الفصل الأول

نبذة عن الذرة والنواة
The atom and the nucleus

– مقدمة – الذرة – العدد الكتلي – العدد الذري – النظائر – حجم وكتلة النواة – الوحدة الذرية للطاقة – طاقة الترابط للنواة – أسئلة ومسائل

1-1 مقدمة

خلق الله الكون، الذي نسكن جزءاً منه، من مجموعة مواد كالماء والهواء والرمل والحديد والخشب. وتوجد المادة في هذا الكون على شكل عناصر منفصلة أو مركبات لهذه العناصر أو في شكل مخاليط من عدة مواد . أما العنصر (element) فهو الصورة الأولية للمادة ولا يمكن تحويله إلى صورة أبسط بالطرق الكيميائية. وتتألف كل المواد الموجودة في هذا الكون من اثنين وتسعين عنصراً طبيعياً مثل الهيدروجين والأكسجين والحديد والذهب وغيرها. كما يمكن إنتاج عدة عشرات من العناصر الأخرى بطرق صناعية مثل عنصر البلوتونيوم ذي الأهمية البالغة في الأسلحة النووية وبعض المفاعلات .

وعند اتحاد عنصرين أو اكثر اتحاداً كيميائيا يتكون ما يسمى بالمركب (compound). فعلى سبيل المثال يتكون الماء (H_2O) من عنصري الهيدروجين والأكسجين في حين يتكون السكر من عناصر الكربون والأكسجين والهيدروجين. كذلك، يمكن أن يتحلل المركب إلى عناصره الأولية باستخدام الطرق الكيميائية.

1-2 الذرة The atom

يتكون العنصر من وحدات متشابهة متناهية في الصغر يطلق عليها اسم ذرات. وتختلف العناصر باختلاف ذراتها. وتتكون ذرة أي

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

عنصر من جسم مركزي حجمه صغير جداً يعرف بالنواة (nucleus) ويبلغ نصف قطرها حوالي 10^{-13} سم . ويدور حولها عدد من الإلكترونات في مدارات يبلغ نصف قطرها 10^{-8} سم . وتتكون النواة بدورها من جسيمات تعرف بالبروتونات (protons) والنيوترونات (neutrons).

البروتون The proton

جسيم نووي يحمل شحنة كهربية مساوية تماماً لشحنة الإلكترون ولكنها موجبة. وتبلغ كتلة السكون للبروتون 1.6726×10^{-27} كجم . وعند استخدام وحدات الكتلة الذرية (atomic mass units amu) تساوي كتلة البروتون 1.007276 وحدة كتلة ذرية (و.ك.ذ).

الإلكترون The electron

جسيم يدور في قشرات خارجية للنواة ويحمل شحنة كهربية سالبة قيمتها المطلقة مساوية تماماً لشحنة البروتون (أي أنها تساوي 1.6×10^{-19} كولوم. وكتلة الإلكترون أصغر من كتلة البروتون بحوالي 1840 مرة حيث تبلغ 9.11×10^{-31} كجم (أي 0.0005486 وحدة كتلة ذرية)

النيوترون The neutron

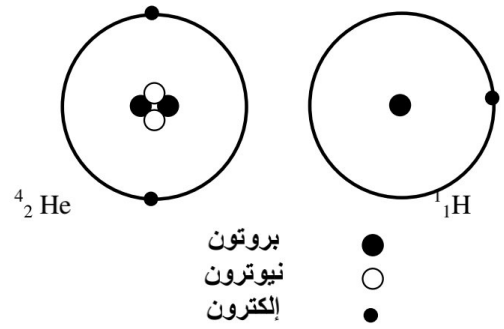
هو جسيم نووي متعادل الشحنة (أي لا يحمل شحنة كهربية)، وكتلته مساوية تقريباً لكتلة البروتون، حيث تبلغ 1.6749×10^{-27} كجم (أي 1.0086649 و.ك.ذ). وغالباً ما يتكون النيوترون نتيجة لاتحاد بروتون وإلكترون حيث إن النيوترون الحر (أي خارج النواة) يعيش في المتوسط لمدة 15 دقيقة ثم يتفكك تلقائيا إلى بروتون وإلكترون.

وهكذا، تشكل كل من البروتونات والنيوترونات الجسم المركزي للذرة والمعروف بالنواة وتدور حولها الإلكترونات في مدارات

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

أو قشرات (orbits or shells) مختلفة. ويتسع أقـــرب مـــدار للنـــواة لإلكترونين فقط ويعـــرف باسم المدار أو القشـــرة k (k-shell)، فـــي حين يتسع المدار الثاني والمعروف باسم المدار L لثمانية إلكترونـــات، ويتسع المدار الثالث والمعروف باسم المدار M لثمانية عشر إلكترونـــاً، والرابع وهو المدار N لثنين وثلاثين إلكتروناً .

والذرة متعادلة كهربياً حيث أن عدد البروتونات الموجبة فـــي النواة يتساوى دائماً مع عدد الإلكترونات السالبة في المـــدارات. ويبـــين شكل (1−1) رسماً تخطيطاً لذرتي الهيدروجين والهليوم. وتعتبـــر ذرة الهيدروجين أبسط الذرات على الإطلاق، وهي الذرة الوحيـــدة التـــي لا تحتوي على نيوترونات في نواتها حيث تتكون نواتها من بروتون واحد يدور حوله إلكترون واحد في المدار K عندما تكون