل على امتصاص الشعاع الكهرومغناطيسي الذي يحتجز داخله من خلال الفتحة الصغيرة ولقد افترض رايلي أن أشعاع التجويف ناتج من الحركة الاهتزازية للإلكترونات الموجودة في جدار التجويف الداخلي.

في حالة الإتزان الحراري (thermal equilibrium) تساوي كثافة الطاقة داخل التجويف كثافة طاقة المهتزات الذرية في جدار التجويف.

وتبعاً للنظرية الكلاسيكية لتوزيع الطاقة فإن متوسط طاقة الحركة لجزئ غاز وُجد في حالة اتزان حراري عند درجة حرارة T تساوي $\frac{1}{2} k_B T$ لكل درجة حرية حيث K_B ثابت بولتزمان $K_B = 1.3\times10^{-23} J.K^{-1}$.

في حالة نموذج رايلي فإن متوسط طاقة الحركة للموجات الموقوفه (Stationary waves) تساوي $\frac{1}{2} k_B T$ لاحظ أنه بسبب الحركة الاهتزازية (أى أضافة درجة حرية اخرى) فإن متوسط الطاقة الكلية للموجة الكهرومغناطيسية تكون

$$\boxed{E = k_B T} \qquad (5.2)$$

قام رايلي بحساب عدد الموجات لوحدة الحجم بدلالة الطول الموجي (λ) [او بدلالة التردد (ν)] ووجد أنه يساوي

$$\boxed{n(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^4}} \qquad (6.2)$$

$$\boxed{n(\nu) = \frac{8\pi\nu^2}{C^3}} \qquad (7.2)$$

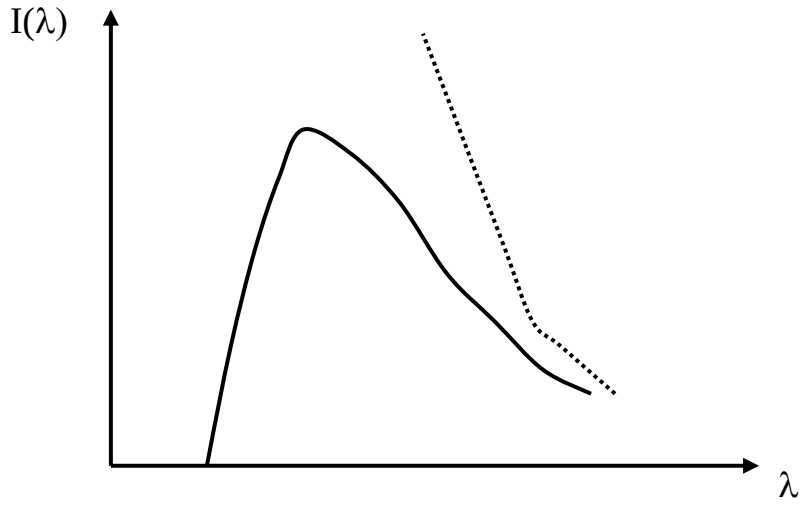
إذا استخدمنا في (7.2) المعادلة

$$n(\nu) = n(\lambda).\left|\frac{d\lambda}{d\nu}\right| = n(\lambda).\frac{c}{\nu^2}$$

فإن كثافة الطاقة تساوي

$$\boxed{I(\lambda,T) = k_B T.\, n(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^4} k_B T} \quad (8.2)$$

والمعادلة (8.2) تعرف بمعادلة رايلي وجينز ، حيث $I(\lambda,T)$ تمثل كثافة الطاقة (وهي الطاقة في وحدة الحجم) عند الطول الموجي (λ) في حالة اتزان حراري عند درجة حرارة (T) والمقارنة بين قانون رايلي – جينز وتوزيع كثافة الطاقة لإشعاعات الجسم الأسود حسب النتائج التجريبية موضحة بالشكل (2.2)



الشكل (2.2) يوضح المقارنة بين كثافة الطاقة الصادرة من الجسم الأسود (الخط المتصل) وقانون رايلي – جينز (الخط المتقطع) بدلالة الطول الموجي (λ) .

بمقارنة العلاقة النظرية مع التجربة نلاحظ ان هنالك تطابقاً فقط في حالة الموجات الطويلة ، شكل (1.2)، ولكن في حالة الموجات القصيرة فنلاحظ الاختلاف الكبير بين النظرية والتجربة. ويُلاحظ أيضاً ان قانون رايلي وجينز لا يعطي قيمة عظمي لكثافة طاقة الجسم الأسود وعلى النقيض فإن كثافة الطاقة تزداد بصورة مستمرة لانهائية .

ويتضح لنا من نموذج رايلي –جينز عجز النظرية الكلاسيكية في تفسير إشعاعات الجسم الأسود (النموذج اعتمد على مبدأ تساوي تجزء الطاقة المستخدم في حالة التوزيع المستمر للطاقة).

ولقد ظلت هذه المعضلة الفيزيائية بدون حل حتي افترض العالم ماكس بلانك في العام 1900 ان طاقة المهتزات في الجسم الأسود تُبعث على هيئة كمات منفصلة. كما سنرى في الفقرة التالية.

أسئلة تقويم ذاتي

1. عرف الإشعاعات الكهرومغناطيسية الحرارية
2. ناقش ماذا نعني بإشعاع الجسم الأسود
3. بالرسم فقط وضح التوزيع الطيفي للإشعاعات الكهرومغناطيسية الصادرة من الجسم الاسود عند درجات حرارة مختلفة
4. عرف قانون فين للإزاحـة
5. ناقش نظرية رايلي – جينز ، ثم قارن بين قانون رايلي – جينز وتوزيع كثافة الطاقة لإشعاعات الجسم الأسود

3.2 نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع

Planck's Quantum Theory of Radiation

عزيزي الدارس ،

ان الفيزياء الكلاسيكية عجزت عن إعطاء تفسير مقبول لطيف الجسم الأسود. لذا درس العالم ماكس بلانك نظرية رايلي – جينز محاولاً استنباط الخطأ فيها وقد تنبه إلى أن الخطأ لابد أن يكون في استخدامها لمتوسط الطاقة الكلية كما يعبر عنه في النظرية الكلاسيكية.

أيضاً فطن بلانك إلى صحة نظرية رايلي – جينز مع التجربة العملية عند نطاق الترددات المنخفضة. من هذا قام باستنتاج أن

> متوسط الطاقة الكلية للمتذبذب التوافقي لابد أن تساوي متوسط الطاقة الكلاسيكية الكلية في حالة الترددات المنخفضة

وهذا يعني أن

$$\overline{E}_{\nu\to 0} \to kT$$

الملاحظة الثانية التي إبداها بلانك في طيف الجسم الأسود أن

> كثافة الطاقة تزداد بزيادة التردد حتى تصل إلى قيمة عظمي عند تردد محدد ثم تبدأ في النقصان مرة أخرى.

لهذا استنتج أنه عندما يزداد التردد زيادة كبيرة فإن

$$\overline{E}_{\nu\to \infty} \to 0$$

في محاولته لتفسير طيف الجسم الأسود وتفسير السكوك الكهرومغناطيسي للمتذبذب فقد قام العالم بلانك بوضع الفرضيين التاليين آخذاً في الاعتبار الملاحظات التي ورد ذكرها

1. كمية الطاقة الصادرة أو الممتصة بواسطة المتذبذب تتناسب مع تردده (ν)، فإذا كان ثابت التناسب (h) فإن التغير في طاقة المتذبذب (ΔE) يعطي بالعلاقة

$$\boxed{\Delta E = h\nu} \qquad (9.2)$$

2. الفرض الثاني يوضح ان طاقة المتذبذب يجب ان تكون واحدة من مجموعة طاقات تعطي
بالعلاقة التالية

$$\boxed{E_n = nh\nu} \qquad (10.2)$$

حيث (n) عدد صحيح و (h) هو الثابت الموجود فى معادلة (2.9) ويسمى ثابت بلانك ويأخذ القيمة $h = 6.62\times10^{-34}$ J.s

يتضح الآن ان الصورة السابقة المتمثلة في الحالات المتصلة لتوزيع الطاقة للمتذبذب استبدلت بالحالات المنفصلة (المكمأة) للطاقة، وتبعاً لذلك فإن كمية الطاقة الصادرة أو الممتصة تكون (مكمأة) ؛ تمثل ΔE الفرق في الطاقة بين القيم المتتالية الممكنة.

بناءً علي ما تقدم يمكن حساب متوسط الطاقة الكلية للمهتز التوافقي باستخدام توزيع بولتزمان $N_n = N_o e^{-E_n/k_BT}$ الذى يعطى عدد الجزيئات (N_n) التى تكون طاقتها E_n

$$\overline{E} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n h\nu\, e^{-nh\nu/k_BT}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-nh\nu/k_BT}}$$

$$\overline{E} = \frac{0 + h\nu\, e^{-h\nu/k_BT} + 2h\nu e^{-2h\nu/k_BT} + \ldots}{1 + e^{-h\nu/k_BT} n h\nu + e^{-2h\nu/k_BT} + \ldots} \qquad (11.2)$$

لنفرض ان $e^{-h\nu/k_BT} \equiv x$

عليه نحصل على

$$\overline{E} = h\nu x \left(\frac{1 + 2x + 3x^3 + \ldots}{1 + x + x^2 + \ldots}\right)$$

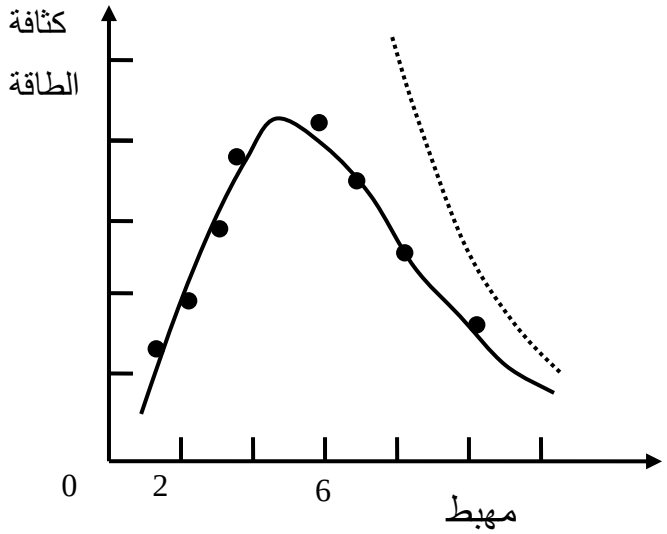
$$= h\nu x \frac{(1-x)^{-2}}{(1-x)^{-1}}$$

$$\overline{E} = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_BT} - 1} \qquad (2.12)$$

باستخدام معادلة رايلي لحساب عدد الموجات ، معادلة (2.6) ، فإن متوسط كثافة الطاقة للمهتز بدلالة الطول الموجي تكون

$$I(\lambda,T) = n(\lambda).\bar{E} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5}\ \frac{1}{(e^{hc/k_B T\lambda}-1)} \qquad (2.13)$$

المعادلة الأخيرة تعرف بقانون توزيع بلانك وهي تعطي كثافة الطاقة للجسم الأسود بدلالة طول الموجة الصادرة منه كإشعاع كهرومغناطيسي .هذه النتيجة تتفق تماماً مع نتائج القياسات التي اعطتها التجارب، أنظر شكل (3.2) .



الشكل: (3.2) مقارنة لعلاقات رايلي – جينز (الخط المتقطع وبلانك (الخط المتصل) مع القيم التجريبية (نقاط) لكثافة الطاقة المنبعثة من الجسم الأسود مع الطول الموجي عند درجة حرارة معينة.

مما سبق نري بأن فرضيات الخاصة بتكميم الطاقة قد حالفها النجاح في تفسير طيف الجسم الأسود وهي التي أدت إلى ميلاد الفيزياء الحديثة .

◄◄ مثال (1)

1. استنتج الصورة التي يكون عليها قانون توزيع بلانك بدلالة التردد.
2. في حالة الموجات الطويلة تحقق من ان قانون بلانك يؤول لقانون رايلي وجينز .
3. ماذا يعطي قانون بلانك في حالة الطاقة العالية؟

الحل

1. من $I(\nu) = I(\lambda)\left|\frac{d\lambda}{d\nu}\right|$

$$\left|\frac{d\lambda}{d\nu}\right| = \frac{c}{\nu^2}$$

$\Rightarrow$

بما ان $\lambda = c/\nu$ فإن

$$I(\nu,T) = \frac{c}{\nu^2} \cdot \frac{8\pi hc}{c^5/\nu^5} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/k_BT}-1}$$

$$= \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{h\nu/k_BT}-1}$$

2.في حالة الموجات الطويلة

$$\lambda \to \infty \quad , \quad \nu \to 0$$

فإن التقريب من مفكوك e^x يعطي

$$e^x \simeq 1+x$$

$$\therefore \; e^{h\nu/k_BT} \simeq 1 + \frac{h\nu}{k_BT}$$

عليه فإن

$$I(\nu,T) \simeq \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left(\frac{k_BT}{h\nu}\right)$$

$$I(\nu,T) = \frac{8\pi h\nu^2}{c^3} \; k_BT$$

أي أننا تحصلنا ، في حالة الموجات الطويلة ، على معادلة رايلي وجينز .

3. إما في حالة الطاقة العالية فإن:

$$\nu \to \infty \quad , \ \lambda \to 0$$

$$e^{h\nu/k_BT} - 1 \simeq e^{h\nu/k_BT}$$

$$\therefore \quad I(\nu, T) = \frac{8\pi h\ \nu^3}{c^3} \ . \ e^{-h\nu/k_BT}$$

أسئلة تقويم ذاتي

1. ناقش نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع .
2. عرف قانون توزيع بلانك .

4.2 تفاعل الإشعاع مع المادة

Interaction of Radiation with matter

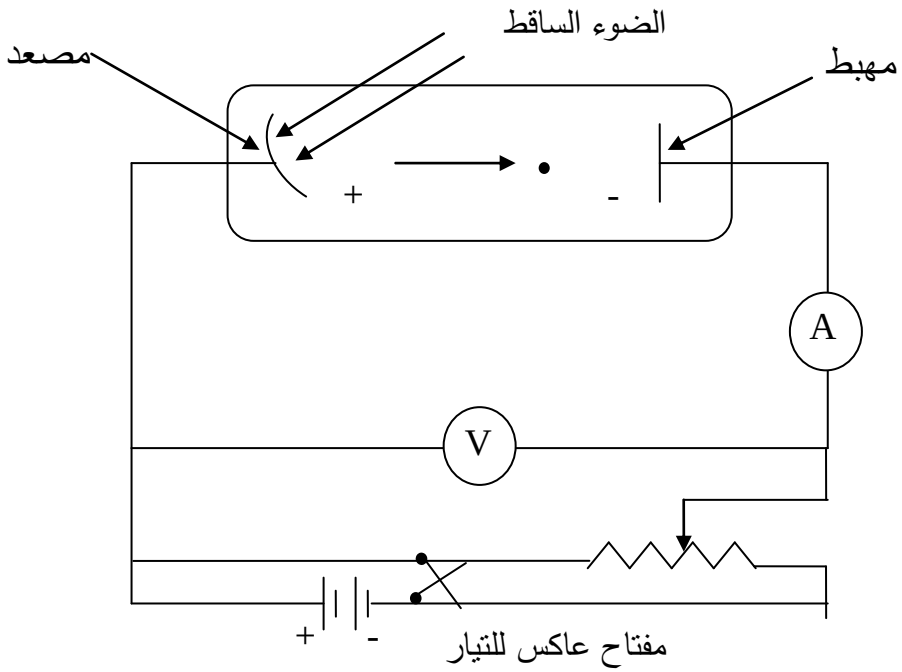
عزيزي الدارس ،

نجد ان نوع التفاعل بين الإشعاع (كمات الطاقة التى تسمى الفوتونات) والمادة يعتمد علي طاقة الفوتونات وطبيعة المادة. هنالك ثلاث طرق لهذا النوع من التفاعل والتي يسلك فيها الفوتون سلوكاً جسيمياً وهي التاثير الكهروضوئي ، ظاهرة كومبتون وإنتاج الزوج .

1.4.2 التأثير الكهروضوئي The Photoelectric Effect

عزيزي الدارس ،

نجد عندما يسلط ضوء (شعاع) علي سطح معدن ، عند بعض الظروف ، تنطلق (تنبعث) إلكترونات من سطح المعدن . تسمي هذه الإلكترونات بالإلكترونات الضوئية (Photoelectron) وسميت هذه الظاهرة بالتأثير الكهروضوئي. لدراسة التأثير الكهروضوئي يستخدم الجهاز الموضح بالشكل (4.2)



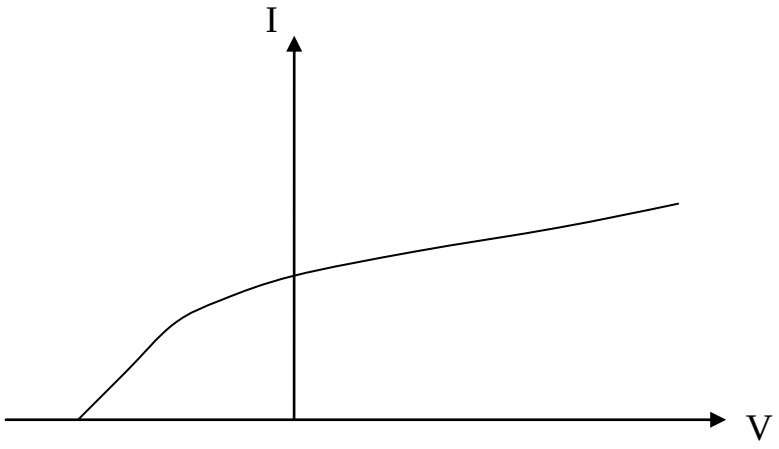
الشكل (4.2) : رسم تخطيطي لدراسة التأثير الكهروضوئي .

يتكون الجهاز من أنبوبة زجاجية مفرغة من الهواء. تحتوي الأنبوبة على مصعد ومبهط موصلان بأميتر (A) وفولتميتر (V) خارج الأنبوبة و مفتاح عاكس للتيار لكى نحصل على جهد الاعاقة.

عند سقوط الأشعة علي المصعد فإن الإلكترونات لأنها سالبة الشحنة تنطلق من سطحه متجه نحو المهبط الموجب وعندها يسري تيار يمكن قياسه بواسطة الأميتر . عندما اجريت التجربة لوحظ الآتى

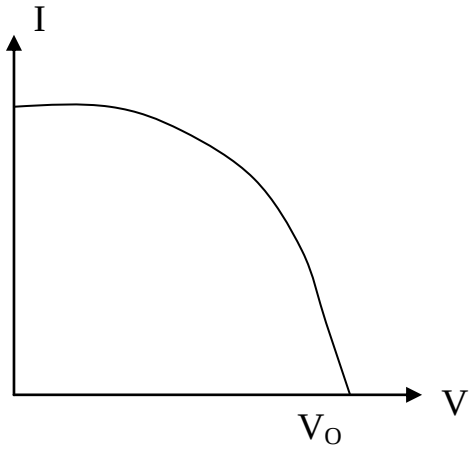
1. تزداد قراءة الأميتر عند زيادة الضوء الساقط وذلك لمرور عدد أكبر من الإلكترونات. الشكل (2.4) يوضح العلاقة بين التيار المار في الدائرة (I) وفرق الجهد (V) . ويلاحظ من العلاقة البيانية بين التيار والجهد إن التيار الكهربي يزداد بزيادة فرق الجهد حتى يصل إلى قيمة عليا تسمي حالة التشبع (Saturation) .

2. بما أن المهبط سالباً فهذا يعني أن لإلكترونات الضوئية التي تحمل طاقة حركية كافية هي فقط التي يمكنها الوصول إليه .



الشكل (2.4): يبين العلاقة بين التيار (I) والجهد الكهربي (V).

عند زيادة جهد الإرجاع (الإعاقة) (Retarding Potential) ، V ، فإن عدد الإلكترونات الضوئية التي يمكنها الوصول إلى المهبط سوف يقل تدريجياً حتى ينعدم ؛ أي انه عند قيمة معينة لجهد الإرجاع فإن الإلكترونات الضوئية سوف لن تتمكن من الوصول إلى المهبط ويمكن ملاحظة ذلك بمراقبة قراءة التيار في الدائرة والذي سوف يتناقص حتى يصل إلـى الصفر . يسمي هـذا الجهد بجهد الإيقاف (Stopping Potential) . الشكل (5.2) يبين العلاقة بين التيار وجهد الإرجاع.



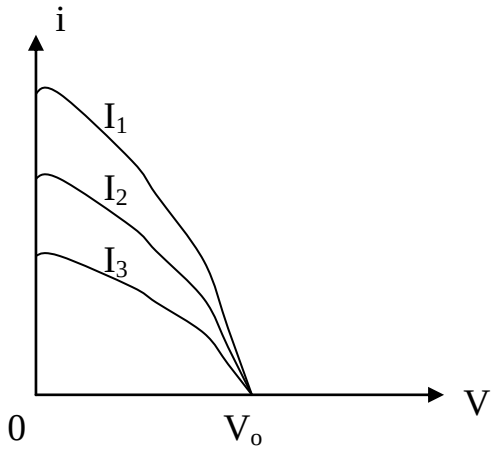
الشكل(2.5) : يتناقص التيار (I) مع زيادة جهد الإرجاع (V) حتى ينعدم تماماً عند قيمة الجهد (V_o) جهد الإيقاف.

يُعبر عن القيمة العظمي للطاقة الحركية ، K_{max} ، للإلكترونات الضوئية في هذه الحالة بالمعادلة

$$\boxed{K_{max} = e V_o} \qquad (14.2)$$

حيث V_o هو جهد الإيقاف ، e شحنة الإلكترون

3. عند ثبات تردد (frequency) الإشعاع فإن القيمة العظمي للطاقة الحركية للإلكترونات الضوئية تظل ثابتة ، ولا تتغير بتغير شدة (intensity) الإشعاع العلاقة بين شدة التيار (I) المار في الأنبوبة وجهد الإرجاع (V) موضحة في الشكل (4.2) لثلاث إشعاعات ذات ترددات متساوية ولكنها مختلفة في الشدة .



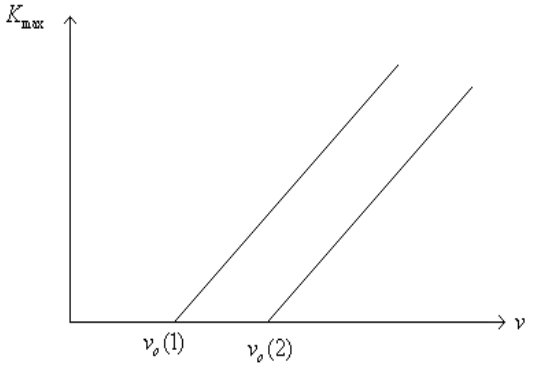
الشكل (6.2)العلاقة بين شدة التيار (I) وجهد الإرجاع (V) لثلاث قيم مختلفة لشدة الإشعاع $(I_1 > I_2 > I_3)$ **عند ثبات تردد الإشعاع** (ν).

لاحظ من الشكل (6.2) ان جهد الإيقاف يعطي نفس القيمة في الثلاث حالات وهذا يعني ان الطاقة الحركية العظمي للإلكترونات الضوئية متساوية في هذه الحالات.
من هذه النتيجة يمكن استنتاج ان

> الطاقة الحركية العظمي للإلكترونات الضوئية تعتمد على تردد الإشعاع وليس على شدة الإشعاع.

4. توجد قيمة محددة للتردد تسمي بالتردد الحرج ، ν_o ، **(Threshold frequency)** أو تردد العتبة خاص بكل معدن. عندما تكون قيمة تردد الإشعاع الساقط اصغر من تردد العتبة فلا يمكن للإلكترونات الضوئية ان تتحرر من سطح المعدن وتنطلق حتى وان كانت شدة الإشعاع كبيرة. أما إذا كان تردد الإشعاع الساقط أكبر من تردد العتبة فإن الإلكترونات الضوئية تتحرر من سطح المعدن مكتسبة طاقة حركية عظمي متناسبة مع تردد الإشعاع الساقط .

الشكل (7.2) يبين العلاقة الخطية بين الطاقة الحركية العظمي للإلكترونات الضوئية (K_{max}) وتردد الإشعاع (ν).



الشكل (2.7): العلاقة بين الطاقة القصوى (K_{max}) للالترونات الضوئية المنبعثة من سطح المعدن وتردد الاشعاع (ر) الساقط على سطح المعدن. مبين فى الشكل العلاقة لمعدنيين مختلفين (1) و(2).

الملاحظات والحقائق التى ذكرناها والخاصة بالتاثير الكهروضوئى لا يمكن تفسيرها من خلال مفاهيم الفيزياء الكلاسيكية والتى تنادى بان طاقة الموجة الكهرومغناطيسية تعتمد على شدة الاشعاع ولا تعتمد على تردد الاشعاع وعلية فاننا نجد ان الفيزياء الكلاسيكية قد عجزت عن تفسير اعتماد طاقة حركة الالكترونات على تردد الاشعاع.

2.4.2. نظرية اينشتاين الكمية حول التأثير الكهروضوئي

Einstein's Quantum Theory for Photoelectric Effect

عزيزي الدارس ،

لتفسير التأثير الكهروضوئي استخدم اينشتاين أفكار ماكس بلانك حول انبعاث الإشعاع الكهرومغناطيسي علي صورة كمات ، معادلة (9.2) ، وافترض اينشتاين ان الطاقة الإشعاعية تنتشر في الفضاء ويتم امتصاصها من قبل الأجسام على صورة كمات (quanta) صغيرة . سميت هذه الكمات بالفوتونات (Photons)، طاقة الفوتون (E) تتناسب مع تردده (ν).

$$\mathbf{E = h\ \nu} \qquad (15.2)$$

حيث h هو ثابت بلانك.

اقترح اينشتاين المعادلة التالية لتفسير التأثير الكهروضوئي.

$$h\ \nu = h\ \nu_o + K_{max} \qquad (16.2)$$

عندما يمتص إلكترون على سطح المعدن فوتون طاقتة hν فإن جزء من طاقة الفوتون تستنفذ لتحرير الالكترون من سطح المعدن والجزء الباقى يظهر كطاقة حركة للإلكترون . حيث $h\nu$ تمثل طاقة الفوتون الساقط على سطح المعدن، $h\nu_o$ أقل طاقة مطلوبة لتحرير الإلكترون من سطح المعدن،

تسمي ايضاً هذه الطاقة بدالة الشغل (Work function) ، ويرمز لها بالرمز (ϕ_o) . K_{max} هي الطاقة الحركية القصوي للإلكترون الضوئي.

دالة الشغل تختلف من معدن لآخر. الجدول التالى يوضح دالة الشغل لبعض المعادن على الترتيب

المعدن	دالة الشغل (eV)
للسيزيوم	1.9
الصوديوم	2.3
الكالسيوم	3.2
النحاس	4.5

لاحظ إن المعادلة (16.2) يمكن كتابتها علي الصورة التالية

$$K_{max} = h(\nu - \nu) \qquad (17.2)$$

أي أن العلاقة بين تردد الإشعاع الساقط (ν) والطاقة الحركية القصوى K_{max} للإلكترونات الضوئية هي علاقة خطية متفقة تماماً مع التجارب .

◄◄ مثال (2)

أحسب الطاقة الحركية القصوى لإلكترون ضوئي انبعث بتردد قدره $8\times10^{14}\,Hz$ من سطح معدن إذا كان تردد العتبة (التردد الحرج) للمعدن مساوياً $4\times10^{14}\,Hz$

الحل

$$h\,\nu = h\,\nu_o + K_{max}$$

$$K_{max} = h(\nu - \nu_o)$$

$$= (6.6\times10^{-34}\,J.s)\,[8\times10^{14} - 4\times10^{14}]^{S^{-1}}$$

$$= \frac{6.6\times10^{-34}\times4\times10^{14}}{1.6\times10^{-19}} \qquad = \underline{\underline{1.65 \quad eV}}$$

حيث استخدمنا $1\ eV = 1.6\times10^{-19}\,J$

◄◄ مثال (3)

سقطت أشعة فوق بنفسجية ذات طول موجي $350\ nm$ على سطح معدن دالة شغله تساوي $2.2\ eV$ أحسب الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية التي انبعثت من سطح المعدن .

الحل

بما أن $c = \lambda\ \nu$

حيث c : سرعة الضوء (الإشعاع) في الفراغ ، λ : الطول الموجي ، ν : التردد

فإن طاقة فوتون الاشعة $E = h\ \nu = \frac{hc}{\lambda}$

$$= \frac{(6.6\times10^{-34}\,J.s)(3\times10^{8}\,m.s^{-1})}{350\times10^{-9}\,m}$$

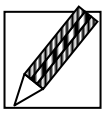
$$= 5.6\times10^{-19}\ \ J$$

$$= \frac{5.6\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} \qquad = \underline{\underline{3.5 \quad eV}}$$

$$K_{max} = E - h\nu_o$$

$$= 3.5 - 2.2 = 1.3eV$$

تدريب(1)



سقطت أشعة ذات طول موجي $660\ nm$ على سطح معدن دالة شغله تساوي $1.4\ eV$ أحسب الطاقة الحركية القصوى للإلكترونات الضوئية التي انبعثت من سطح المعدن .

أسئلة تقويم ذاتي

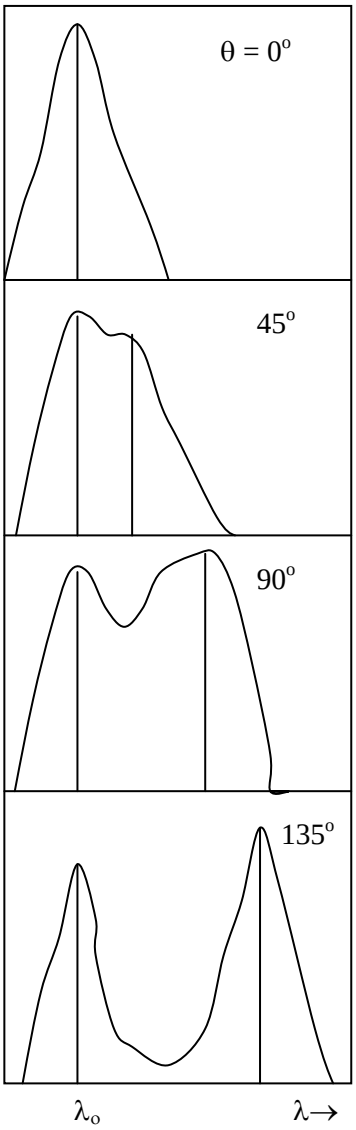
1. تحدث عن التأثير الكهروضوئي .
2. ما هو اقتراح اينشتاين عن التأثير الكهروضوئي .
3. أحسب الطاقة الحركية القصوى لإلكترون ضوئي انبعث بتردد قدره $5\times10^{14}Hz$ من سطح معدن إذا كان تردد العتبة (التردد الحرج) للمعدن مساوياً $2.5\times10^{14}Hz$.

3.4.2 أثر (ظاهرة) كومبتون The Compton Effect

عزيزي الدارس ،،

كان من المعلوم بين علماء الفيزياء الذين كانوا يدرسون الأشعة السينية (وحيدة الطاقة) أن الإشعاع المتطاير يحتوي دائماً على موجات ذات طول موجي أطول من طول الموجة الساقطة. قام العالم كومبتون بدراسة استطارة الأشعة السينية بعد سقوطها على الكربون وتحصل على الطيف الموضح في شكل (2.8) .

النتيجة غير المتوقعة من التجربة هي أن الإزاحة في الطول الموجي لا تعتمد على طول موجة المصدر ولا تعتمد كذلك على نوع المادة التي تسقط عليها الأشعة .

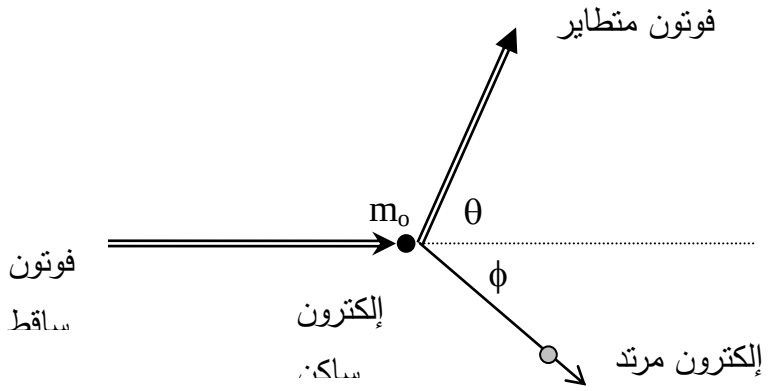


الشكل (2.8): تغيرات الخط المزاح مع زاوية الاستطارة (θ) . القمة المقابلة للطول الموجي λ_o ناتجة من الأشعة السينية الساقطة .

عزيزي الدارس ، ومن ذلك نجد ان كومبتون إستخلص تجريباً إن الإزاحة في طول الموجة يتناسب مع المقدار $\left(\sin^2\frac{\theta}{2}\right)$.

وتمكن من تفسير هذه النتائج بافتراض إن الفوتون جسيماً، بمعني أن الشعاع يتفاعل مع المادة علي صورة كمات منفصلة من الطاقة وبالتالي أعتبر الفوتونات كأنها جسيمات وقام بدراسة تصادم الفوتون والإلكترون مستخدماً في ذلك نتائج النظرية النسبية .

الشكل (2.9): يبين تصادم الفوتون الساقط مع الكترون في حالة سكون .



الشكل(2.9) : يوضح التصادم بين الفوتون والإلكترون

من قانون حفظ الاندفاع (momentum) نستخلص

$$P_o = P' \cos\theta + P \cos\phi \qquad (18.2)$$

$$0 = P' \sin\theta - P \sin\phi \qquad (19.2)$$

حيث : P_o: اندفاع الفوتون قبل التصادم .

P' : اندفاع الفوتون بعد التصادم .

P : اندفاع الإلكترون بعد التصادم.

لاحظ أنه بما أن الإلكترون كان في حالة سكون قبل التصادم فإن اندفاعه يساوي صفراً. للتخلص من ϕ نعيد كتابة المعادلتين على الصورة :

$$P \cos\varphi = P_o - P' \cos\theta$$

$$P \sin\varphi = P' \sin\theta$$

بتربيع المعادلتين وجمعهما

$$\boxed{P^2 = P_o^{\,2} + P'^2 - 2P_o^{\,2} P' \cos\phi} \qquad (20.2)$$

أما قانون حفظ الطاقة فإنه يعطي

$$\boxed{E_o - E' = T} \qquad (21.2)$$

حيث : E_o: طاقة الفوتون قبل التصادم .

E' : طاقة الفوتون بعد التصادم .

T : طاقة الإلكترون بعد التصادم.

باستخدام العلاقة بين طاقة الفوتون واندفاعه معادلة (36.1)في الوحدة الاولى نحصل على

$$\boxed{E = cP} \qquad (22.2)$$

وباستخدام المعادلة (22.2) يمكن كتابة المعادلة (21.2) كالآتي

$$\boxed{P_o - P' = \frac{T}{c}} \qquad (23.2)$$

بتربيع المعادلة الأخيرة نحصل على

$$\boxed{P_{/}^{\,2} + P'^{\,2} - 2P_o P' = \frac{T^2}{c^2}} \qquad (24.2)$$

بطرح معادلة (24.2))من معادلة (20.1)نحصل علي

$$\boxed{P^2 - \frac{T^2}{c^2} = 2PP' (1-\cos\theta)} \qquad (25.2)$$

وبافتراض أن سرعة الإلكترون بعد التصادم قد تكون كبيرة فلا بد من استخدام الميكانيكا النسبية. الطاقة الكلية E لجسيم كتلته السكونيه m_o واندفاعه P وطاقة حركته T هي

$$\boxed{E = \sqrt{c^2p^2 + m_o^2 c^4}} \qquad (26.2)$$

$$\boxed{E = m_o c^2 + T} \qquad (27.2)$$

بتربيع طرفى المعادلتين أعلاه وبالطرح نحصل على

$$\boxed{c^2p^2 = T^2 + 2m_o c^2 + T} \qquad (28.2)$$

أي أن

$$\boxed{P^2 - \frac{T^2}{c^2} = 2m_o T = 2m_o c(P_o - P')} \qquad (29.2)$$

حيث تم استخدام المعادلة(23.2).

الآن بمقارنة المعادلتين (25.2) و(29.2) نحصل علي

$$m_o c(P_o - P') = P_/ P(1-\cos\theta)$$

$$\frac{1}{P'} - \frac{1}{P_o} = \frac{1}{m_o c}(1-\cos\theta)$$

أي أن

$$\boxed{\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_o c}(1-\cos\theta)} \qquad (30.2)$$

المقدار $\left(\frac{h}{m_o c} = 0.0243 \ \mathring{A}\right)$ الذى له وحدات طول يسمي طول موجة كومبتون

لاحظ انه في حالة $\theta = 90^{o}$ فإن المعادلة (30.1) تعطي خط أشعة سينية جديد اطول من الخط الأساسي بمقدار $0.0243\ \mathring{A}$.

تعتبر ظاهرة كومبتون مثالاً جيداً لتعزيز فكرة الطبيعة الجسيمية للأشعة السينية ولقد تم برهانها عمليا، أيضاً اكدت صحة فرضيات اينشتاين التي استخدمها في دراسة وتفسير التأثير الكهروضوئي.

◄◄ مثال (4)

فوتون طول موجته $1\ \mathring{A}$ اصطدم بإلكترون ساكن ، إذا كانت زاوية استطارة الفوتون 90^{o} .

1. أحسب التغير في طول موجة الفوتون والتغير في طاقته بعد التصادم .
2. أحسب الطاقة الحركية للإلكترون .

الحل

لإيجاد التغير في طول موجة الفوتون نستخدم معادلة (30.1).

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

حيث θ هي زاوية استطارة الفوتون وبتويض قيم ثابت بلانك والكتلة وسرعة الضوء نتحصل علي

$$\lambda' - \lambda = 0.0243\ (1 - \cos 90^{o})$$
$$= \underline{\underline{0.0243\ A^{o}}}$$

طاقة الفوتون قبل التصادم

$$E = \frac{h\ c}{\lambda} = \frac{(6.6\times10^{-34}\,J.s)(3\times10^{8}\,m.s^{-1})}{1\times10^{-10}\,m}$$
$$= 1.98\times10^{-15}\,J$$

طول موجة الفوتون بعد التصادم

$\lambda' = 1.0243\ \mathring{A}$

طاقة الفوتون بعد التصادم

$$E' = \frac{h\,c}{\lambda'} = \frac{(6.6\times10^{-34}\,\text{J.s})(3\times10^{8}\,\text{m.s}^{-1})}{1.0243\times10^{-10}\,\text{m}}$$
$$= 1.93\times10^{-15}\,\text{J}$$

إذن فإن التغير في طاقة الفوتون يكون

$$E - E' = (1.98-1.93)\times10^{-15}\,\text{J}$$
$$= 0.05\times10^{-15}\,\text{J} \simeq \underline{\underline{313\ \ \text{eV}}}$$

4.4.2 إنتاج الزوج Pair Production

عزيزي الدارس ،،

ان قانون الكتلة والطاقة الذي تمت دراسته سابقاً (الوحدة الأولى) يُفضي إلى نتائج هامة منها أن الجسيمات المادية ، عند بعض الظروف ، تخضع لعملية الفناء أو الخلق .

بالرجوع لتجربة التأثير الكهروضوئي نجد أن الفوتون يفقد كل طاقته عند تصادمه مع الإلكترون. أما في ظاهرة كومبتون فإن الفوتون في عملية التصادم يفقد فقط جزءً من طاقته ، أما عملية إنتاج الزوج فتبين انه يمكن للفوتون التحول إلى مادة (إلكترون وبوزيترون) ، Positron ، البوزيترون عبارة عن إلكترون موجب الشحنة فهو يشبه الإلكترون في كل خواصه إلا إن شحنته موجبة. ايضاً قد يطلق عليه اسم الإلكترون المضاد . في عملية إنتاج الزوج تتحول الطاقة الكهرومغناطيسية إلى مادة .

الشكل (10.2) يبين عملية إنتاج الزوج . نلاحظ أيضاً أن قانون بقاء الشحنة قد تحقق حيث مجموع شحنتا الإلكترون (e^-) والبوزيترون (e^+) يساوي صفراً متفقاً مع الفوتون الذي لا يحمل أي شحنة كهربية .

إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من أقل طاقة مطلوبة لإنتاج الزوج فإن الإلكترون والبوزيترون سوف يكتسبان طاقة حركية ، في هذه الحالة فإن معادلة حفظ الطاقة تأخذ الصورة

$$\begin{aligned} h\nu + M_o c^2 &= E_- + E_+ + M_o c^2 \\ &= (m_o c^2 + T_-) + (m_o c^2 + T_+) + (M_o c^2 + T_M) \end{aligned} \qquad (31.2)$$

حيث: M_o هي الكتلة السكونية للنواة والتي تحدث عملية إنتاج الزوج بالقرب منها.

T_- ، T_+و T_M الطاقة الحركية لكل من الإلكترون ، البوزيترون والنواة على التوالي .

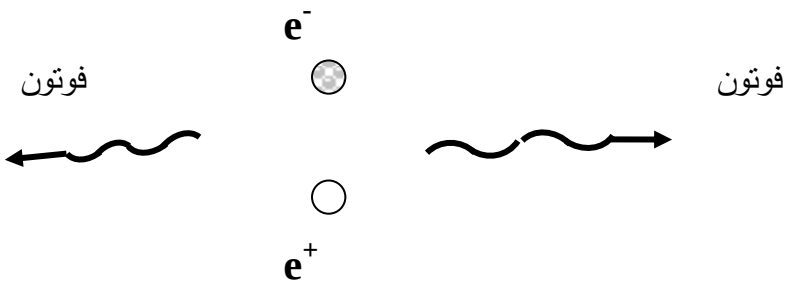
بما أن $T_- \simeq T_+$

وأيضاً يمكن اعتبار أن ، $T_M \simeq 0_+$ لأن كتلة النواة أكبر بكثير من كتلة الإلكترون $(M_o >> m_o)$.

عليه يمكن اختزال المعادلة (31.2) إلى الصورة

$$h\nu = 2\, m_o c^2 + 2T \qquad (32.1)$$

العملية العكسية لإنتاج الزوج والتي تسمي بفناء الزوج Pair annihilation يمكن حدوثها عندما يلتقي إلكترون وبوزيترون حيث أنهما يتلاشيان وينتج في هذه العملية زوج من الفوتونات ، شكل (10.2) يوضح هذا التفاعل .



الشكل (10.2) عملية تلاشي (فناء) المادة وتحولها لطاقة.

مبدأ حفظ الطاقة يعطي

$$\boxed{2\ m_o c^2 = h\nu_1 + h\nu_2} \qquad (33.2)$$

حيث $\nu_{1,2}$ تردد الفوتون الناتجين . أما قانون حفظ الاندفاع فيعطي

$$\boxed{0 = P_1 + P_2} \qquad (34.2)$$

باعتبار أن الإلكترون والبوزيترون كانا في وضع سكون (تقريبي) قبل الالتقاء .

باستخدام العلاقة التي تربط ما بين طاقة الفوتون واندفاعه (معادلة (25.2) يمكن كتابة

$$\boxed{\frac{h\nu_1}{c} = \frac{h\nu_2}{c}} \qquad (35.2)$$

ومنها $\nu_1 = \nu_2$ وهذا يعني أن كل فوتون يحمل نفس المقدار من الطاقة . وهذه الطاقة تكون مساوية لطاقة السكون للإلكترون أي أن

$$h\nu = m_o c^2 = 0.511 \ \ MeV$$

◄◄ مثال (5)

طاقة فوتون أشعة جاما تساوي 4.022 MeV ، إذا تلاشي هذا الفوتون في مجال نواة احدي الذرات

1. هل يتم إنتاج زوج من الإلكترونات ؟ علل .
2. أحسب الطاقة الحركية للجسيمات الناتجة .
3. أحسب الطاقة الكلية للجسيمات الناتجة .

الحل

1. لا يمكن إنتاج نوع واحد من الشحنات حيث أن هذا يتعارض مع قانون حفظ الشحنة .
2. نستخدم المعادلة (2.24)

$$E = 2\ m_o c^2 + 2T$$

$$T = \frac{E - 2\ m_o c^2}{2}$$

$$T = \frac{(4.022MeV) - (1.022MeV)}{2}$$

$$T = \underline{\underline{1.5MeV}}$$

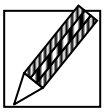
3. الايجاد الطاقة الكلية نستخدم المعادلة (31.1) في الوحدة الاولى

$$E = m_o c^2 + T$$

$$E = (0.511MeV) + (1.5MeV)$$

$$E = \underline{\underline{2.011 \quad MeV}}$$

تدريب(2)



فوتون طول موجته $1.4\overset{o}{A}$ اصطدم بإلكترون ساكن ، إذا كانت زاوية استطارة الفوتون 45^o :

1. أحسب التغير في طول موجة الفوتون والتغير في طاقته بعد التصادم .
2. أحسب الطاقة الحركية للإلكترون .

أسئلة تقويم ذاتي

1. وضح كيف تم تعزيز فكرة الطبيعة الجسيمية للأشعة السينية باستخدام ظاهرة كومبتون ؟
2. كيف تم تاكد صحة فرضيات اينشتاين ؟
3. عرف البوزيترون .
4. ناقش قانون بقاء الشحنة علي ضوء عملية إنتاج الزوج .

الخلاصة

عزيزي الدارس,

في النهاية، نؤكد على ما أكدناه في البداية عن ضرورة تقويم هذه الوحدة، وإبداء ملاحظاتك للاستفادة منها. ولكن ما الذي ناقشناه ؟

لقد عرفنا ماهو إشعاع الجسم الأسود وماهي ظرية رايلي – جينز وايضا نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع

ثم تعرفنا علي طرق تفاعل الاشعاع مع المادة من التأثير الكهروضوئي و نظرية اينشتاين الكمية حول هذه الظاهرة.. كما تعرفنا على ظاهرة كومبتون و إنتاج الزوج

ومع نهاية هذا القسم نكون قد انهينا هذه الوحدة الثانية ، ونأمل أن تكون قد أضافت الكثير إلى معلوماتك الثرة وان تسعد بالقسم الثاني من نفس الوحدة إنشاء الله.

لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية

عزيزي الدارس، بعد أن فرغت من دراسة هذه الوحدة الآن، أصبح لديك حصيلة كبيرة من المعلومات المفيدة

الآن معاً الي الوحدة الثالثة وهي بعنوان الطبيعة الموجية للجسيمات وسوف نقوم بدارسة كل من موجة دى برولى و مبدأ عدم التيقن لهاينبرج ثم ننتقل الي الدالة الموجية واخير نقوم بدارسة معادلة شرودينجر و مسألة الجسيم داخل الصندوق نرجو أن تكون ايضا وحدة مفيدة لك وان تساهم معنا في نقدها وتقييمها.

إجابات التدريبات

تدريب(1)

فإن طاقة فوتون الاشعة

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$
$$= \frac{(6.6\times10^{-34}J.s)(3\times10^{8}m.s^{-1})}{660\times10^{-9}m}$$
$$= 3\times10^{-19}\ J$$
$$= \frac{3\times10^{-19}}{1.6\times10^{-19}} \qquad \approx 1.9eV$$
$$K_{\max} = E - h\nu_o$$
$$= 1.9 - 1.4 = 0.5eV$$

التدريب(2)

التغير في طول موجة الفوتون

$$\lambda' - \lambda = 0.0243\ (1-\cos 45^o)$$
$$= 0.0032A$$

طاقة الفوتون قبل التصادم

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6.6\times10^{-34}J.s)(3\times10^{8}m.s^{-1})}{1.5\times10^{-10}m}$$
$$= 1.32\times10^{-15}J$$

طول موجة الفوتون بعد التصادم $\lambda' - \lambda = 0.0032 \therefore \lambda' = 1.5 + 0.0032 = 1.5032^0 A$

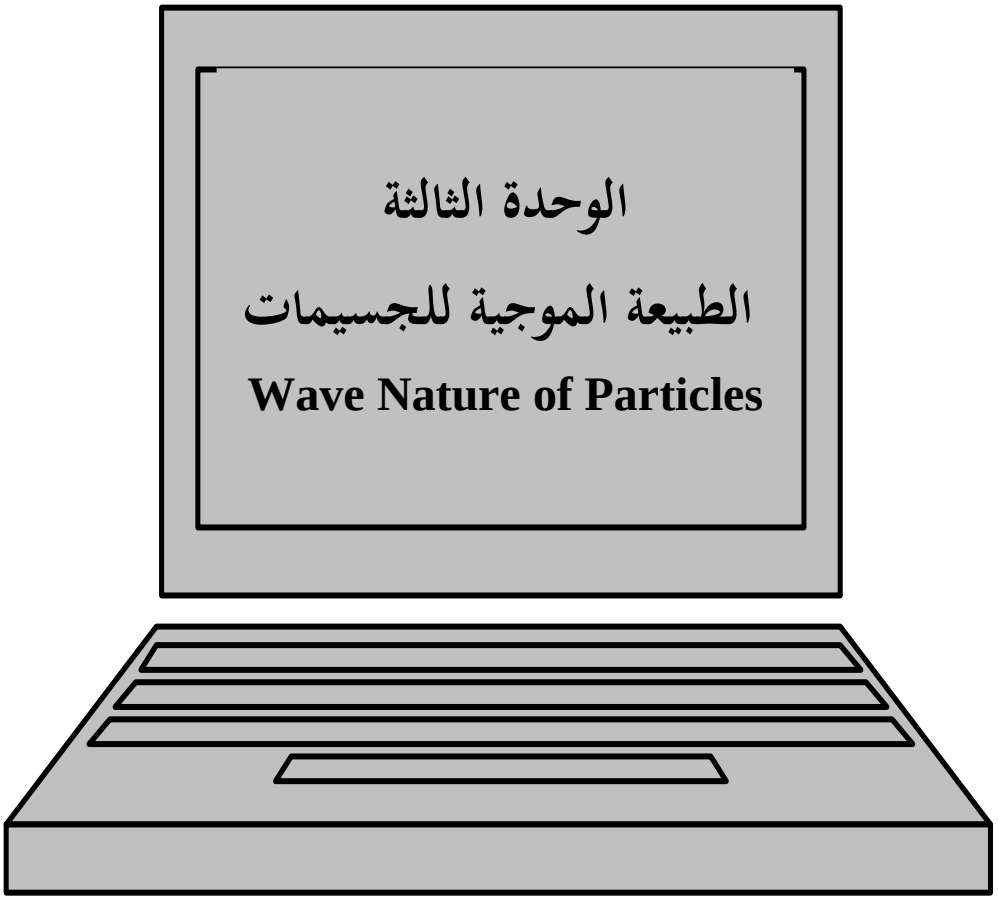
طاقة الفوتون بعد التصادم $E' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{(6.6\times10^{-34}J.s)(3\times10^{8}m.s^{-1})}{1.5032\times10^{-10}m} = ...J$

إذن فإن التغير في طاقة الفوتون بعد تعويض قيم $E\ \&\ E'$ يكون

$$E - E' = ...J$$

مسرد المصطلحات

Electromagnetic Radiation	الإشعاعات الكهرومغناطيسية الحرارية
Infrared (IR)	الأشعة تحت الحمراء
Thermal Energy	طاقة حرارية
Ultraviolet (UV)	الأشعة فوق البنفسجية
Wien’s displacement law	قانون فين للإزاحــة
The Rayleigh – Jeans Theory	نظرية رايلي –جينز
Linear Oscillators	متذبذبات خطية
Simple harmonic motion	حركة توافقية بسيطة
Cavity	تجويف
thermal equilibrium	التوازن الحراري
Stationary waves	الموجات الموقوفه
Planck’s Quantum Theory of Radiation	نظرية ماكس بلانك الكمية للإشعاع
Interaction of Radiation with matter	تفاعل الإشعاع مع المادة
The Photoelectric Effect	التأثير الكهروضوئي
Photoelectron	الإلكترونات الضوئية
Retarding Potential	جهد الإرجاع (الإعاقة)
Stopping Potential	جهد الإيقاف
intensity	الشدة
Threshold frequency	التردد الحرج
quanta	كمه (جمعها كمات)
Photons	الفوتونات
Work function	دالة الشغل


الوحدة الثالثة
الطبيعة الموجية للجسيمات
Wave Nature of Particles

محتويات الوحدة الثالثة

الموضوع	الصفحة
مقدمة	**85**
تمهيد	**85**
اهداف الوحدة	**86**
3. الطبيعة الموجية للجسيمات	**87**
1.3. موجة دى برولى	**87**
2.3. حيود الالكترونات	**89**
3.3. مبدأ عدم التيقن لهاينبرج	**91**
4.3. الدالة الموجية	**94**
5.3. معادلة شرودينجر الموجية	**95**
6.3. معادلة شرودينجرالمستقلة عن الزمن	**99**
7.3. مسألة جسيم داخل بئرلانهائية التعمق	**102**
الخلاصة	**107**
لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية	**107**
إجابات التدريبات	**108**
مسرد المصطلحات	**109**

مقدمة

تمهيد

نرحب بك عزيزي الدارس في هذه الوحدة الثالثة من هذا المقرر وهي بعنوان الطبيعة الموجية للجسيمات و تتألف من سبعة أقسام رئيسية

اختص القسم الاول والثاني بدارسة موجة دى برولى و حيود الالكترونات اما في القسمين الثالث والرابع فسنتناول مبدأ عدم التيقن لهايزنبرج والدالة الموجية.

في الاقسام الثلاثة الاخيرة سوف نتعرف علي معادلة شرودينجر المتعمدة على الزمن والمستقلة عن الزمن وأخيراً مسألة جسيم داخل بئرلانهائية التعمق في نهاية هذه الوحدة هناك سرد شامل للمصطلحات العلمية التي وردت في النص الرئيسي، كما حرصنا على وضع أسئلة تقويم ذاتي، وتدريبات كفيلة بتلبية احتياجاتك التعليمية والتي تقدمها لمرشدك الميداني.

عزيزي الدارس،،

أهلاً بك مرة أخري إلي هذه الوحدة ونرجو أن تستمتع بدراستها وأن تستفيد منها

أهداف الوحدة

عزيزي الدارس،،

بعد فراغك من دراسة هذه الوحدة يتوقع منك أن تكون قادراً علي أن:

1. تفهم أهمية دراسة الطبيعة الموجية للجسيمات
2. تتعرف على موجة دى برولى
3. تشرح حيود الالكترونات
4. تعرف مبدأ عدم التيقن لهايزنبرج
5. تستنتج الدالة الموجية
6. تتحصل على معادلة شرودينجر
7. توضح معادلة شرودينجرالمستقلة عن الزمن
8. مسألة جسيم داخل بئرلانهائية التعمق
9. تحل مسائل وتمارين عن الطبيعة الموجية للجسيمات

3 . الطبيعة الموجية للجسيمات

عزيزي الدارس ،

بعد ان تعرفنا على السلوك المزدوج للإشعاع و استعرضنا عدة تجارب تبين السلوك الجسيمي للضوء (الفوتونات) ، في سياق ذلك تم الحصول على العلاقة التي تربط بين طاقة الفوتون (E) وتردده (ν) بالمعادلة (15.2) $E = h\nu$ وباستخدام النظرية النسبية تحصلنا على العلاقة بين طاقة الفوتون و اندفاعه (P) معادلة

$$E = pc \qquad (36.1)$$

بمقارنة المعادلتين(15.2) و(36.1) السابقة تنحصلنا على

$$p\,c = h\,\nu = \frac{hc}{\lambda} \qquad (36.2)$$

وعليه فإن اندفاع الفوتون وطول موجته (λ) يرتبطان بالمعادلة

$$\lambda = \frac{h}{p} \qquad (37.2)$$

العلاقة(37.2) تعطي خصائص الفوتون الموجية (λ) وخصائصه الجسيمية(p).

1.3 موجة دى برولي De Brogalie Wave

عزيزي الدارس ، لقد اقترح العالم دى برولي وجود موجات مصاحبة للأجسام المادية المتحركة واعتبر أن العلاقة التالية (37.2) $\lambda = \frac{h}{p}$ ليست قاصرة على الفوتونات فقط وإنما هي صحيحة لجميع الأجسام المادية المندفعة وينص فرض دى برولى على أن :-

> أي جسم مادي كتلتـه (m) متحرك بسرعة (v) تصاحبه موجة تسمي موجة دى برولى (De Brogalie Wave)

يعطي الطول الموجة بالعلاقة

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \qquad (1.3)$$

حيث (p) هو اندفاع الجسم و (h) ثابت بلانك . بقي أن نشير إلى أنه في حالات السرعات العالية للأجسام المادية يجب أن نستخدم التعبير النسبي للكتلة معادلة(24.1)

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

◄◄ مثال (6)

أحسب طول موجة دى برولى

1. لكرة كتلتها 50 g تتحرك بسرعة $30\ m.s^{-1}$.
2. لإلكترون يتحرك بسرعة $10^7\ m.s^{-1}$.

الحل

1. بما أن $v << c$ حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ ،

فإن موجة دى برولى تعطى بالعلاقة التالية

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{(6.6\times10^{-34}\ J.s)}{(50\times10^{-3}\ kg)(30\ m.s^{-1})}$$

$$= 4.4\times10^{-24}\ m$$

طول الموجة المصاحبة صغيراً جداً مقارنة مع إبعاد الكرة .

2. كتلة الإلكترون عند السكون $m_o = 9.1\times10^{-31}\ kg$

طول موجة دى برولى

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{(6.6\times10^{-34}\ J.s)}{(9.1\times10^{-31}kg)(10^7\ m.j^{-1})}$$

$$= 7.3\times10^{-11}m$$

بمقارنة هذا المقدار مع إبعاد الذرة نجد انه في نفس حدود الذرة . فمثلاً نصف قطر ذرة الهايدروجين يساوي $5.3\times10^{-11}m$. عليه يمكن توقع الطبيعة الموجية للإلكترون المتحرك .

2.3 حيود الإلكترونات Electron Diffraction

عزيزي الدارس ،،

كبرهان عملي لفرض دي برولي حول الموجات المصاحبة للأجسام المادية نستعرض تجربة دافيسون وجيرمر (Davisson & Germer) لاختبار صحة فرضية دي برولي لابد من ملاحظة التداخل (interference) الناتج من الموجات المصاحبة للأجسام المتحركة. قام العالمان دافيسون وجيرمر بتعجيل إلكترونات بين فرق جهد كهربي (V) حيث تكتسب الإلكترونات طاقة حركية.

$$\frac{1}{2}mv^2 = eV \tag{2.3}$$

v, e, m هى كتلة الالكترون وشحنتة وسرعتة، عليه فان

$$v = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \tag{3.3}$$

الآن نحسب موجة دي برولي لهذا الإلكترون ذو السرعة الموضحة بالعلاقة السابقة

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} = \frac{h}{\sqrt{2meV}} \tag{4.3}$$

بالتعويض عن مقدار الجهد الكهربي الذي أستخدم لتعجيل الإلكترونات (V = 54V) تكون موجة دي برولي المصاحبة للإكترون هي

$$\lambda = \frac{6.6x10^{-34}\,J.s}{\sqrt{2(9.1x10^{-31}kg)(1.6x10^{-19}C)(54V)}}$$

$$\lambda = 0.166\ nm \qquad = 1.66\ Å \tag{5.3}$$

تم إجراء التجربة على بلورات النيكل حيث كانت أبعادها $d = 9.1$ Å.

الآن باستخدام شرط التداخل من قانون براغ فإن

$$n\lambda = d \sin\theta \tag{6.3}$$

حيث (n) هي الرتبة، θ هي الزاوية التي يصنعها "شعاع" الإلكترونات الساقط مع سطح البلورة. نفرض أن التداخل قد حدث عند الرتبة الأولى (n=1)، والزاوية θ التي أعطت أكبر شدة للتداخل كانت عند الزاوية 65^o ، عليه فإن الطول الموجي من المعادلة (6.3)هو

$$\lambda = 2\ (9.1x10\text{-}10)\ [\sin(65o)]$$
$$\lambda = 1.65\ Å \tag{7.3}$$

هذه النتيجة تكاد تكون متطابقة مع الحسابات النظرية وبهذا فقد تأكد وجود الموجات المصاحبة للإلكترون المعجل حيث أن الإلكترونات هي جسيمات مادية وقد حدث لها تداخل تماماً كما يحدث للموجات.

تدريب(1)

أحسب طول موجة دى برولى

1. لكرة كتلتها 66 g تتحرك بسرعة $20\ m.s^{-1}$.
2. لإلكترون يتحرك بسرعة $10^8\ m.s^{-1}$.

أسئلة تقويم ذاتي

1. ما هو اقتراح العالم دى برولي عن الطبيعة الموجية للجسيمات؟
2. اكتب نص فرض دى برولى
3. اختبر صحة فرضية دي برولي
4. احسب موجة دي برولي لإلكترون ذو سرعة اذا علم ان مقدار الجهد الكهربي الذي أستخدم لتعجيل الإلكترونات (V = 40V)

3.3 مبدأ عدم التيقن لهاينبرج

Heisenberg Uncertainty Principle

عزيزي الدارس، لقد حاول العالم هايزنبرج إيجاد المعني الطبيعي لموجات دى برولي التي تصاحب الجسيمات المادية في حركتها. ووجد أن الطبيعة الموجية للجسيمات المتحركة ولدت نوع من القيود في تحديد وقياس خواصها المادية مثل الموضع، الاندفاع ، الطاقة.

افترض هايزنبرج علاقة عكسية تربط ما بين عدم اليقين في موضع الجسم (Δx) وعدم اليقين في اندفاع الجسم (Δp) . هذا يعني انه يوجد حد ادني للمقدار $(\Delta x)(\Delta p)$ ، أي انه لا يمكن قياس موضع الجسم واندفاعه في آن واحد بدقه عالية.

افرض إننا نريد قياس موضع واندفاع إلكترون متحرك في لحظة زمنية محددة . نفرض أيضاً انه من اجل القياس تم استخدام فوتون ضوئي ذو طول موجي λ كما مبيّن بالشكل(11.2)

الشكل(11.2)

اندفاع الفوتون الضوئي يعطي بالعلاقة

$$p = \frac{h}{\lambda} \qquad (8.3)$$

نتيجة لعملية القياس فإن اندفاع الإلكترون سوف يتغير بقيمة مقاربة لقيمة اندفاع الفوتون ، أي انه

$$\Delta p_e \approx \frac{h}{\lambda} \qquad (9.3)$$

وطول موجة الإلكترون سيكون

$$\lambda \approx \frac{h}{\Delta p_e} \qquad (10.3)$$

إذا استخدمنا نفس الفوتون لقياس موضع الإلكترون فيمكن افتراض ان عدم اليقين في موضع الإلكترون (Δx) سيكون علي الأقل في حدود الطول الموجي للفوتون ، أي انه

$$\Delta x_e \geq \lambda \qquad (11.3)$$

بالتعويض عن λ من المعادلة (10.3) نحصل على

$$\Delta x.\Delta p \sim h \qquad (12.3)$$

يمكن إدخال الثابت $\hbar = h/2\pi$ واستنتاج المعادلة (12.3) لتكون على الصورة

$$\Delta x.\Delta p \geq \hbar \qquad (13.3)$$

الثابت $\hbar = 1.05 \times 10^{-34}\ J.s$ ذا أهمية عظيمة في الفيزياء الحديثة وهو يمثل الوحدة الأساسية لقياس الاندفاع الزاوي .

العلاقة (13.3) تسمي مبدأ عدم اليقين لهايزبرج و ينص هذا المبدأ على أن : –

> حاصل ضرب عدم اليقين في موضع الجسم (Δx) في لحظة زمنية معينة وعدم اليقين في اندفاعه (Δp) في نفس اللحظة الزمنية يساوي علي الأقل $(\hbar)$.

ونجد في الفضاء الثلاثي الإبعاد تأخذ علاقة عدم اليقين لهايزنبرج الشكل التالي

$$\left.\begin{aligned}\Delta x \,.\, \Delta p_x &\geq \hbar \\ \Delta y \,.\, \Delta py &\geq \hbar \\ \Delta z \,.\, \Delta p_z &\geq \hbar\end{aligned}\right\} \qquad (14.3)$$

أيضاً يمكن استنتاج علاقة مشابهة بين عدم اليقين في الطاقة الصادرة من جسيم ذري (ΔE) والزمن الذي تم فيه انبعاث الطاقة (Δt) ، وهي

$$\Delta E . \Delta t \geq \hbar \qquad (15.3)$$

◄◄ مثال (7)

نصف قطرة ذرة الهايدروجين هو $5.3\times10^{-11}\ m$ باستخدام علاقة عدم اليقين لهايزنبرج أحسب أقل طاقة يمكن أن يحملها الإلكترون في هذه الذرة .

الحل

بفرض أن عدم اليقين في موضع الإلكترون (Δx) هو نصف قطر ذرة الهايدروجين $\Delta x = 5.3\times10^{-11}\ m$

فإن عدم اليقين في اندفاعه سيكون

$$\Delta p \geq \frac{h}{\Delta x} = \frac{1.05\times^{-34} J.s}{5.3\times10^{-11} m} = 1.98\times10^{-24}\ kg\,.m\,.s^{-1}$$

طاقة حركة الإلكترون هي

$$T = \frac{p^2}{2m} = \frac{(1.98\times^{-24} kg.m.s^{-1})}{2\times9.1\times10^{-31} kg}$$

$$= 2.15\times10^{-18}\ J = \underline{\underline{13.5\ eV}}$$

من المعلوم أن طاقة الإلكترون في المستوي الأرضي لذرة الهايدروجين تساوي 13.6 eV والمقدار الذى حصلنا عليه بإستخدام مبدأ عدم اليقين قريب جداً من هذه القيمة.

أسئلة تقويم ذاتي

1. ناقش مبدأ عدم التيقن لهاينبرج.
2. اكتب نص مبدأ عدم اليقين لهايزبرج.

4.3 الدالة الموجية Wave function

عزيزي الدارس،،

بعد ما تبين أن الجسيمات المادية تسلك سلوكاً موجياً عند حركتها فقد دعت الحاجة إلى إيجاد معادلة موجية لوصف حركة هذه الجسيمات ومعرفة كيفية تحكم هذه الموجات في حركة الجسيمات المادية. الدالة الموجية التي يمكن استخدامها لوصف حركة الجسيم المادي هو ما تهتم به ميكانيكا الكم (Quantum Mechanics).

من صفات هذه الدالة أنها دالة مركبة (complex) تتكون من جزء حقيقي وجزء تخيلي ولا توجد طريقة لقياسها مباشرة وبالتالي فهي في حد ذاتها ليست لها أي أهمية فيزيائية غير أن مربع قيمتها المطلقة يتناسب مع احتمال وجود الجسيم في موضع معين عند لحظة زمنية معينة.

امتداداً لأفكار دى برولى حول الموجات التي تصاحب الجسيمات المادية حاول شرودنجر (1926) الاستفادة من هذه المفاهيم في تحسين نظرية ميكانيكا الموجات حيث يمكن وصف الجسم المادي من خلال الدالة الموجية $\psi(\vec{r},t)$ التي تصاحبه ، وبالتالي معرفة خصائص الجسم مثل طاقته ، اندفاعه ، وغيرها ...

المقدار $\left|\psi(\vec{r},t)\right|^2$ يتناسب مع احتمال (Probability) وجود الجسم في مكان معين في لحظة معينة . هذا يعني أنه لو استطعنا الحصول على الدالة الموجية المناسبة فإن: –

$$P(\vec{r},t)dv = \left|\psi(\vec{r},t)\right|^2 dv \qquad (16.3)$$

يمثل احتمال وجود الجسيم في عنصر الحجم dv عند اللحظة الزمنية t . وعليه فإن كثافة الاحتمال (Probability density) تعطي بالآتي

$$P(\vec{r},t) = \left|\psi(\vec{r},t)\right|^2 \qquad (17.3)$$

لاحظ ان

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left|\psi(\vec{r},t)\right|^2 dv = 1 \qquad (18.3)$$

وذلك لأن احتمال وجود الجسم في أي نقطة في الفضاء عند أي لحظة زمنية يجب أن يساوي الواحد الصحيح. والمعادلة(18.3) تسمى شرط المعايرة (Normalization condition) ومن الشروط التى يجب توافرها فى الدالة الموجية أن تكون دالة وحيدة القيمة ومستمرة (continuous) .وكذلك مشتقاتها التفاضلية الجزيئية يجب أن تكون مستمرة .

5.3 معادلة شرودنجر الموجية

Schrödinger Wave equation

اقترح شرودنجر معادلة رياضية تصف الموجات المادية أطلق عليها الدالة الموجية ورمز لها بالرمز $\psi(x,t)$ في بعُد واحد أو $\psi(x,y,z,t)$ في ثلاث إبعاد فراغية. وكما هو واضح فإن الدالة الموجية $\psi(x,t)$ هى دالة لإحداثيات الجسيم في المكان والزمان. إن معادلة شرودنجر في ميكانيكا الكم تناظر قانون نيوتن الثاني في الميكانيكا الكلاسيكية. الشروط التالية يجب توافرها فى معادلة شرودينجر:

1. إن لا تتعارض هذه المعادلة مع النظريات والمبادئ السابقة التي أمكن التحقق منها عملياً مثل نظرية الفوتون لاينشتاين معادلة (15.2) ومبدأ دي برولي للموجات المادية معادلة (1.3). لتسهيل المتابعة نعيد كتابة هاتين المعادلتين مرة أخرى:

$$\left.\begin{aligned} E &= h\nu \\ \lambda &= \frac{h}{p} \end{aligned}\right\} \qquad (19.3)$$

2. الطاقة الكلية لجسم كتلته (m) واندفاعه (p) وطاقة وضعه (V) هي

$$E = \frac{p^2}{2m} + V \qquad (20.3)$$

هذه المعادلة يجب أن تتفق مع معادلة شرودينجر الموجية.

3. معادلة شرودينجر يجب أن تكون خطية (Linear) أي أنه إذا كان $\psi_1(x,t)$ و $\psi_2(x,t)$ يحققان معادلة شرودينجر فلابد أن يكون

$$\psi(x,t) = c_1\psi_1(x,t) + c_2\psi_2(x,t) \qquad (21.3)$$

4. حيث c_1 و c_2 ثابتان، هو أيضاً حل يحقق معادلة شرودينجر.

5. بفرض أن الجسيم حراً ($V(x, t) = V_o$) حيث V_o مقداراً ثابتاً فإنه يمكن تمثيل الجسيم بدالة موجية تكون على الصورة

$$\psi(x,t) = \sin(kx - \omega t) \qquad (22.3)$$

أو بالصورة العامة

$$\psi(x,t) = \cos(kx - \omega t) + \sin(kx - \omega t)$$

$$\psi(x,t) = e^{i(kx - \omega t)} \qquad (23.3)$$

حيث k هو العدد الموجي (wave number)،

ω هي التردد الزاوي (angular frequency)

باسترجاع المعادلتان ((19.3)) يمكن كتابة المعادلة (20.3)) لتكون

$$\frac{h^2}{2m\lambda} + V(x,t) = h\nu \qquad (24.3)$$

نعيد كتابة المعادلة (3.24) بعد إدخال k و ω لتصبح

$$\frac{\hbar^2}{2m\lambda} k^2 + V(x,t) = \hbar\omega \qquad (25.3)$$

بما أن المعادلة(25.3) تحقق الشرطين (19.3) و (20.3) عليه فحتى تحقق معادلة شرودينجر نفس الشرطين يجب أن تتفق معادلة شرودينجر مع المعادلة (23.3) بمقارنة المعادلتين (25.3) و(23.3) نجد أن

- الحد الأول من في معادلة (25.3) يحتوى على k^2 والذي يمكن الحصول عليه من المشتقة الثانية بالنسبة للمتغير (x) للدالة الموجية.
- الحد الثاني، عبارة عن طاقة الوضع ولضمان أن تكون الدالة خطية فيجب أن يحتوى هذا الحد على الدالة الموجية نفسها.
- الحد الثالث في المعادلة يحوى التردد الزاوي (ω) والذي يمكن الحصول عليه بتفاضل المعادلة (23.3) بالنسبة للزمن (t).

إذا تحققت جميع الشروط والاعتبارات التي ذكرناها فإن معادلة شرودينجر يمكن أن تكتب على الصورة التالية

$$a\frac{\partial^2\psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t)\psi(x,t) = b\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t} \qquad (26.3)$$

حيث a و b ثابتان.

الآن نوجد المشتقات.

$$\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial x} = -k\sin(kx-\omega t) + ik\cos(kx-\omega t)$$

$$\frac{\partial^2\psi(x,t)}{\partial x^2} = -k^2\cos(kx-\omega t) - ik^2\sin(kx-\omega t)$$

$$= -k^2[\cos(kx-\omega t) + i\sin(kx-\omega t)]$$

$$\boxed{\frac{\partial^2\psi(x,t}{\partial x^2}) = -k^2\psi(x,t)} \qquad (27.3)$$

$$\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t} = \omega\sin(kx-\omega t) + i\omega\cos(kx-\omega t)$$

$$= -i\omega[\cos(kx-\omega t) + i\sin(kx-\omega t)$$

$$\boxed{\partial\frac{\psi(x,t)}{\partial t} = -i\omega\psi(x,t)} \qquad (28.3)$$

بتعويض المشتقات في (26.3) نجد أن

$$\boxed{a[-k^2\psi(x,t)] + V(x,t)\,\psi(x,t) = b[-i\omega\,\psi(x,t)]} \qquad (29.3)$$

لايجاد a و b نقارن المعادلتان (29.3) (26.3)

$$\boxed{-ak^2 = \frac{\hbar^2k^2}{2m} \Rightarrow a = -\frac{\hbar^2}{2m}} \qquad (30.3)$$

$$\boxed{-ib\omega = \hbar\omega \Rightarrow b = i\hbar} \qquad (31.3)$$

اخيراً نعوض قيم a و b فى معادلة شرودنجر (26.3)

$$\boxed{-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\partial^2\psi(x,t)}{\partial x^2} + V(x,t)\psi(x,t) = i\hbar\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t}} \qquad (32.3)$$

المعادلة (32.3) تسمي بمعادلة شرودينجر المعتمدة على الزمن (Time-dependent Schrödinger equation) والتي تصف حركة الجسيم المادي من خلال الدالة الموجية $\psi(x,t)$.

عند تعميم المعادلة في الأبعاد الثلاث تصبح على الصورة

$$\frac{-\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi(x,y,z)+V(x,y,z)\,\psi(x,y,z)=E\,\psi(x,y,z) \qquad (33.3)$$

حيث يُعطي مؤثر لابلاس Laplacian Operator بالآتي

$$\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \qquad (34.3)$$

6.3 معادلة شرودينجر المستقلة عن الزمن

Time-independent Schrödinger equation

عزيزي الدارس ،، باستخدام طريقة فصل المتغيرات في معادلة شرودينجر المعتمدة على الزمن يمكن استخلاص معادلته المستقلة عن الزمن. في هذه الحالة تعتبر طاقة الوضع دالة في إحداثيات المكان فقط ولا تعتمد على الزمن، أيضاً للتبسيط يمكن اعتبار الحركة في بُعد واحد هو (x).

في طريقة فصل المتغيرات نفترض أنه يمكن كتابة حل المعادلة على صورة حاصل ضرب دالتين تعتمد احداهما على الموضع (x) فقط بينما تعتمد الأخرى على الزمن (t) فقط، أي

$$\psi(x,t) = X(x)\,T(t) \tag{35.3}$$

بإيجاد المشتقات المناسبة

$$\frac{\partial^2\psi(x,t)}{\partial x^2} = T(t)\frac{d^2X(x)}{dx^2} \tag{36.3}$$

$$\frac{\partial\psi(x,t)}{\partial t} = X(x)\frac{dT(t)}{dt} \tag{37.3}$$

بتعويض المعادلتين (36.3) و(37.3) في معادلة (32.3)

$$-\frac{\hbar^2}{2m}T(t)\frac{d^2X(x)}{dx^2} + V(x)X(x)T(t) = i\hbar X(x)\frac{dT(t)}{dt} \tag{38.3}$$

بالقسمة على X(x)T(t) نحصل على

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{1}{X(x)}\frac{d^2X(x)}{dx^2} + V(x) = i\hbar\frac{1}{T(t)}\frac{dT(t)}{dt} \tag{39.3}$$

يتضح من المعادلة (39.3) أن طرف المعادلة الأيسر يعتمد على (x) فقط بينما يعتمد طرفها الأيمن على (t) فقط وهذا لا يتأتى إلا إذا كانت قيمة الطرفين مقداراً ثابتاً، و ليكن (C)، إذن

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{1}{X(x)}\frac{d^2X(x)}{dx^2} + V(x) = C \tag{40.3}$$

$$\mathbf{i\hbar\,\frac{1}{T(t)}\,\frac{dT(t)}{dt} = C} \tag{41.3}$$

المعادلة (41.3)هي معادلة تفاضلية من الدرجة الأولى في المتغير (t) تُحل كالآتي

$$\frac{dT(t)}{T(t)} = \frac{C}{i\hbar}dt$$

$$\ln T(t) = \frac{Ct}{i\hbar} = -\frac{iCt}{\hbar}$$

$$T(t) = e^{-iCt/\hbar}$$

$$T(t) = \cos\left(\frac{Ct}{\hbar}\right) - i\sin\left(\frac{Ct}{\hbar}\right) \qquad (42.3)$$

المعادلة (42.3) هي معادلة موجية دورية على صورة

$$\phi(t) = \cos(\omega t) - i\sin(\omega t) \qquad (43.3)$$

ترددها الزاوي هو ω. بمقارنة المعادلتين(42.3) و(43.3) يمكن الحصول على المقدار الثابت

$$C = \hbar\omega = h\nu \qquad (44.3)$$

يتبين الآن أن المعادلة(44.3) تمثل معادلة طاقة الفوتون التي نُوقشت سابقاً، أي أن الثابت C يمثل طاقة الجسيم E.

$$C = h\nu = E \qquad (45.3)$$

عليه فإن حل المعادلة (41.3) يكون

$$T(t) = e^{-iEt/\hbar} \qquad (46.3)$$

أيضاً فإن المعادلة (40.3) تأخذ الشكل

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2X(x)}{dx^2} + V(x)X(x) = E\,X(x) \qquad (47.3)$$

باستخدام الرمز المتعارف عليه للداله الموجية فان معادلة (47.3) تكتب كالاتى

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2}+V(x)\psi(x)=E\,\psi(x) \qquad (48.3)$$

هذه هي معادلة شرودينجر المستقلة عن الزمن معطية في بُعد واحد.

أسئلة تقويم ذاتي

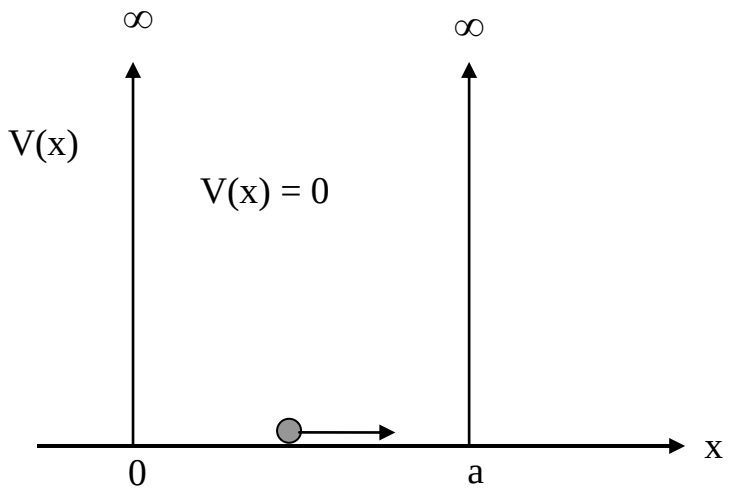
؟	وضح كيف يمكن الحصول عاى معادلة شرودينجر المستقلة عن الزمن؟

7.3 مسألة جسيم داخل بئر لانهائية التعمق

Particle in a Potential well

عزيزي الدارس ،،

في هذا الجزء سوف نستعرض مسألة جسيم وضع داخل بئر جهد لا نهائية التعمق و نفرض أن كتلة الجسم هي (m) وأنه يتحرك في بُعد واحد (x) داخل البئرالبُعد بين جدرانها هو (a) كما موضح بالشكل. سوف نفترض أن حركة الجسم تكون فقط في اتجاه محور (x). نتيجة للتصادم المرن بين الجسيم وجدران البئر فإن طاقة الجسم تظل ثابتة.



الشكل (12.3) بئر لا نهائية التعمق

يمكن التعبير عن الجهد بالآتي

$$\left.\begin{array}{ll} V(x)=0 & 0 \le x \le a \\ =\infty & a < x < 0 \end{array}\right\} \qquad \text{(49.3) أ}$$

بما أن الجسيم يوجد داخل البئر فإن دالته الموجية خارج البئر تنعدم (تساوي صفراً) أي

$$\psi(x) = 0 \qquad a \le x \le 0 \qquad \text{(49.3) ب}$$

بافتراض ان طاقة الوضع داخل البئر مساوية للصفر فإن معادلة شرودنجر المستقلة عن الزمن ، في اتجاه محور (x) ، هي

$$\frac{-\hbar^2}{2m}\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} = E\,\psi(x)$$

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + \frac{2mE}{\hbar^2}\psi(x) = 0 \qquad (50.3)$$

والتي يمكن اختزالها على الصورة

$$\frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + k^2\,\psi(x) = 0 \qquad (51.3)$$

حيث

$$k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} \qquad (52.3)$$

المعادلة (51.3) هي معادلة تفاضلية من الدرجة الثانية في المتغير (x) وحلها العام يكون على الصورة

$$\psi(x) = A\sin kx + B\cos kx \qquad (53.3)$$

حيث B, A ثابتان.

بما أن الدالة $\psi(x)$ تساوي صفراً خارج البئر فإن

$$\psi(x=0) = \psi(x=a) = 0 \qquad (54.3)$$

بالتعويض في معادلة (53.3))

$$\psi(0) = 0 + B = 0$$

ينتج أن

$$B = 0 \qquad (55.3)$$

وبالتالي فإن المعادلة (53.3) تصبح

$$\psi(x) = A\sin kx \qquad (56.3)$$

وبتطبيق الشرط الثاني $\psi(x=a) = 0$ ينتج

$$0 = A\sin ka \qquad (57.3)$$

أي انه

$$ka = n\pi \qquad (58.3)$$

حيث n عدد صحيح.

بالتعويض في معادلة (52.3)

$$k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar}} = \frac{n\pi}{a} \qquad (59.3)$$

إذن طاقة الجسيم تكون

$$E_n = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2m\,a^2} \qquad (60.3)$$

من الواضح أن طاقة الجسم الموضوع داخل بئر الجهد هي طاقة مكماءة (quantized) أي انه توجد فقط كميات محددة من الطاقة مسموح بها تُحدد بالعدد (n) والذي يسمي بالعدد الكمي (quantum number).

لإيجاد الدالة الموجية للجسيم نعوض عن قيمة k في المعادلة (56.3) .

$$\psi(x) = A \sin \frac{n\pi}{a}\, x \qquad (61.3)$$

باستخدام شرط المعايرة يمكن إيجاد قيمة الثابت (A) كالآتي

$$\begin{aligned} &\int_0^a |\psi\ (x)|^2\, dx \quad = 1 \\ &1 = \int_0^\infty \psi_n^*(x)\ \psi_n(x)\ dx \\ &= A^2 \int_0^a \sin^2 \frac{n\pi}{a}\ dx \\ &= A^2 \cdot \frac{a}{2} \end{aligned} \qquad (62.3)$$

أي أن

$$A = \sqrt{\frac{2}{a}} \qquad (63.3)$$

وأخيراً نحصل على الدالة الموجية للجسيم

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{a}}\ \sin \frac{n\pi}{a}\, x \qquad (64.3)$$

قيم الطاقة E_n تسمى القيم المميزة للطاقة (eigenvalues) والدوال الموجية $\psi_n(x)$ تسمى الدوال المميزة للموجة (eigenfunctions) .

◄◄ مثال (8)

باستخدام النتيجة (64.3.) في مسألة الجسيم داخل بئرالجهد ، استنتج العلاقة بين طول الموجة (λ) والمسافة بين جدران البئر (a).

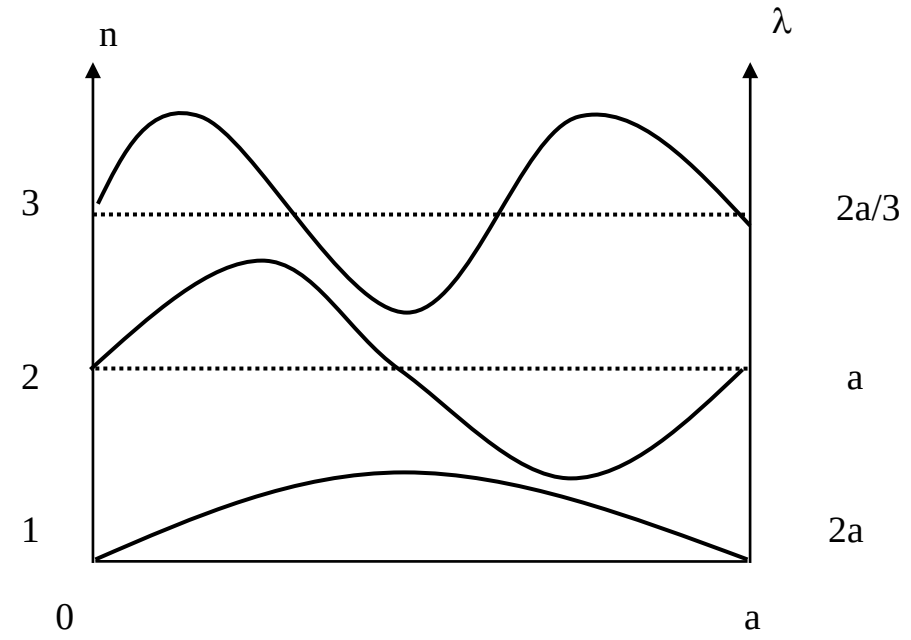
الحل

من طاقة الجسيم نحصل على اندفاعه P $\quad p = \sqrt{2 m E_n} = \frac{\pi \hbar n}{a}$

وباستخدام معادلة دى برولى $\quad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h a}{\pi \hbar n} = \frac{2a}{n}$

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

بعض الحالات موضحة في الشكل التالى



أطوال الموجات λ المصاحبة للجسيم عند طاقات الجسيم المقابلة للعدد الكمى 1، 2، 3

أسئلة تقويم ذاتي

ناقش مسألة جسيم داخل بئرلانهائية التعمق

الخلاصة

عزيزي الدارس,

في هذه الوحدة نؤكد على ما أكدناه في البداية عن ضرورة تقويم هذه الوحدة، ولكن ما الذي ناقشناه ؟

لقد ناقشنا وعرفنا ماذا نعني بموجة دى برولى وبعد ذلك عرفنا حيود الالكترونات و مبدأ عدم التيقن لهايزنبرج ثم شرحنا الدالة الموجية ، وكل من معادلة شرودينجر والمعادلة المستقلة عن الزمن واخيراً مسألة جسيم داخل بئر لانهائية التعمق.

نأمل أن تكون هذه الوحدة قد أضافت المزيد إلى معلوماتك الثرة وان تستعد الي الوحدة الثالثة إنشاء الله.

لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية

عزيزي الدارس،،

بعد أن فرغت من دراسة هذه الوحدة الآن أصبح لديك حصيلة كبيرة من المعلومات المفيدة و سننتقل الي الوحدة الرابعة حيث سنتناول الفيزياء الذرية ونستعرض مفهوم الأطياف الذرية و دراسة نموذج بوهر للذرة والنتائج التي حققتها النظرية ، ثم نتعرف على تجربة فرانك وهيرتز ، أخيراً دراسة الأشعة السينية ومعرفة أساسيات هذه الأشعة وطريقة انتاجها و ما هو الطيف المستمر

نرجو إن تكون وحدة مفيدة لك وان تساهم معنا في نقدها وتقييمها.

إجابات التدريبات

تدريب (1)

1. فإن موجة دى برولى تعطى بالعلاقة التالية

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{(6.6\times10^{-34}J.s)}{(66\times10^{-3}kg)(20\ m.s^{-1})} = 0.5\times10^{-33}$$

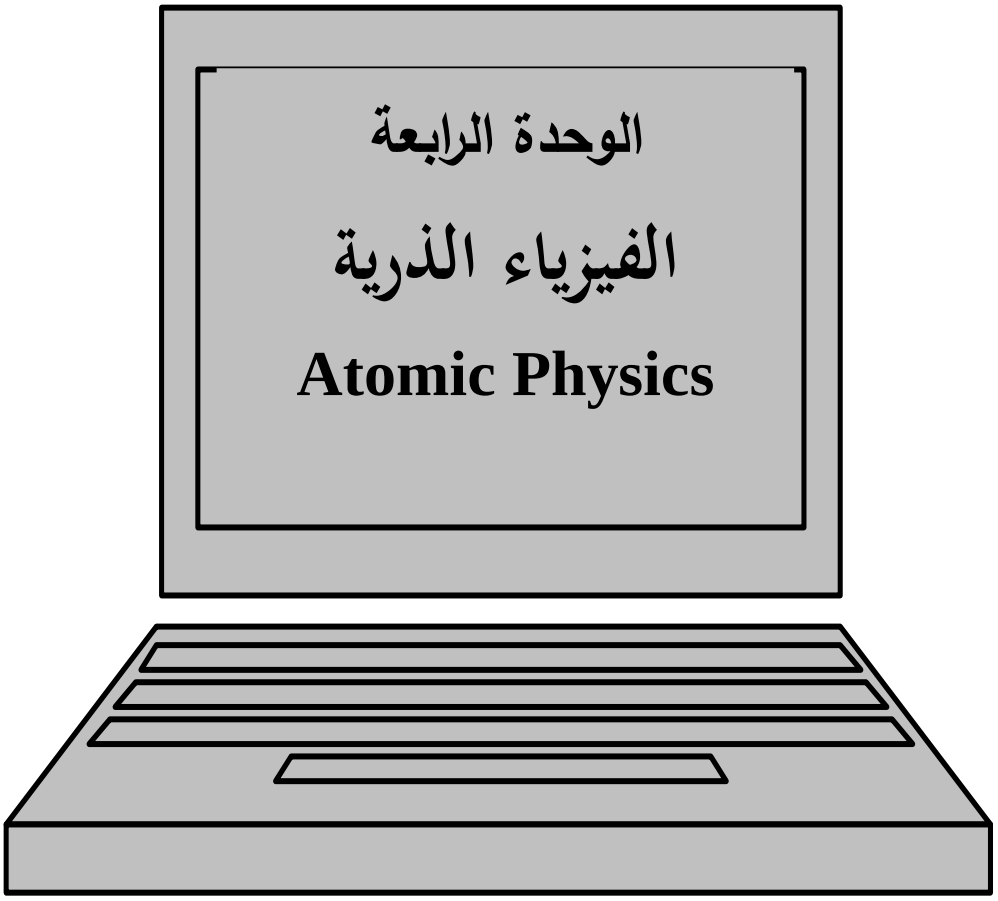
بالتعويض عن كتلة الإلكترون عند السكون $m_o = 9.1\times10^{-31}\ kg$

فان طول موجة دى برولى

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{(6.6\times10^{-34}J.s)}{(9.1\times10^{-31}kg)(10^{8}\ m.j^{-1})}$$

مسرد المصطلحات

Wave Nature of Particles	الطبيعة الموجية للجسيمات
De Brogalie Wave	موجة دى برولى
Electron Diffraction	حيود الإلكترونيات
interference	التداخل
Heisenberg Uncertainty Principle	مبدأ عدم التيقن لهاينبرج
Wave function	الدالة الموجية
Quantum Mechanics	ميكانيكا الكم
Probability	احتمال
Normalization condition	شرط المعايرة
continuous	مستمرة
Schrödinger Wave equation	معادلة شرودنجر الموجية
wave number	العدد الموجي
angular frequency	التردد الزاوي
Time-dependent Schrödinger equation	معادلة شرودينجر المعتمدة على الزمن
Laplacian Operator	مؤثر لابلاس
Time-independent Schrödinger equation	معادلة شرودينجر المستقلة عن الزمن
Particle in a Potential well	جسيم داخل بئرلانهائية التعمق
quantized	مكماءة
quantum number	العدد الكمي
eigenvalues	القيم المميزة
eigenfunctions	الدوال المميزة للموجة


الوحدة الرابعة
الفيزياء الذرية
Atomic Physics

محتويات الوحدة الرابعة

الموضوع	الصفحة
مقدمة	**113**
تمهيد	**113**
اهداف الوحدة	**114**
4. الفيزياء الذرية	**115**
1.4 . الأطياف الذرية	**116**
2.4. نموذج بوهر لذرة الهيدروجين	**117**
1.2.4النتائج التي حققتها نظرية بوهر	**122**
2.2.4. تجربة فرانك وهيرتز	**124**
3.2.4. الأعداد الكمية	**126**
3.4.الأشعة السينية	**129**
1.3.4. أساسيات الأشعة السينية	**129**
2.3.4. إنتاج الأشعة السينية	**130**
3.3.4. الطيف المستمر	**131**
4.3.4. خطوط الطيف المميز	**132**
الخلاصة	**136**
لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية	**136**
إجابات التدريبات	**137**
مسرد المصطلحات	**138**

مقدمة

تمهيد

عزيزي الدارس,

مرحباً بك إلى الوحدة االرابعة من مقرر الفيزياء الحديثة وهي بعنوان الفيزياء الذرية و تتألف من ثلاثة أقسام رئيسية

في القسم الاول نتعرف علي مفهوم الأطياف الذرية ، اما في القسم الثاني فسنتطرق الي نموذج بوهر للذرة ثم ندرس النتائج التي حققتها نظرية بوهر و نتعرف على تجربة فرانك وهيرتز ، و ماذا نعني بالأعداد الكمية ؟

و في القسم الاخير نقوم بدارسة الأشعة السينية ومعرفة أساسيات هذه الأشعة وكيفية دارسة انتاج الأشعة السينية وماذا نعني بالطيف المستمر وأخيراً نقوم بدارسة خطوط الطيف المميز

وقد ذيلنا هذه الوحدة بسرد شامل للمصطلحات العلمية التي وردت في النص الرئيسي، كما حرصنا في هذه الوحدة على وضع أسئلة تقويم ذاتي، وتدريبات كفيلة بتلبية احتياجاتك التعليمية والتي تقدمها لمرشدك الميداني.

عزيزي الدارس،،

أهلاً بك مرة أخري إلي هذه الوحدة ونرجو أن تستمتع بدراستها وأن تستفيد منها وأن تشاركنا في نقدها وتقييمها.

أهداف الوحدة

عزيزي الدارس،،

بعد فراغك من دراسة هذه الوحدة يتوقع منك أن تكون قادراً علي أن:

1. تفهم أهمية دراسة الأطياف الذرية.
2. تشرح نموذج بوهر للذرة.
3. تتعرف على النتائج التي حققتها نظرية بوهر.
4. تشرح تجربة فرانك وهيرتز .
5. تقارن بين الأعداد الكمية
6. تعرف الأشعة السينية
7. تتحصل على الأشعة السينية
8. توضح الطيف المستمر وماذا نعني بدارسة خطوط الطيف المميز
9. تحل مسائل وتمارين.

4. الفيزياء الذرية

عزيزي الدارس،

لقد كان النموذج الأول للذرة هو ذلك الذي اقترحه تومسن في عام 1898 . وكانت ذرة تومسن عبارة عن كرة ذات شحنة موجبة ، بداخلها إلكترونات ذات شحنة سالبة ، بحيث تتساوي الشحنة السالبة والشحنة الموجبة.

في عام 1911 أجرى رذرفورد تجربة لتشتيت جسيمات الفا بواسطة شريحة رقيقه من الذهب . لقد لوحظ من التجربة أن معظم جسيمات الفا قد خرجت بدون تغيير في المسار ، ولكن هنالك قلة قد انحرفت بزوايا كبيرة . ونتيجة لذلك فقد افترض رذرفورد بأن الذرة تتكون من نواة صغيرة تتركز فيها كل الشحنة الموجبة وكل الكتلة تقريباً. أما الإلكترونات فأنها توجد ، على مسافة بعيدة نسبياً، حول النواة .

نموذج الذرة التي أقترحه رذرفورد لم يقدم تفسيراً لأطياف الذرة الخطية التي عرفت في ذلك الزمان. كما أنه لم يقدم تفسيراً لثبات مدرارات الإلكترونات حول النواة. وقد كان الفشل ناتجاً من قصور الفيزياء الكلاسيكية. فبينما نجحت قوانينها في تفسير الظواهر بالنسبة للأجسام الكبيرة فأنها عجزت عن تفسير دوران الإلكترونات حول النواة دون أن يتقلص مدارها . فعلي حسب قوانين الفيزياء التقليدية فإن مدار الإلكترون يجب أن يتقلص باستمرار حتى يستقر الإلكترون عند النواة. لأنه في هذه العملية يبث طيفاً مستمراً وبالتالي يفقد طاقته. لقد استطاع بوهر تقديم نموذجاً أفضل للذرة في عام 1913. وذلك عندما أستعان بنظرية الكم.

1.4 الأطياف الذرية Atomic Spectro

عزيزي الداريس ،،

لقد لوحظ بأن الجوامد عند تسخينها لدرجات حرارة مختلفة ، تبث طيفاً مستمراً، يشمل كل الأطوال الموجية. ولقد وضحت نظرية بلانك الشكل العام للطيف ، ولكنها لم توضّح مصادر الطيف . ومصادر الطيف في هذه الحالة هي ذرات مختلفة ومتفاعلة مع بعض . إذ أن المسافات التي تفصل الذرات عن بعضها البعض ، تكون صغيرة جداً.

بالنسبة للغازات ، فالمسافات بين الذرات بعيدة بحيث يمكن تجاهل أى تفاعل بينها وبالتالي فمن المتوقع أن يحمل أى شعاع منبعث طابع الذرات الموجودة بالغاز. ولقد لوحظ أنه عند تسخين غاز معين فإن الطيف الناتج يحتوي على أطوال موجية معينة . كذلك فقد لوحظ أنه عندما يسقط ضوء على غاز معين فإنه يتم الامتصاص في أطوال موجية معينة . فيظهر ذلك في شكل خطوط سوداء في خلفية ناصعة .

في عام 1885 قام العالم بالمر (J.J. Balmer) بدراسة طيف الهيدروجين ، فوجد أن الطيف الخطي الأول يكون عند الطول الموجي 65.63 *nm*. والذي يليه يكون عند الطول الموجي 486.3 *nm* ، وأن الخط الأخير يكون عند الطول الموجي 364.6 *nm*. كل تلك الخطوط كانت في الجزء المرئي من الطيف .

أما العلماء باشن (Paschen) ، براكت (Brackett) ، وبفند (Pfund) فقد قاموا بدراسة الطيف الخطي لذرة الهيدروجين في منطقة الأشعة تحت الحمراء . ولقد كانت مجهودات هؤلاء العلماء هي التي مهدت الطريق لفهم التركيب الذري .

2.4 نموذج بوهر لذرة الهيدروجين

عزيزي الدارس،،

اعتمد بوهر في نظريته على الفيزياء التقليدية بالإضافة لنظرية بلانك الكمية الاشعاع . ولقد نجحت نظرية بوهر في وضع صورة للتركيب الذري، تتفق مع الحقائق المعروفة في ذلك الحين عن الطيف الذرى . كما أن النظرية قد طبقت بنجاح على ذرة الهيدروجين. وسنتعرض للنظرية مع التركيز على ذرة الهيدروجين.

افتراضات بوهر كانت كالآتي

1. يدور الإلكترون في مدارت ثابت ، غير مشعه، حول النواة بحيث تتساوي قوة الطرد المركزي (centrifugal force) مع قوة الجذب الكهربية الساكنة (Electrostatic force) بين الإلكترون والنواة. فإذا كان الإلكترون يدور في مدار نصف قطره r ، بسرعة قدرها v ، فإن

$$\frac{mv^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2} \qquad (1.4)$$

حيث

m = كتلة الإلكترون

e = شحنة الإلكترون

$k = 9\times10^9 \ \ Nm^2/c^2$

k = ثابت كولوم

2. المدارات المسموح بها هي فقط تلك التي يكون فيها الاندفاع الزاوي (Angular momentum) يساوي حاصل ضرب عدد صحيح (n) مع ثابت بلانك $(h/2\pi)$.

$$m\,v\,r = \frac{nh}{2\pi} \qquad (2.4)$$
$$n = 1,2,3,.....$$

حيث n يسمي العدد الكمي . وعند الحالة الأرضية $n = 1$

3. انبعاث الأشعاع يكون فقط عندما ينتقل الإلكترون من مدار ذو طاقة عالية إلى مدار آخر ذو طاقة منخفضة . كما يكون امتصاص الأشعة عندما ينتقل الإلكترون من مدار ذو طاقة منخفضة إلى آخر ذو طاقة عالية . ويعتمد تردد الطيف الكهرومغناطيسي على الفق بين الطاقتين. فإذا كانت الطاقة الأولية للإلكترون هي (E_i) والطاقة النهائية هي (E_f)،

$$E_i - E_f = h\nu \qquad (3.4)$$
$$\nu = \text{التردد}$$

من المعادلة (1.4) والمعادلة (2.4) نجد أن نصف قطر المدار (n) هو

$$r_n = \frac{n^2\,h^2}{4\pi^2\,k\,m\,e^2} \qquad (4.4)$$

وتكون سرعة الإلكترون ،

$$v_n = \frac{2\pi\,k\,e^2}{nh} \qquad (5.4)$$

وإذا عوضنا قيمة الثوابت في المعادلة (4.4) نحصل على مقدار نصف قطر المدار :

$$r_n = 0.53\times10^{-10}\,n^2 \qquad (6.4)$$
$$r_1 = 0.53\times10^{-10}\,m \qquad (7.4)$$

∴ المعادلة (7.4) تعطي قيمة نصف قطر المدار الأرضي $(n=1)$ ، بوحدة الأمتار ، لذرة الهيدروجين . ويلاحظ أنه عندما تصبح قيمة $(n=2,3)$ يكون نصف قطر المدار الثاني والثالث $4\,r_1$, $9\,r_1$. بينما تنخفض السرعة إلى $\frac{1}{2}V_1$, $\frac{1}{3}V_1$.

تتكون طاقة الإلكترون من طاقة حركة وطاقة كامنة.

$$\frac{1}{2}\ m\,v^2 = \text{طاقة الحركة}$$

$$-k\ \frac{e^2}{r} = \text{الطاقة الكامنة}$$

∴ الطاقة الكلية للإلكترون خلال حركته حول النواة في المدار (n) هي :

$$E_n = \frac{1}{2}\,m\ v^2\ - \frac{k\,e^2}{r} \qquad (8.4)$$

بتعويض سرعة الإلكترون (v_n) من المعادلة(5.4) ونصف قطر المدار (r_n) من المعادلة (4.4) نحصل على

$$E_n = \frac{m}{2}\left(\frac{2\pi\ k\ e^2}{n\,h}\right) - k\ e^2\left(\frac{4\pi^2\ k\ m\ e^2}{n^2\,h^2}\right)$$

$$\therefore E_n = -\ \frac{2\pi^2\ m\ k^2\ e^4}{n^2\,h^2} \qquad (9.4)$$

وإذا عوضنا قيم الثوابت من المعادلة(9.4) نحصل على

$$E_n = -\ \frac{13.6}{n^2}\quad eV \qquad (10.4)$$

وبالتالي تكون طاقة المدار الأول (n=1) لذرة الهيدروجين تساوي (-13.6 eV) ، وهي الحالة الأرضية (ground state) . وبذلك تكون طاقة التأين (ionization energy) وطاقة الربط (binding energy) للمستوي الأسفل هي 13.6 eV .

عندما يهبط الإلكترون من مدار أعلي (E_i) إلى حالة دنيا (E_f) فإن تردد الفوتون (v) المنبعث يعطي بالعلاقة

$$v = \frac{E_i - E_f}{h} \qquad (11.4)$$

إذن من المعادلة 9.4 والمعادلة 11.4 نحصل على العلاقة

$$v = \frac{2\pi^2\ k^2\ m\,e^4}{h^3}\qquad \left(\frac{1}{n_f^2}\ -\ \frac{1}{n_i^2}\right) \qquad (12.4)$$

حيث n_i و n_f هما الأعداد الكمية للحالة الابتدائية والحالة النهائية . وبالتالي يكون الطول الموجي للإشعاع الذي تشعه الذرة عندما يهبط الإلكترون من الحالة العليا إلى الحالة الدنيا هو:

$$\lambda = c / \nu$$

$$1/\lambda = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{c h^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \qquad (13.4)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

$$R = \frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{c h^3} \qquad (14.4)$$

ثابت رايدبرج = R

قيمة الثابت R تتفق مع القيمة التي توصل اليها رايد بيرج عام 1898 عند دراسته للطيف الخطي للذرات . وقد كان في ذلك دعماً كبيراً لنظرية بوهر .

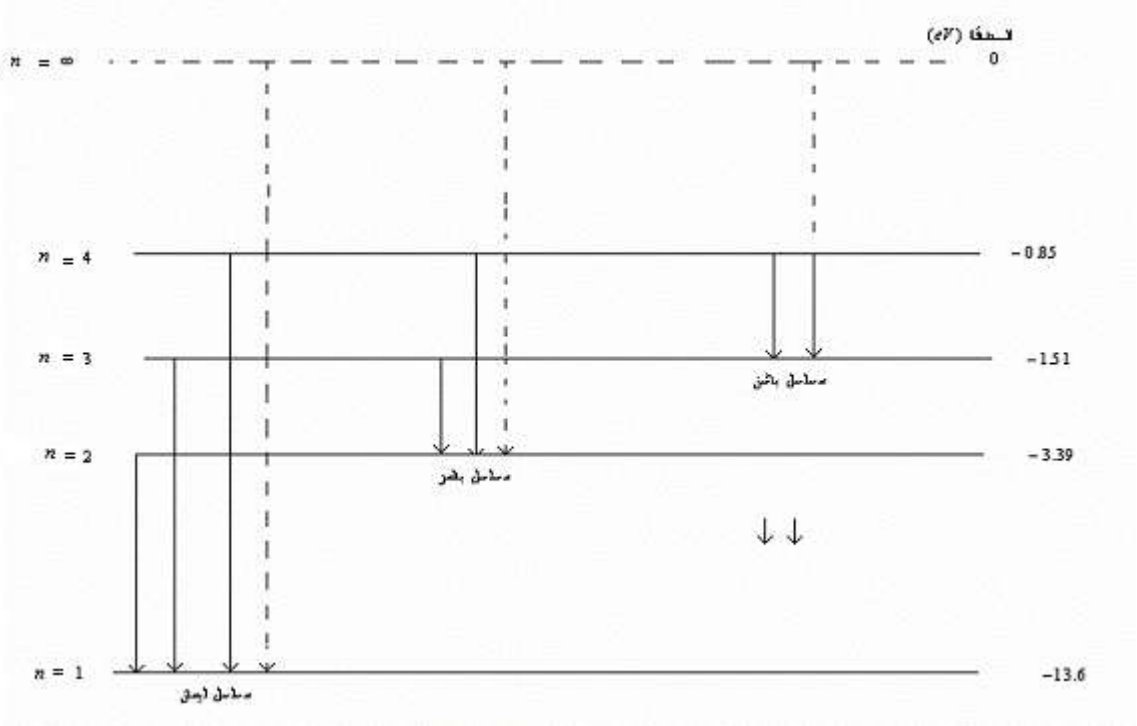
$$R = 1.097 \times 10^7 \quad m^{-1} \qquad (15.4)$$

لقد عرف طيف ذرة الهيدروجين قبل نظرية بوهر. فقد تم التعرف على مزيد من المسلسلات ، كما هو موضح في الجدول التالي.

المسلسل	الحالة النهائية n_f	الحالة الابتدائية n_i
ليمان Lyman (1916)	1	2,3,4,…
بالمر Balmer (1884)	2	3,4,5,…
باشن Paschen (1908)	3	4,5,6,…
براكت Brackett (1922)	4	5,6,,7,…
بفند Pfund (1924)	5	6,7,8,…

الشكل(1.4) يوضح مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين (energy levels) .

الطاقة ($h\nu$) التي تبث عند انتقال الإلكترون من مدار لآخر هي عبارة عن الفرق بين طاقة الحالة الابتدائية وطاقة الحالة النهائية .



الشكل (1.4) مستويات الطاقة لذرة الهيدروجين

مثال (1)

أحسب أقصر طول موجى فى مسلسل ليمان

الحل

الطول الموجى (λ) يعطي بالعلاقة

$$1/\lambda = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

$$R = 1.097\times10^{7}\ m^{-1}$$

$$n_f = 1$$

$$n_i = \infty$$

$$1/\lambda = 1.097 \times 10^{7} \quad m^{-1}$$
$$\lambda = 0.912 \times 10^{-7} \quad m$$

وهذا يقع في مجال الأشعة البنفسجية.

◄◄ **مثال (2)**

عندما هبط الإلكترون في ذرة الهيدروجين من المدار n إلى المدار الثاني أنبعث من الذرة ضوء بطول موجي $4.34\times10^{-7} \quad m$ ، أوجد قيمة n .

الحل:

$$1/\lambda = R\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$
$$\frac{1}{n_i^2} = \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{R\ \lambda}$$
$$n_i = \frac{1}{(1/n_f^2 - 1/R\lambda)^{\frac{1}{2}}}$$
$$n_f = 2$$
$$R = 1.097 \times 10^{7} \quad m^{-1}$$
$$\lambda = 4.34 \times 10^{-7} \quad m$$
$$\therefore n_i = 5$$

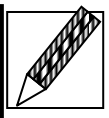
1.2.4 النتائج التي حققتها نظرية بوهر

1. اتفاق قيمة الثابت الذي توصل إليه رايد بيرج مع القيمة التي توصلت إليها نظرية بوهر.
2. الأطياف الخطية لذرة الهيدروجين، التي تنبأت بها نظرية بوهر ، تتطابق مع نتائج التجارب المعملية .
3. تأين ذرة الهيدروجين على حسب النظرية ، يتطابق مع النتائج المعملية .
4. بعض الظواهر ، كإنتاج الأشعة السينية، يمكن تفسيرها بواسطة نظرية بوهر.

أما نواحي القصور في نظرية بوهر فيمكن تلخيصها فيما يلي:

1. لقد نجحت النظرية فقط بالنسبة للهيدروجين وأشباه الهيدروجين كالليثيوم والبرليوم.
2. لقد فشلت النظرية حتى بالنسبة للهيدروجين في تفسير التركيب الدقيق لخطوط الطيف. وقد تم تفسير ذلك بواسطة سمرفيلد (Summerfield) .
3. نظرية بوهر تعطي معلومات عن تردد الضوء المنبعث ، ولكنها لا تحلل الشدة النسبية لخطوط الطيف .
4. النظرية لا تفسر ظهور عدد كبير من خطوط الطيف عند وجود مجال كهربي ومغناطيسي.
5. النظرية تعاملت مع انتقال إلكترونات معزولة نتج عنه أطياف خطية. ولكن في السوائل والجوامد تكون الذرات متقاربة وينتج عن ذلك طيف مستمر . وهذا لا يمكن تفسيره بواسطة نظرية بوهر.

تدريب(1)



1. أحسب أطول طول موجي في مسلسل باشن.
2. أحسب الطول الموجي والتردد للطيف الخطي عندما تهبط ذرة الهيدروجين من حالة الإثارة $n=6$ إلى حالة الإثارة $n=3$.
3. أحسب الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون خارج ذرة الهيدروجين عندما تكون الذرة في الحالة $(n=2)$.
4. أحسب طاقة الربط (binding energy) لإلكترون ذرة الهيدروجين عندما يكون في المدار الثاني $(n=2)$ بوحدة الإلكترون – فولت $(e\,V)$ ووحدة الجول .
5. أحسب تردد فوتون طاقته $100\ M\,e\,V$.

أسئلة تقويم ذاتي

1. ماذا تعرف عن النموذج الأول للذرة "تومسن"؟
2. اكمل العبارة التالية: في عام 1885 قام العالم بالمر.....ووجد أن الطيف الخطي الأول يكون عند الطول الموجي..... والذي يليه يكون عند الطول الموجي ..... . وأن الخط الأخير يكون عند الطول الموجي..... كل تلك الخطوط كانت في الجزء .....من الطيف .
3. ماذا تعرف عن الأطياف الذرية؟
4. اشرح تجربة رذرفورد
5. وضح نموذج بوهر لذرة الهيدروجين ، ثم اذكر النتائج النتائج التي حققتها نظرية بوهر
6. وضح نواحي القصور في نظرية بوهر
7. أثبت أن سرعة الإلكترون في مدار بوهر الأول تساوي $2.19\times10^{6}\ ms^{-1}$

2.2.4 تجربة فرانك وهيرتز

عزيزي الدارس ،،

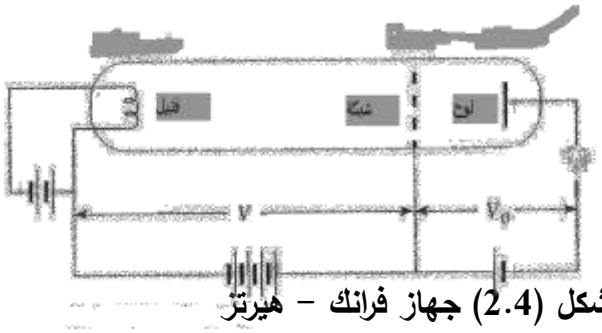
لقد أجري العالمان جيمس فرانك وجوستاف هيرتز عدة تجارب لأثبات وجود مستويات الطاقة. وقد كانت التجربة الأولي في عام 1914. أستخدم العالمان في تلك التجارب الإلكترونات لأثارة الذرات بوساطة التصادمات .

إستخدم فرانك وهيرتز الجهاز الموضّح بالشكل (2.4) . يلاحظ في الجهاز أن هنالك فرق جهد صغير (V_o) بين الشبكة ولوح التجميع . وبالتالي تستطيع فقط الإلكترونات التي لديها طاقة أكبر من (eV_o) من المساهمة في التيار (I). وكلما زادت قيمة الجهد V ، يزيد عدد الإلكترونات التي تصل للوح التجميع ، وبالتالي يزيد التيار ، كما هو موّضح في الشكل (4.4) .

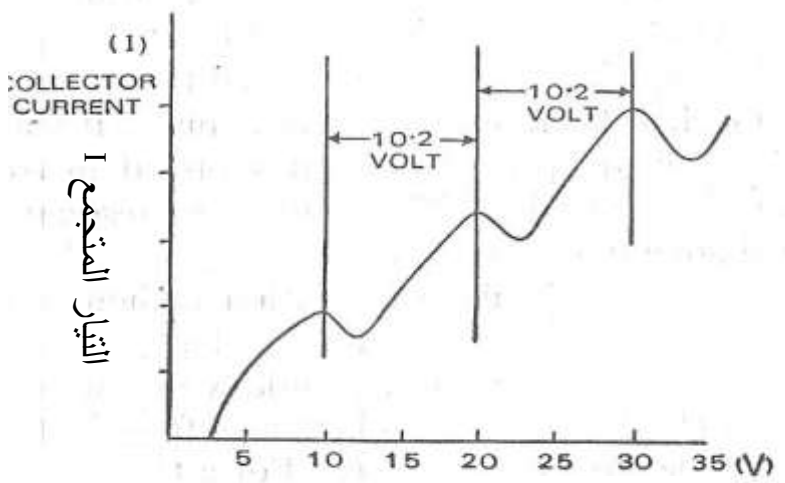
عند تصادم الإلكترون بذرة من ذرات الغاز ، يرتد الإلكترون في أتجاه جديد بالنسبة لمساره . وبما أن كتلة الذرة كبيرة جداً بالنسبة لكتلة الإلكترون ، لذلك فإن الإلكترون لا يفقد الا القليل من طاقة حركته ويسمي هذا بالتصادم المرن (elastic) وعندما تصل طاقة الإلكترون إلى قيمة معينة ، يلاحظ أن التيار ينخفض فجأة . وتفسير ذلك أنه عند التصادم يفقد الإلكترون كل طاقته أو جزءاً كبيراً منها ، وذلك لأثارة الذرة من المستوي الأرضي إلى مستوي أعلى. وهذا التصادم هو تصادم غير مرن وبالتالي فهنك فقد في الطاقة . ولوحظ أن الطاقة المفقودة تساوي الطاقة اللازمة لأثارة الذرة من المستوي الأرضي إلى مستوي الطاقة الذي يليه .

عند رفع الجهد V إلى قيمة أعلى ، يزداد التيار مرة أخرى . وذلك لأن الإلكترونات أصبح لها طاقة كافية ، لتصل للوح . ثم يحدث مرة أخرى أنخفاض حاد في التيار ، وذلك نتيجة لأثارة ذرات أخرى .

وقام فرانك وهيرتز بمقارنة الأطياف من عدة غازات بطاقة الإلكترون . ولاحظ أنه في حالة غاز الهيدروجين يكون في البداية التصادم بين الإلكترون وذرة الهيدروجين تصادماً مرناً. وبالتالي لا تفقد الإلكترونات طاقة حركة . ويستمر ذلك إلى أن يصل الجهد إلى $(10.2\,V)$ ، كما هو موضّح في الشكل (4.4) . وبالتالي تكون طاقة الإلكترون $(10.2eV)$. وهذه هي الطاقة اللازمة لأثارة الذرة من المستوي الأرضي $(-13.6\,eV)$ إلى مستوي الطاقة $(-13.4\,eV)$ ، كما هو موضّح في الشكل (1.4)



الشكل (2.4) جهاز فرانك – هيرتز



الشكل (3.4) نتائج تجربة فرانك – هيرتز للهيدروجين

3.2.4 الأعداد الكمية

عزيزي الدارس ،،

لقد وجد أن العدد الكمي n ، والذى اقترحه بوهر ، غير كاف لنعرف حالة الإلكترون . وأن هنالك حاجة لثلاث أعداد كمية أخرى.

العدد الكمى n يعرف بالعدد الكمى الرئيسي (principal quantum number) ، وله القيم التالية

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

ونلاحظ في ذرة الهيدروجين أن هنالك قيم محددة مسموح بها ، لطاقة الإلكترون .ويحدد هذه القيم العدد n ، كما هو واضح من المعادلة (9.4)

$$E_n = -\frac{2\pi^2 m\, k^2\, e^4}{h^2}\left(\frac{1}{n^2}\right)$$

العدد الكمى الثاني (ℓ) فهو العدد الكمى المدارى (orbital quantum number) وله القيم التالية

$$\ell = 0,1,\ldots, n-1$$

العدد الكمى (ℓ) يحدد الاندفاع الزاوى بالنسبة لإلكترون في مدار معين.

أما العدد الكمى (m_ℓ) فيسمى بالعدد الكمى المغناطيسي .

(magnetic quantum number) . وله القيم التالية

$$m_\ell = -\ell,\ldots,0,\ldots\ell$$

العدد الكمى (m_ℓ) يوضح الزيادة في خطوط الطيف التي تنتج عند وجود مجال مغناطيسي خارجي. فإذا كان هنالك مجال مغناطيسى (B) ، فالطاقة المضافة من المجال المغناطيسي بالنسبة لذرة عددها الكمى (m_ℓ) تعطي بالعلاقة

$$E = m_\ell \ \mu_B \ B$$

ويسمى (μ_B) ماجنتون بوهر (Bohr magneton)

$$\mu_B = 9.27\times10^{-24} \quad J/(weber/m^2)$$

ونتيجة لذلك تظهر حالات فرعية طاقتها أكبر قليلاً أو أقل قليلاً من الطاقة قبل وجود المجال المغناطيسي .

عزيزي الدارس،،

نجد ان العدد الكمى الأخير هو (m_s) ويسمي العدد الكمى المغزلى (spin magnetic quantum number). وهذا العدد هو ناتج من دوران الإلكترون حول نفسه. وله القيم التالية:

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

عندما تكون الذرة في غير حالة إثارة ، فإن الإلكترونات تحتل حالات الطاقة الدنيا ، مع الأخذ في الاعتبار قانون باولى والذي لا يسمح لإلكترونين بأن يكون لهما نفس الإعداد الكمية . كل الإلكترونات التي لها نفس العدد الكمي n تبعد تقريباً نفس المسافة من النواة ولها نفس الطاقة . وبالتالي تعتبر بأنها في نفس القشـرة الذرية (atomic shell) . الإلكترونات التي تكون بنفس القشرة ولها نفس العدد الكمي (ℓ) تعتبر بأنها تتشارك في نفس القشرة الفرعية (subshell). جدير بالذكر أن

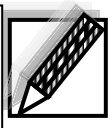
1. سعة القشرة الفرعية هي $2(2\ell+1)$ إلكترون. وذلك لأن لكل قيمة (ℓ) هنالك $(2\ell+1)$ قيمة للعدد (m_ℓ)، وقيمتان مختلفتان للعدد (m_s) .
2. سعة القشرة القصوى هي $2n^2$ إلكترون

عندما تكون (n=1) فتوجد قشرة فرعية واحدة ($\ell = 0$) . وفي هذه القشرة يكون هنالك أماكن فقط لإلكترونين لهما نفس الإعداد الكمية ماعدا العدد الكمـي المغزلي فيكون لأحداهما (m_s= ½) وللآخر (m_s= - ½) . بالنسبة لإلكترون الهيدروجين، فيمكن أن يحتل أي واحد من هذين المكانين. أما إلكتروني الهيليوم فأنهما يحتلان كلا المكانين ، وتصبح القشرة ممتلئة تماماً ، أو مغلقة .

بالنسبة للعدد الكمي (n=2) فهنالك قشرتين فرعيتين هما:

($\ell = 0$), ($\ell = 1$) . سعة الأولي إلكترونان وسعة الثانية ستة إلكترونات. لذلك يكون توزيع الثلاثة إلكترونات الخاصة بالليثيوم هو: أثنان بالقشرة الأولي والثالث بالقشرة الثانية ، في القشرة الفرعية ($\ell = 0$) . وتكون هذه القشرة مغلقة عندما يكون عدد إلكترونات الذرة عشرة. وهذا هو الحال بالنسبة للنيون. إذ يكون اثنان من الإلكترونات بالقشرة الأولي وثمانية بالقشرة الثانية.

أسئلة تقويم ذاتي



1. كيف تم أثبات وجود مستويات الطاقة في الذرة ؟ وضح ما امكن الرسم.
2. ماذا نعني بالأعداد الكمية ؟ ناقش

3.4 الأشعة السينية X-rays

1.3.4 أساسيات الأشعة السينية

عزيزي الدارس ،

أول من اكتشف هذه الأشعة هو العالم رونتجن في عام 1895. ويوجد نوعان من الأشعة السينية. هما

1. الأشعة السينية المميزة (characteristic X-rays)
2. الأشعة السينية المستمرة (continuous X-rays). وتسمى هذه الأخيرة أيضاً بأشعة الفرملة. وهي ترجمة للكلمة الألمانية (Bremsstrahlung) .

سمى الطيف المميز بذلك الاسم لأنه يحمل صفات الذرات التي أنبعث منها، وهو ينتج عند هبوط إلكترونات الذرة من قشرة إلى أخرى ويظهر في الرسم البياني في شكل قمم حادة . أما الطيف المستمر فينتج عند تخفيض سرعة الإلكترون بالقرب من النواة ولذلك يسمى بأشعة الفرملة. ويمتاز بحد أدنى للطول الموجى .

عزيزي الدارس ،،

تقع الأشعة السينية في الطيف الكهرومغناطيسي ما بين الأشعة فوق البنفسجية وأشعة جاما، بطول موجى $10^{-7}\ m - 4\times10^{-10}\ m$ وتمتاز الأشعة السينية بقدرة اختراق عالية ، فيمكنها أن تخترق شرائح من الألمنيوم أو ألواح من الخشب. عمق الاختراق يتناسب عكسياً مع كثافة المادة. لذلك فإن شرائح رقيقة من الرصاص تستطيع أن توقف الأشعة السينية. وللأشعة السينية استخدامات كثيرة في المجالات الطبية. كما أنها تستخدم أيضاً في دراسة تركيب البلورات.

2.3.4 إنتاج الأشعة السينية X-rays Production

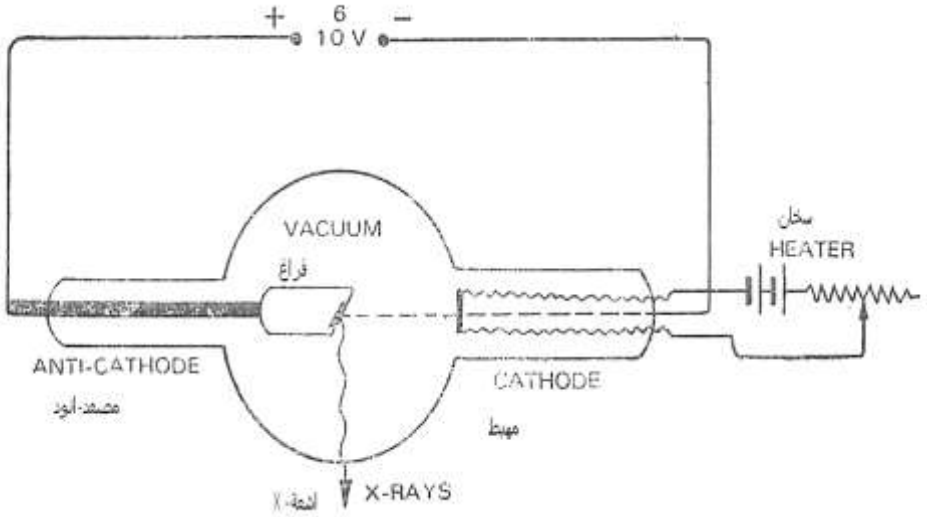
عزيزي الدارس ، يمثل الشكل (4.4) جهاز إنتاج الأشعة السينية . يتم تسخين المهبط بواسطة تيار من دائرة كهربية مساعدة ، وذلك لإنتاج الإلكترونات الحرارية . ويتم التحكم في شدة الإلكترونات المنبعثة بواسطة التحكم في المقاومة الخاصة بدائرة التسخين .

يستخدم في هذا الالنوع من الأجهزة فرق جهد عالي ، حوالي $10^6\ V$ ، بين المهبط والهدف المعدني. ويقوم هذا الجهد بتعجيل الإلكترونات نحو الهدف. يكون الهدف من معدن له عدد ذري عالى ودرجة ذوبان عالية ، مثل التنجستن (Tungsten) أو الموليبديوم (Molybdenum) . ويطوق الهدف باحكام بكتلة نحاس . وذلك لأن النحاس له توصيلية حرارية عالية، تساعد في التخلص من الحرارة. وتكون في العادة واجهه الهدف بزاوية معينة بالنسبة لمسار الإلكترونات ، لتخرج الأشعة السينية من خلال أحد جوانب الأنبوب . ويكون الأنبوب مفرغاً، حتي تندفع الإلكترونات نحو الهدف بدون تصادمات.

جدير بالذكر أن النظرية الكلاسيكية قد تنبأت بأن الإلكترونات المعجلة تنتج طيفاً مستمراً. غير أن هنالك ظاهرتان لم تستطع النظرية الكلاسيكية تفسيرهما. والظاهرتان هما

1. لوحظ من القياسات أن هنالك قمم في طيف الأشعة السينية (خطوط الطيف المميز) . وهذه القمم تكون في أطوال موجية معينة بالنسبة لكل هدف معدني .
2. تختلف الأطوال الموجية على حسب فرق الجهد V ، ولكن هنالك حد أدني بالنسبة للطول الموجي $(\lambda_{\min})$ بالنسبة لكل فرق جهد .

الملاحظة الاخيرة يمكن إعتبارها عملية عكسية للنظرية الكهروضوئية . فبدلاً من أن تتحول طاقة الفوتون إلى طاقة حركة الإلكترون ، تتحول طاقة حركة الإلكترون إلى طاقة فوتون. الطول الموجي القصير يعني تردد عالى. وهذا يعني طاقة فوتون عالية $(h\nu)$. وهذه الحالة تحدث عندما تتحول كل طاقة الإلكترون إلى طاقة فوتون واحد.



الشكل (4.4) أنبوبة أشعة سينية (X-rays tuber)

3.3.4 الطيف المستمر Bremsstrahlung

يحدث هذا النوع من الأشعة عند تصادم إلكترونات ذات طاقة عالية بالهدف .

فإذا كان الجهد في أنبوبة الأشعة السينية هو V ، فإن طاقة حركة الإلكترون تكون

$$T = e\,V \qquad (16.4)$$

وعندما يفقد الإلكترون كل طاقته لإنتاج فوتون ، تكون طاقة الفوتون

$$h\ \nu_{\max} = eV \qquad (17.4)$$

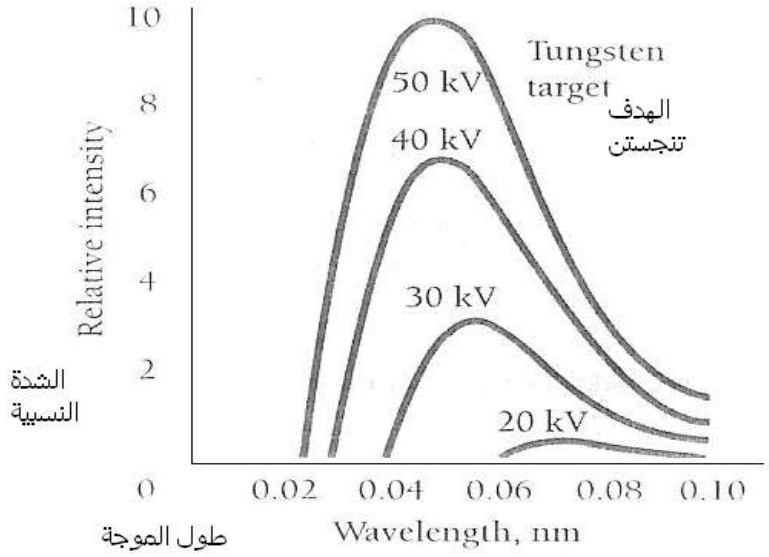
وبالتالي يكون أقصر طول موجي هو :

$$\lambda_{\min} = c/\nu_m$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} \qquad (18.4)$$

$$\lambda_{\min} = \frac{1.24\times10^{-6}}{V} \qquad (19.4)$$

يوضّح الشكل (5.4) العلاقة بين شدة الإشعاع والطول الموجي ، عند قيم جهد مختلفة . يلاحظ أن هنالك حد أدني للطول الموجي ($\lambda_{\min}$) . كما يلاحظ أيضاً أن قيمة تقل كما زادات قيمة الجهد المستخدم

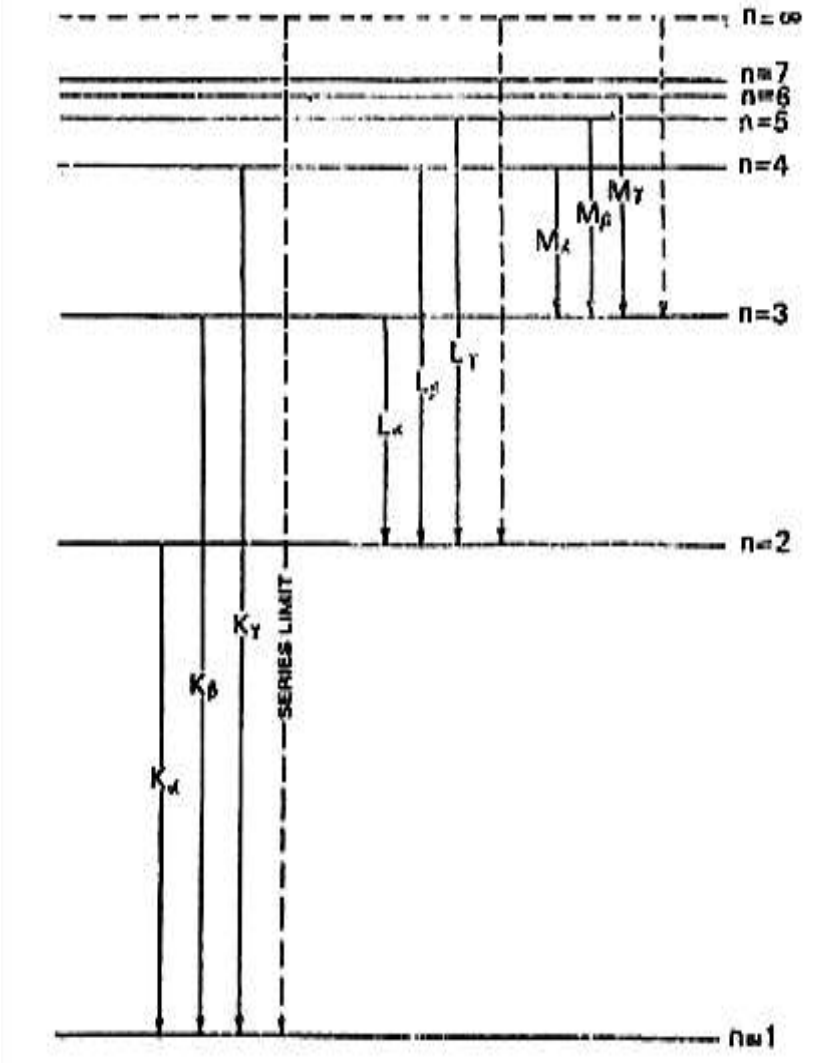


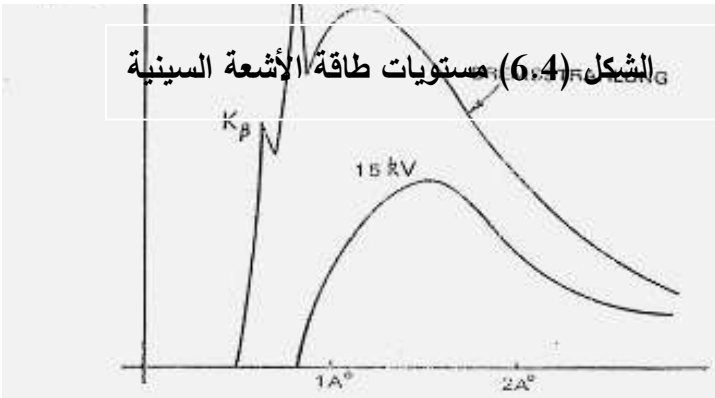
الشكل (5.4) الطيف المستمر عند قيم جهد مختلفة

4.3.4 خطوط الطيف المميز

من العادة أنه عند دراسة الأشعة السينية ، يتم استخدام الحروف $K, L, M, \ldots$ للقشرة المرتبطة بالعدد الكمي ($n = 1,2,3,\ldots$) . فعندما يحرر الإلكترون المسرع إلكتروناً من القشرة K ، يقوم إلكترون من القشرة ($L, M, N, \ldots$) بالهبوط إلى المكان الفارغ. انتقال إلكترون من القشرة L إلى K ينتج عنه الطيف الخطي K_α . وكذلك الإلكترونات من M, N فأنها تنتج الأطاف الخطية K_γ و K_β ، كما هو موضّح في الشكل (6.4) . كذلك عندما يهبط إلكترون من القشرة ($M, N, O, \ldots$) إلى فجوة في القشرة L ، فينتج الطيف الخطي ($L_\alpha, L_\beta, L_\gamma, \ldots$) .

الشكل (7.4) يوضّح طيف الأشعة السينية . ونلاحظ أن الطيف المستمر يظهر في شكل منحني ، بينما يظهر الطيف الخطي (K_α, K_β) في شكل قمم حادة. وهذه الأخيرة تمثل خطوط الطيف المميز.





الشكل (6.4) مستويات طاقة الأشعة السينية

الشكل (4.7) الطيف الخطي والطيف المستمر

◄◄ مثال (3)

أحسب أقصر طول موجى للأشعة السينية عندما يصدم إلكترون طاقته 500 $k\ eV$ الهدف في أنبوبة الأشعة السينية.

الحل:

$$\lambda_m = \frac{1.24\times10^{-6}}{volt} \qquad m-m$$

$$V = 5\times10^{5} \quad volt$$

$$\lambda_m = \frac{1.24\times10^{-6}}{5\times10^{5}}$$

$$\lambda_m = 2.48\times10^{-12} \quad m$$

تدريب(1)

1. ما هو أقصى تردد للأشعة السينية عند إصطدام إلكترون طاقته 100 $k\ eV$ بالهدف.
2. إذا كان أقصر طول موجي للأشعة السينية هو 0.1 A^o فكم يبلغ الجهد المستخدم في أنبوبة الأشعة السينية.

أسئلة تقويم ذاتي

عزيزي الدارس، ناقش مع الاستعانة بالرسم خطوط الطيف المميز

الخلاصة

عزيزي الدارس,

في النهاية، نؤكد على ما أكدناه في البداية عن ضرورة تقويم هذه الوحدة، ولكن ما الذي ناقشناه ؟

ناقشنا مفهوم الفيزياء الذرية ثم معني الأطياف الذرية ، وتناولنا نموذج بوهر للذرة و النتائج التي حققتها نظرية بوهر و تعرفنا على تجربة فرانك وهيرتز ، و ماذا نعني بالأعداد الكمية، ايضا قمنا بدارسة الأشعة السينية ومعرفة أساسيات هذه الأشعة وطريقة انتاج الأشعة السينية .

وفي النهاية نأمل أن تكون هذه الوحدة قد أضافت الكثير إلى معلوماتك الثرة وان تسعد بالوحدة القادمة إنشاء الله.

لمحة مسبقة عن الوحدة الدراسية التالية

عزيزي الدارس،

بعد أن فرغت من دراسة هذه الوحدة الآن، أصبح لديك حصيلة كبيرة من المعلومات المفيدة

الان ننتقل الي الوحدة الخامسة وهي بعنوان القيزياء النووية وهي مخصصة لدراسة أساسيات نواة الذرة و تشمل التركيب النووي ، طاقة ربط النواة والأنماط المختلفة لانحلال النواة

نرجو إن تكون وحدة مفيدة لك وان تساهم معنا في نقدها وتقييمها.

إجابات التدريبات

التدريب(1)

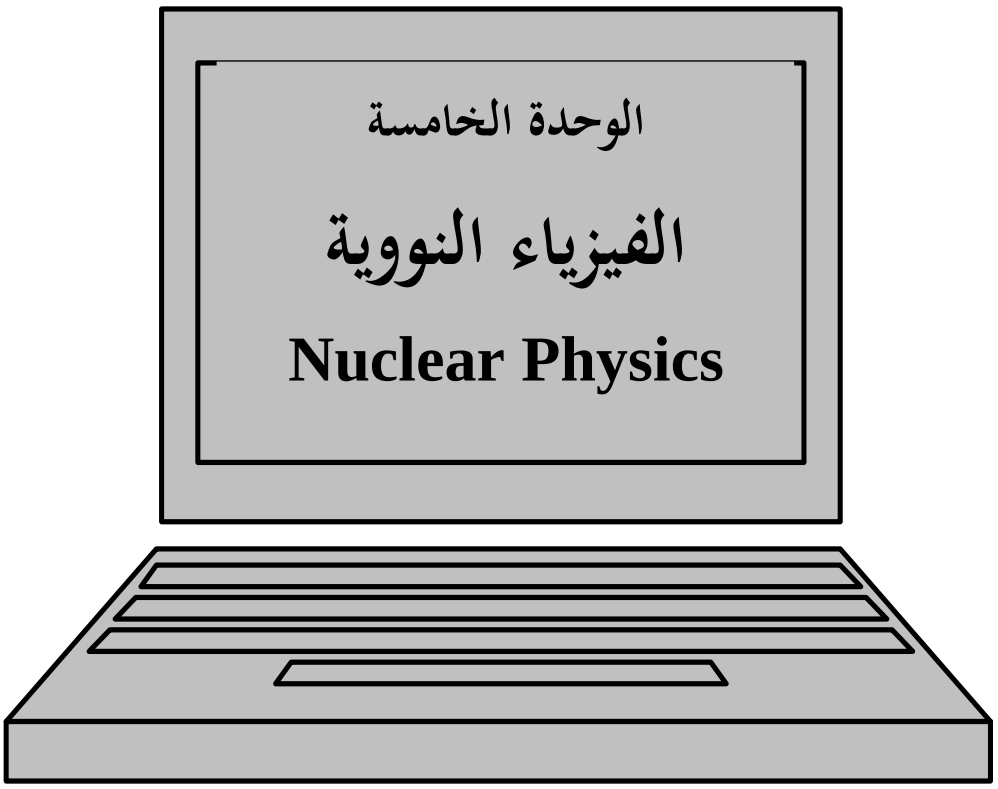
1. $\left(\lambda = 8.2\times10^{-7}\,m\right)$
2. $\left(\lambda = 1.09\times10^{-6}\,m \quad , \; v = 2.75\times10^{14}\,Hz\right)$
3. $\left(E = 3.4\;\; eV\right)$
4. $\left(E = -3.4\;\; eV\right)$
5. $\left(v = 2.43\times10^{22}\;\; Hz\right)$

التدريب(2)

1. $\left(v = 2.42\times10^{19}\;\; Hz\right)$
2. $\left(V = 1.24\times10^{5}\,V\right)$

مسرد المصطلحات

Atomic physics	**الفيزياء الذرية**
Atomic Spectra	**الاطياف الذرية**
centrifugal force	قوة الجذب المركزي
electrostatic force	القوة الكهربية الساكنة
angular momentum	الاندفاع الزاوي
ground state	الحالة الأرضية
ionization energy	طاقة التأين
binding energy	طاقة الربط
principal quantum number	العدد الكمى الرئيسي
orbital quantum number	العدد الكمى المدارى
magnetic quantum number	العدد الكمى المغناطيسي (m_ℓ)
Bohr magneton	ماجنتون بوهر (μ_B)
spin magnetic quantum number	العدد الكمى المغزلى
atomic shell	القشــرة الذرية
subshell	القشرة الفرعية
X-rays	الأشعة السينية
characteristic X-rays	الأشعة السينية المميزة
Bremsstrahlung او continuous X-rays	الأشعة السينية المستمرة
Tungsten	التنجستن
Molybdenum	الموليبديوم


الوحدة الخامسة
الفيزياء النووية
Nuclear Physics

محتويات الوحدة الخامسة

الموضوع	الصفحة
مقدمة	141
تمهيد	141
أهداف الوحدة	142
5.الفيزياء النووية	143
1.5. تركيب النواة	143
2.5. طاقة الربط	149
3.5. النشاط الإشعاعي الطبيعي	150
4.5. انحلال الفا	154
5.5. انحلال بيتا	156
1.5.5 انبعاث الإلكترون	156
2.5.5. انبعاث البزترون	158
6.5. انحلال جاما	159
الخلاصة	161
إجابات التدريبات	162
مسرد المصطلحات	163
ملحق– الثوابت الفيزيائية	164
المراجع	165

مقدمة

تمهيد

عزيزي الدارس,

مرحباً بك إلى الوحدة الخامسة من مقرر مقدمة في الفيزياء الحديثة وهي بعنوان الفيزياء النووية فهي مخصصة لدراسة أساسيات نواة الذرة و يشمل التركيب النووي، طاقة ربط النواة والأنماط المختلفة لانحلال النواة

في الاقسام الأول و الثاني والثالث مقدمة عن الوحدة و تركيب النواة ثم معرفة ماذا نعني بطاقة الربط وننتقل الي القسم الرابع ونتعرف على النشاط الإشعاعي الطبيعي حيث أن النشاط الإشعاعي هو الانحلال التلقائي للنواة ، وينتج من ذلك النشاط جسيم الفا أو جسيم بيتا وفي بعض الأحيان يصاحب ذلك أشعة جاما، أما في باقي الاقسام فسوف نتعرف طرق تحلل كل من الفا – بيتا – جاما

وقد ذيلنا هذه الوحدة بسرد شامل للمصطلحات العلمية التي وردت في النص الرئيسي، كما تحتوي هذه الوحدة على أسئلة تقويم ذاتي، وتدريبات كفيلة بتلبية احتياجاتك التعليمية والتي تقدمها لمرشدك الميداني.

عزيزي الدارس،،

أهلاً بك مرة أخري إلي هذه الوحدة ونرجو أن تستمتع بدراستها وأن تستفيد منها وأن تشاركنا في نقدها وتقييمها.

أهداف الوحدة

عزيزي الدارس،،

بعد فراغك من دراسة هذه الوحدة يتوقع منك أن تكون قادراً علي أن:

1. تفهم أهمية دراسة الفيزياء النووية
2. تتعرف على طاقة الربط
3. توضح ما هو النشاط الإشعاعي الطبيعي
4. توضح كيفية انحلال الفا
5. تشرح طريقة انحلال بيتا
6. توضح الفرق بين الانبعاث الإلكتروني و الانبعاث البزتروني
7. تشرح تتقن طريقة انحلال جاما
8. تحل مسائل وتمارين عن ايجاد طاقة الربط وايجاد نسب التحلل

5.الفيزياء النووية

عزيزي الدارس ،

لقد كانت تجارب رذرفورد ، الخاصة بتشتيت جسيمات ألفا بواسطة الذرات ، بداية مهمة لفهم النواة . حيث أثبتت النتائج أن كتلة النواة تساوى تقريباً كتلة الذرة . وأن كل الشحنة الموجبة مركزة في النواة . وعند اكتشاف النيوترون عام 1932 بواسطة شادوك (Chadwick) ، تم التوصل إلى أن النواة تحتوى على النيوترونات بالإضافة للبروتونات . كما قادت أعمال رذرفورد وآخرين لإيجاد نصف قطر النواة بالعلاقة :

$$r = 1.2 \times 10^{-15} \; A^{\frac{1}{3}} \; m$$

حيث A هي مجموع البروتونات والنيوترونات بالنواة .

تقوم قوى النواة باحتجاز البروتونات والنيوترونات داخل النواة. ومعظم الذرات لها أنوية مستقرة. ولكن هنالك ذرات مشعة لها أنوية غير مستقرة .فهذه الأنوية عندما تتحلل تلقائياً تنبعث منها جسيمات الفا أو بيتا ، مصحوبة أحياناً بفوتونات جاما. وغالباً ما ينتج من الانحلال نواة أكثر استقراراً .

عزيزي الدارس ،

نجد في الوحدة السابقة أن التركيز كان على إلكترونات الذرة أما هذه الوحدة فهي مخصصة لدراسة أساسيات نواة الذرة . و يشمل التركيب النووي وطاقة ربط النواة والأنماط المختلفة لانحلال النواة .

1.5. تركيب النواة Nuclear Structure

عزيزي الدارس ،

تتكون النواة من بروتونات ونيوترونات وتسمى هذه الجسيمات بالنويات (nucleons). النيوترون لا شحنة له وكتلته أكبر قليلا من كتلة البروتون.

عدد البروتونات في النواة يعرف بالعدد الذري (atomic number). وهذا العدد يساوي عدد الإلكترونات في الذرة. وبالتالي فإن العدد الذري في الهيدروجين يساوي 1، وفي الهيليوم يساوي 2، وفي اليورانيوم يساوي 92. وقد لا تحتوي كل الانوية في العنصر الواحد على نفس العدد من النيوترونات. فنواة الهيدروجين العادي لا تحتوي على نيوترون، بينما يحتوي الديوتيريوم (deuterium) على نيوترون واحد، ويحتوي الترتيوم (tritium) على نيوترونين، وذلك بالاضافة للبروتون.

نواة الديوتيريوم هي نواة مستقرة ، أما نواة الترتيوم فهي مشعة. وكمية الترتيوم في الكرة الأرضية كمية قليلة جداً. إذ تقدر بحوالي كيلوغرامين. ونجد الديوتيريوم في المياه الثقيلة (heavy water). إذ أن المياه الثقيلة تحتوي على ذرات الديوتيريوم بدلاً من الهيدروجين كما هو الحال في المياه العادية.

عدد البروتونات في النواة يسمى العدد الذري (atomic number) ويرمز له بالرمز *(Z)*. والمجموع الكلي للبروتونات والنيوترونات يسمى العدد الكتلي (mass number). ويرمز له بالرمز (*A*)

$$A = Z + N \qquad (1.5)$$

عدد النيوترونات = N

ويرمز للنواة بالآتي

$${}_{Z}X^{A}$$

عزيزي الدارس فمثلا:

(أ)الكالسيوم ${}_{20}Ca^{40}$

وهنا تكون عدد البروتونات ($Z = 20$) وعدد النيوترونات ($N = 20$).

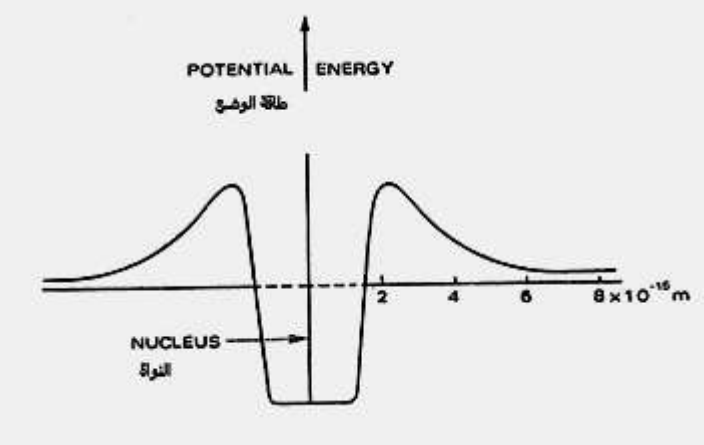
(ب)الرصاص ${}_{82}Pb^{208}$

وهنا نجد: عدد البروتونات $Z = 82$

وعدد النيوترونات $N = 126$

تشكل الجسيمات النووية ، تقريباً ، شكلاً كروياً . وتربطها قوة الترابط النووي. ويمتد مدى هذه القوة إلى مسافة حوالي $10^{-15}\ m$. وهذه القوة كبيرة جداً مقارنة بقوة التنافر بين البروتونات الموجبة .

الشكل (1.5) يوضّح الحاجز الجهدى حول النواة . فعندما يقترب بروتون من النواة فإنه يتعرض لقوة كولوم الطاردة بسبب شحنته الموجبة . ولكن إذا وصل البروتون إلى مسافة حوالي $10^{-15}\ m$ ، فإنه يتعرض لقوة جذب كبيرة في اتجاه النواة. أما في حالة اقتراب نيوترون من النواة ، فإنه لا يتعرض لقوة الطرد ، وذلك لأنه ليست لديه شحنة . وعندما يصل إلى منطقة قوة الجذب النووي ، فإنه سيكتسب طاقة حركة كبيرة قبل أن يصدم واحداً من النويات. وهذه الخاصية كانت مفيدة جداً بالنسبة للإنشطار النووي .



الشكل (1.5) حاجز الجهد حول النواة

لقد لوحظ من التجارب المعملية بأن هنالك خصائص معينة للنواة :

اولا: أن النويات تكون في معظم الأحيان في أعداد زوجية. وأن معظم الأنوية بها أعداد زوجية من البروتونات، وأعداد زوجية من النيوترونات.

ثانيا: الأنوية التي يكون فيها عدد البروتونات أو النيوترونات يساوى (126,82,50,20,8,2) تكون مستقرة وقد عرفت هذه الأعداد باسم الأعداد السحرية (magic numbers) . ومثال ذلك:

نواة الهيليوم $(Z = N = 2)$

نواة الاكسجين $(Z = N = 8)$

عزيزي الدارس ،،

لتفسير هذه الخصائص فقد تقدم ماير ، جنسن ، ووجنر (Mayer , Jensen and Wigner) بنظرية القشرة النووية (nuclear shell model) . في هذا النموذج ، تدور النويات داخل النواة في مدارات مسموح بها ، تشابه مدارات الإلكترونات خارج النواة. كذلك فقد افترض أن كل قشرة نووية لها سعة قصوى للنويات. فإذا كان هنالك عدد N نيترون في النواة فإن النيوترونات تحتل الاماكن الشاغرة ابتداء من أدني مستوى للطاقة. والأماكن الشاغرة يحددها قانون باولى .

قانون باولى

لا يسمح لنيترونين بأن يكون لهما نفس الأعداد الكمية

ونفس الشروط السابق تنطبق على البروتونات. وعندما يكون عدد النيوترونات أو البروتونات مساوياً لعدد سحرى ، تكون القشرة مغلقة (ممتلئة)، وبالتالي تكون طاقة الربط عالية .

استخدمت الأعداد الكمية (n, ℓ, j) . العدد الكلى للنويات يساوى $(2j+1)$.

$$j = \ell \pm \frac{1}{2}$$

$$\ell = 0, \ldots, n-1$$

فإذا أخذنا الحالة $(n = 1)$

$$\ell = 0$$
$$j = \frac{1}{2}$$

وبالتالي يكون العدد الكلى للنويات

$$(2j+1) = 2$$

وفي الحالة $(n=2)$ فان

$$\ell = 1$$
$$j = \frac{3}{2} \ , \ \frac{1}{2}$$

العدد الكلى للنويات في المستوي الأول = 2

العدد الكلى للنويات في المستوي الثاني = 4

العدد الكلى للنويات في النواة = $2+4+2$

= 8

وبهذه الطريقة يمكن إيجاد عدد النويات في مستويات الطاقة المختلفة وفي النواة ككل.

◄◄ مثال (1)

أحسب طاقة الربط لجسيم الفا ، مستخدماً القيم التالية:

كتلة البروتون = 1.007276 *a.m.u.*

كتلة النيترون = 1.008665 *a.m.u.*

كتلة جسيم إلفا = 4.002604 *a.m.u.*

الحل

جسيم الفا يحتوي على بروتونين و نويوترونين.

طاقة الربط تعطي بالعلاقة :

$$\Delta m c^2 = (2m_p + 2m_n - m_\alpha)c^2$$
$$\Delta m = (2.014552 + 2.01733 - 4.002604)\ a.m.u$$
$$\Delta m = 0.02928\ a.m.u$$
$$\Delta m c^2 = 0.02928 \times 931 MeV$$
$$= 27.3\ MeV$$

تدريب(1)

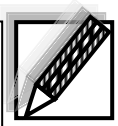
أثبت أن طاقة الربط للنواة $_3Li^7$ تساوي $6.2\times10^{-12}\ J$ ، مستخدماً القيم التالية :

كتلة نواة الليثيوم = $11.6475\times10^{-27}\ kg$

كتلة البروتون = $1.6724\times10^{-27}\ kg$

كتلة النيوترون = $1.6748\times10^{-27}\ kg$

أسئلة تقويم ذاتي



1. عرف كل من العدد الذري – العدد الكتلي
2. ما الفرق بين نواة الديوتيريوم و نواة الترتيوم ؟
3. ماذا نعني بالأعداد السحرية؟
4. ناقش نظرية القشرة النووية
5. اكتب نص قانون باولى
6. أحسب طاقة الترابط لجسيم الديوترون ، مستخدماً القيم التالية:

كتلة الديوترون = 2.01355 *a.m.u.*

كتلة البروترون= 1.007276 *a.m.u.*

كتلة النيوترون= 1.008665 *a.m.u.*

(الديوترون يتكون من بروتون ونيوترون)

2.5 طاقة الربط Binding Energy

عزيزي الدارس ،،

عندما تتجمع البروتونات والنيوترونات لتكون نواة فإن الكتلة (Δm) تختفي وتساوي الفرق بين كتلة النويات وكتلة النواة.

تعرف طاقة الربط بأنها الطاقة اللازمة لتحرير نوية من النواة .

وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\Delta\, mc^2 = \left[(Z\ m_p + \ N\ m_n) - M\right]c^2 \qquad (2.5)$$

حيث سرعة الضوء = c

عدد البروتونات = Z

عدد النيوترونات= N

كتلة البروتون = m_p

كتلة النيوترون = m_n

كتلة النواة = M

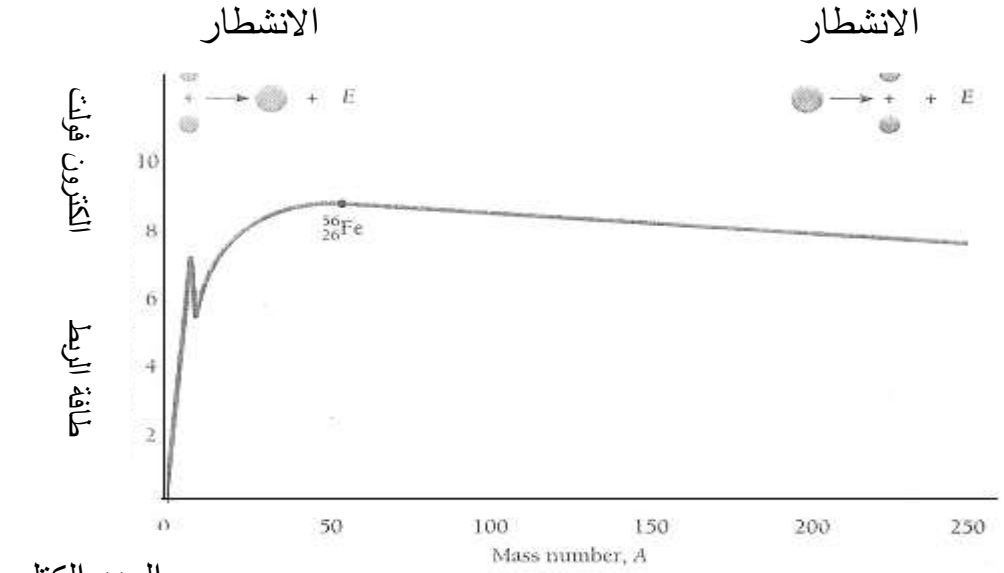
المعادلة(2.5) توضح بأنه عندما نجمع البروتونات والنيوترونات لتكوين نواة ، فإن الكتلة (Δm) تختفي لتصبح طاقة الربط (Δmc^2). ومن العادة فإن الوحدة التي تستخدم للكتلة هي وحدة الكتلة الذرية $(a.m.u.)$.

$$1\ a.\ m\ .\ u. = 1.6605\times10^{-27}\ \ kg$$
$$\equiv\ 931\ \ MeV$$

عزيزي الدارس،

الشكل (2.5) يوضح العلاقة بين طاقة الربط والعدد الكتلى (A). ويلاحظ أن المنحنى له قمة عند $(A = 60)$. وهذا المنحني له أهمية كبيرة بالنسبة للتفاعلات

الاندماجية والتفاعلات الانشطارية . وستتضح هذه الاهمية لاحقاً عند دراسة هذه التفاعلات في مقررالفيزياء النووية.



الشكل (2.5) العلاقة بين طاقة الربط والعدد الكتلي

3.5 النشاط الإشعاعي Natural Radioactivity

النشاط الإشعاعي هو الانحلال التلقائي للنواة

وينتج من ذلك النشاط جسيم الفا أو جسيم بيتا وفي بعض الأحيان يصاحب ذلك أشعة جاما.

الطاقة الممتصة أثناء التفاعل النووي أو الناتجة من التفاعل النووي $(Q-value)$ تعرف بالعلاقة التالية

$$Q = \sum m_i c^2 - \sum m_i' c^2 \qquad (3.5)$$

$\sum m_i$ = حيث مجموع كتل السكون قبل التفاعل

$\sum m_i'$ = مجموع كتل السكون بعد التفاعل

من المعادلة(2.5)والمعادلة (3.5) نجد أن طاقة الربط

$$\Delta mc^2 = -Q \qquad (4.5)$$

عندما تكون طاقة الربط موجبة تكون Q سالبة ، وتكون النواة مستقرة. أما عندما تكون طاقة الربط سالبة ، تكون Q موجبة وتكون النواة غير مستقرة. وفي هذه الحالة تتحلل النواة تلقائياً وتنتج طاقة مقدرها Q.

النشاط الإشعاعي هو عبارة عن عدد الذرات التي تتحلل في وحدة الزمن. ويعطى بالعلاقة التالية:

$$R = -\frac{dN}{dt}$$

وتكتب العلامة السالبة لكي تجعل R موجبة. وذلك لأن $\frac{dN}{dt}$ سالبة.

إذا افترضنا أن احتمال التحلل في وحدة الزمن بالنسبة لكل نواة هو λ، فبالتالي يكون احتمال أن تتحلل إي نواة في فترة زمنية مقدارها dt هو (λ dt). فإذا كان عدد الأنوية يساوي N و العدد الذي يتحلل في فترة زمنية (dt) هو (dN) و يمكننا كتابة العلاقة التالية

$$dN = -N\lambda dt \qquad (5.5)$$

وعن طريق التكامل نتحصل علي

$$\int_{N_0}^{N} \frac{dN}{N} = -\lambda \int_{0}^{t} dt$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad (6.5)$$

ونلاحظ من العلاقةالسابقة عزيزي الدارس أن عدد الأنوية التي لم تتحلل في زمن t هو N، وأن عدد الأنوية التي لم تتحلل في الزمن (t = 0) هو N_0.

الزمن الذي ينخفض فيه عدد الأنوية إلى النصف
يسمى عمر النصف (**half – life period**) .

وإذا عوضنا في المعادلة (6.5)

$$N = \frac{N_0}{2}$$

$$t = T_{½}$$

حيث $T_{½}$ هي عمر النصف وبذلك نحصل على

$$N_o / N = \exp\ (\lambda t)$$

$$2 = \exp\ (\lambda \quad T_{\frac{1}{2}})$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ell n\ 2}{\lambda}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.6931}{\lambda} \qquad (7.5)$$

هذا يعني أنه إذا كان العدد في البدائية هو N_o ، فإنه ينخفض بعد عمر النصف إلى $(\frac{N_o}{2})$ ، وينخفض بعد ضعف عمر النصف إلى $(\frac{N_o}{4})$ ويصل إلى $(\frac{N_o}{8})$ بعد ثلاثة أضعاف عمر النصف .

عزيزي الدارس ،

المعادلة (6.5) توضح أن تحلل كمية من الأنوية غير المستقرة يأخذ زمن طويلاً جداً (ما لا نهاية)، لذلك يستخدم عادة متوسط العمر بدلاً من العمرالكلي. ويرمز لمتوسط العمر بالرمز (τ).

يعرف متوسط العمر (τ) بالآتي

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \qquad (85)$$

$$T_{\frac{1}{2}} = 0.6931\ \tau \qquad (9.5)$$

مثال (2)

كمية من الراديوم فقدت (1 %) من كتلتها في (23.25) سنة . أحسب عمر النصف .

الحل :

إذا افترضنا أن عدد الأنوية كان N_o وأصبح N

$$\frac{N_o - N}{N_o} = \frac{1}{100}$$

$$\frac{N}{N_o} = 0.99$$

$$N = N_o \exp(-\lambda t)$$

$$0.99 = e^{-\lambda t}$$

$$t = 7.33\times10^{8} \text{ seconds}$$

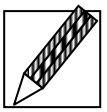
$$\therefore 0.99 = \exp(-7.33\times10^{8}\ \lambda)$$

$$\therefore \lambda = 1.37\times10^{-11}\ s^{-1}$$

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.6931}{\lambda}$$

$$= 1585 \text{ years}$$

تدريب(2)



1. إذا كان عمر النصف بالنسبة لنواة مشعة هو 14.8 ساعة ، أحسب نسبة الأنوية التي تتحلل في عشرة ساعات.

نسبة الأنوية التي تتحلل في الزمن (t) تعطي بالمعادلة التالية

$$\frac{N_o - N}{N_o} = 1 - e^{-\lambda t}$$

2. إذا انخفض العدد الابتدائي لأنوية مشعة خلال 8 ساعات إلى الثلث ، فإلى أى نسبة سينخفض العدد في 24 ساعة.

أسئلة تقويم ذاتي

1. ما هي طاقة الربط؟
2. بالرسم فقط وضح العلاقة بين طاقة الربط والعدد الكتلى (A).
3. اكمل العبارة التالية :

عندما تكون طاقة الربط موجبة تكون قيمة Q ..... ، وتكون النواة .... أما عندما تكون طاقة الربط .....، تكون Q .....وتكون النواة غير مستقرة .

4. ما هو النشاط الإشعاعي؟
5. عرف عمر النصف ثم اكتب قانون ايجاد نصف العمر .
6. إذا كان من جملة مليون ذرة من الرادون ، وجد أن 175,000 ذرة قد تحلل في خلال 24 ساعة، أثبت أن عمر النصف يساوي 3.3×10^5 ثانية .

4.5 انحلال جسيمات الفا Alpha Decay

عزيزي الدارس ،،

انحلال الفا هو نشاط إشعاعي تتحلل فيه النواة تلقائياً لتنتج جسيم الفا (نواة الهيليوم) بالإضافة لنواة وليدة (daughter nucleus) .

أشعة جسيمات الفا هي أشعة مؤينة ولها قدرة اختراق تصل لعدة سنتمترات في الهواء ، ولكن يمكن إيقافها بواسطة شريحة رقيقة من الورق .

يتقاسم جسيم الفا مع النواة الوليدة الطاقة Q

$$Q = T_D + T_\alpha \qquad (10.5)$$

حيث طاقة حركة النواة الوليدة = T_D

طاقة حركة جسيم الفا = T_α

عند الانحلال ترتد النواة الوليدة بسرعة V_D ، بينما يخرج جسيم الفا بالسرعة V_α. ويما أن السرعات منخفضة نسبياً ، فإننا يمكن أن نستخدم قوانين نيوتن.

$$M_D V_D = M_\alpha V_\alpha \qquad (11.5)$$

حيث كتلة النواة الوليدة = M_D

كتلة جسيم الفا = M_α

$$T_D = \frac{1}{2} M_D V_D^2 \qquad (12.5)$$

$$T_D = \frac{1}{2} M_D \left(\frac{M_\alpha V_\alpha}{M_D}\right)^2$$

$$= \frac{1}{2} M_\alpha V_\alpha^2 \left(\frac{M_\alpha}{M_D}\right)$$

$$\therefore T_D = T_\alpha \left(\frac{M_\alpha}{M_D}\right) \qquad (13.5)$$

$$\therefore Q = T_\alpha \left(1 + \frac{M_\alpha}{M_D}\right)$$

$$Q = T_\alpha \left(\frac{M_D + M_\alpha}{M_D}\right)$$

$$\therefore T_\alpha = Q \left(\frac{M_D}{M_D + M_\alpha}\right)$$

$$T_\alpha \simeq Q \left(\frac{M_D}{M_P}\right) \qquad (14.5)$$

حيث كتلة النواة إلام = M_P

عزيزي الدارس،،

اما بالنسبة للنظرية الكلاسيكية فإن على جسيم الفا امتلاك طاقة أكبر من حاجز الجهد لكي يستطيع الخروج من النواة . ولكن لوحظ أن جسيمات الفا يمكن أن تخرج حتى عندما تكون طاقتها أقل من ارتفاع حاجز الجهد . وقد جاء تفسير ذلك عن طريق ميكانيكا الكم بواسطة نظرية النفق (tunnel effect) التي سوف ندرسها في مقرر اخر.

ويمكننا أن نأخذ كمثال لذلك أشعة الفا من نواة اليورانيوم U_{238} . فبينما يبلـغ حاجز الجهد $9\ MeV$ ، فقد لوحظ أن النواة تشع جسيمات الفا بطاقة تبلغ $4\ MeV$. وعن طريق حل معادلة شرودنجر وجد أن احتمال تسرب جسيم الفا من خلال الحاجز يستمر موجوداً حتي عندما تكون طاقة الجسيم أقل من حاجز الجهد.

5.5 انحلال جسيمات بيتا "انبعاث الإلكترونات Beta Decay"

انحلال بيتا هو نشاط إشعاعي تتحلل فيه النواة تلقائياً وينبعث منها إلكترون أو بزترون

النواة الوليدة يكون لها نفس العدد الكتلى ولكنها تختلف من النواة إلام في العدد الذرى.

أشعة جسيمات بيتا هي أشعة مؤينة ولها قدرة اختراق اكبر من أشعة الفا. إذا أن بامكانها اختراق شريحة رقيقة من المعدن. وعدد الأنوية التي يحدث فيها انحلال بيتا أكبر بكثير من تلك التي يحدث فيها انحلال الفا. طاقة جسيمات بيتا تكون من العادة أقل من $4\ MeV$ ولكن سرعة الجسيمات تصل إلى ما يقارب سرعة الضوء $(0.995\ c)$.

1.5.5 انبعاث الإلكترونات

عزيزي الدارس ،

ان انبعاث الإلكترونات هو من خصائص الأنوية التي يكون فيها عدد النيوترونات أكبر من عدد البروتونات. إذ يتحول النيترون الموجود بالنواة تلقائياً إلى بروتون وإلكترون .

$$ {}_{o}n^{/} \rightarrow {}_{1}p^{/} + \overset{o}{\underset{-1}{e}} + \bar{\nu} \qquad (15.5) $$

حيث $\bar{\nu}$ هي مضاد النيوترينو (antineutrino)

ومن أمثلة ذلك التفاعل التالي:

$$({}_{11}Na^{24}) \rightarrow {}_{12}Mg^{24} + \overset{o}{\underset{-1}{e}} + \bar{\nu}$$

يتم التحلل التلقائي فقط إذا كانت قيمة Q موجبة.

إذا افترضنا أن m_1 , m_2 هي قيم الكتل الذرية للذرات Na^{24} ، Mg^{24}، وبالتالي :

$$m_1 = 23.990967 \quad a.m.u.$$
$$m_2 = 23.985045 \quad a.m.u.$$
$$Q = \left[(m_1 - 11m_e) - (m_2 - 12\ m_e) - m_e\right] c^2$$
$$Q = (m_1 - m_2)\, c^2$$
$$Q = (23.990967 - 23.985045) \times 931 \ \ MeV$$
$$Q = 0.005922 \times 931 \ \ MeV$$
$$Q = 5.51 \ \ MeV$$

ونلاحظ هنا أن قيمة Q موجبه .

ويمكننا أيضاً أن نجد قيمة Q من المعادلة (5. 15)

$$\Delta m = m_n - (m_p + m_e)$$
$$m_n = 1.008665 \quad a.m.u.$$
$$m_p = 1.007276 \quad a.m.u.$$
$$m_e = 0.00549 \quad a.m.u.$$
$$\Delta m = 0.00084 \quad a.m.u.$$
$$\equiv \ 782 \ \ keV$$

ونلاحظ أن الفرق في الكتل (Δm) يظهر في شكل طاقة حركة للإلكترون ومضاد النيترينو.

2.5.5 انبعاث البزترون Positron emission

عزيزي الدارس ،،

انبعاث البزترونات هو من خصائص الأنوية التي يكون فيها عدد البروتونات أكبر من عدد النيوترونات . وفي هذه العملية يتم انحلال البروتون إلى نيوترون ويصاحب ذلك انبعاث بوزترون ونيوترينو.

$$ {}_1p^{/} \rightarrow {}_0n^{/} + \overset{o}{\underset{-1}{e}} + v \qquad (16.5) $$

◄◄ مثال (3)

أثبت من المعادلة التالية أن انحلال الكربون المشع c^{11} إلى بورون يمكن أن يتم تلقائياً.

$$ ({}_6c^{11})^{*} \rightarrow {}_5B^{11} + \overset{o}{\underset{1}{e}} + v $$

علماً بأن الكتل الذرية للكربون والبورون هي :

$$ 11.011433 \quad a.m.u. \quad = c^{11} \text{ كتلة} $$

$$ 11.009305 \quad a.m.u. \quad = B^{11} \text{ كتلة} $$

الحل :

لكي يتم الانحلال تلقائياً يجب أن تكون قيمة Q موجبة. إذا افترضنا أن الكتل الذرية للكربون ، البورون والبزترون هي (m_e, m_2, m_1) فتكون كتل الأنوية كما يلي :

$$ m_1 - 6m_e \quad = c^{11} \text{ كتلة نواة} $$

$$ m_2 - 5m_e \quad = B^{11} \text{ كتلة نواة} $$

الشرط لأن تكون قيمة Q موجبه هو :

$$ (m_1 - 6m_e) > (m_2 - 5m_e) + m_e $$

$$ (m_1 - m_2) \quad > 2m_e $$

$$m_1 - m_2 = 0.002198 \quad a.m.u.$$
$$2m_2 = 0.001098 \quad a.m.u.$$

وبالتالي فإن $(m_1 - m_2)$ هي أكبر من $2m_2$ ، وهذا يستوفي شرط الانحلال التلقائي.

6.5 انحلال أشعة جاما Gamma Decay

عزيزي الدارس ،

الآن ننتقل الي الطريقة الثالثة للانحلال ، و هو انحلال جاما الذي يحدث فيه انبعاث أشعة جاما من نواة مثارة. ومن العادة فإن انبعاث جسيمات الفا أو بيتا من نواة مشعة ، يكون مصحوباً بانبعاث فوتونات جاما .

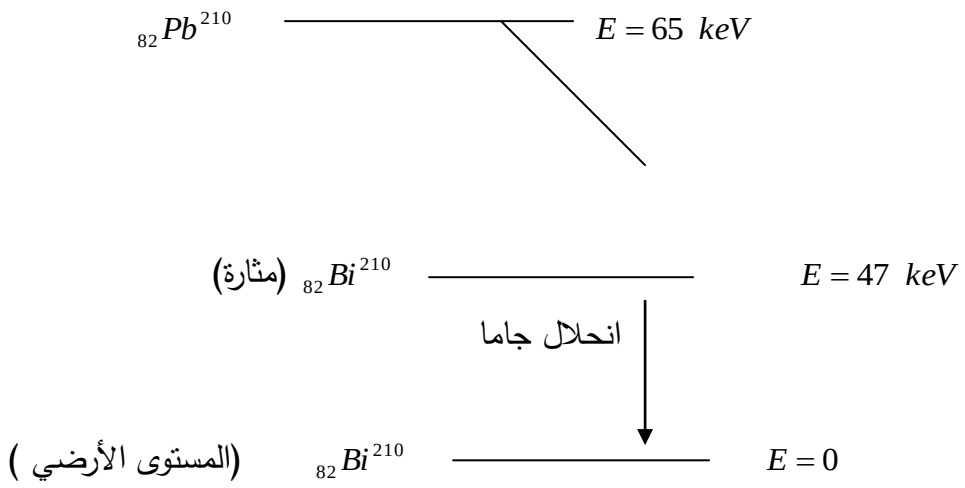
أشعة جاما تمثل الحد الأدني للطول الموجي في طيف الأشعة الكهرومغناطيسية. إذ يبلغ الطول الموجي لأشعة جاما ما بين $3.9\times10^{-10}m \leftrightarrow -4.7\times10^{-13}m$. ولأشعة جاما قدرة اختراق عالية جداً. كما أنها لا تتأثر بالمجالات الكهربية والمغناطيسية. وبهذه الخاصية الأخيرة ، فهي تختلف عن جسيمات الفا وبيتا. فوتون جاما لا يوجد بشكله المعروف داخل النواة ، وإنما يتم تكوينه مباشرة قبل الانبعاث . وهو بذلك يشابه الإلكترون في انحلال بيتا. حيث يتم تكوينه مباشرة قبل الانبعاث.

يفترض أنموذج القشرة (Shell model) أن البروتونات والنيوترونات تكون في مدارات داخل النواة. وعندما يهبط بروتون أو نيوترون إلى فجوة في مدار ذو طاقة منخفضة، يظهر الفرق في الطاقة في شكل فوتون جاما .

الشكل (3.5) يوضح انحلال جاما من نواة بسموث− 210(Bi^{210}) .

$$_{82}Pb^{210} \rightarrow (_{83}Bi^{210})^{*} + {}_{-1}e^{o}\ \bar{\nu}$$
$$(_{83}Bi^{210})^{*} \rightarrow {}_{83}Bi^{210} + \text{ون جاما}$$

ويلاحظ أن النواة المثارة تنخفض من مستوى الطاقة (47 keV) إلى المستوى الأرضي ، ويصاحب ذلك انبعاث فوتون جاما.



الشكل (5.3) انحلال جاما من نواة بسموث– 210

أسئلة تقويم ذاتي

1. اشرح كيفية انحلال جسيمات الفا . و باستخدم قوانين نيوتن اكتب معادلة طاقة حركة جسيم الفا = T_α
2. ما هي أشعة بيتا؟
3. ما الفرق بين انبعاث الإلكترونات و انبعاث البزترون ؟
4. أثبت أن الشرط لانبعاث البزترون في التفاعل أدناه هو أن يكون الفرق بين كتلة النواة الام وكتلة النواة الوليدة أكبر من كتلة أثنين من الإلكترونات.

$$(_6c^{11})^* \rightarrow {}_5B^{11} + {}^{o}_{1}e + v$$

الخلاصة

عزيزي الدارس,

في النهاية، نؤكد على ما أكدناه في البداية عن ضرورة تقويم هذه الوحدة، وإبداء ملاحظاتك للاستفادة منها. ولكن ما الذي ناقشناه ؟

قمنا بدراسة أساسيات نواة الذرة ، وعرفنا التركيب النووي ، وكيفية ايجاد طاقة ربط النواة ، و اخيرا الأنماط المختلفة لانحلال النواة

ومع نهاية هذا القسم نكون قد انهينا هذه الوحدة، ونأمل أن تكون قد أضافت الكثير إلى معلوماتك الثرة وان تسعد بالوحدة القادمة إنشاء الله.

إجابات التدريبات

التدريب(1)

الاجابة . (طاقة الربط = 2.22 MeV)

التدريب(2)

1. نسبة الأنوية التي تتحلل في الزمن (t) هي : $\frac{N_o - N}{N_o} = 1 - e^{-\lambda t}$

(النسبة = 37%)

2 .النسبة = 3.7%

مسرد المصطلحات

Nuclear Structure	تركيب النواة
nucleons	النويات
atomic number	العدد الذري
deuterium	الديوتيريوم
tritium	الترتيوم
heavy water	المياه الثقيلة
atomic number	الرقم الذري
mass number	العدد الكتلي
magic numbers	الأعداد السحرية
nuclear shell model	نظرية القشرة النووية
Binding Energy	طاقة الربط
Natural Radioactivity	النشاط الإشعاعي الطبيعي
half – life period	نصف العمر
Alpha Decay	انحلال جسيمات الفا
daughter nucleus	لنواة وليدة
tunnel effect	نظرية النفق
Beta Decay	انحلال جسيمات بيتا
antineutrino	النيوترينو
Positron emission	انبعاث البزترون
Gamma Decay	انحلال أشعة قاما
Shell model	أنموذج القشرة

ملحق

Physical constants الثوابت الفيزيائية

constants	Symbol الرمز	Magnitude القيمة	الثابت
Planck's constant	h $\frac{h}{2\pi}$ $(\hbar)$	$6.6256\times10^{-34}\ Js$ $4.1357\times10^{-15}\ eV\ s$ $1.0545\times10^{-34}\ Js$	ثابت بلانك
Boltzmann's constant	k	$1.3805\times10^{-34}23\ J/^{o}K$	ثابت بولتزمان
Rydberg constant	R	$1.097373\times10^{7}\ m^{-1}$	ثابت رايد بيرج
Bohr radius	r_1	$5.2918\times10^{-11}\ m$	نصف قطر بوهر
Electron charge	e	$1.6022\times10^{-19}\ c$	شحنة الالكترون
Electron mass	m_e	$9.1091\times10^{-31}\ kg$ $0.000549\ a.m.u$	كتلة الالكترون
Proton mass	m_p	$1.6725\times10^{-27}\ kg$ $1.007277\ a.m.u$	كتلة البرتون
Neutron mass	m_n	$1.6748\times10^{-27}\ kg$ $1.008665\ a.m.u$	كتلة النيوترون
Mass of deuterium	$m\ (_1H^2)$	$2.3434\times10^{-27}\ kg$ $2.0141\ a.m.u$	كتلة الديتريوم
Mass of alpha partial	m_α	$6.6443\times10^{-27}\ kg$ $4.0026\ a.m.u$	كتلة جسيم الفا
Velocity of light (in vacuum)	c	$2.9979\times10^{8}\ m\ s^{-1}$	سرعة الضوء في الفراغ

المراجع

1- Modern Physics of Quantum Mechanics. E.E. Anderson, Saunders Company, London,(1971).

2- مقدمة في الفيزياء الحديثة. الدكتور /فخري إسماعيل حسن. دار المريخ للنشر. الرياض (1993).

3- Concepts of Modern Physics.A.B. Beister. Mc Graw Hill (2003).

4- Modern Physics. R. Gautreau, William Souring: Schaum's outline series in science. Mc Graw Hill (1978).

5- الفيزياء العامة في الكهرباء والمغناطيسية – الضوء – الفيزياء الحديثة لطلاب الجامعات .أ.د. محمدين على احمد ال عيسي ، د. محمدين صالح العبدالله ، د. عبدالله راشد السماري. دار الخريجين للنشر والتوزيع (1997) .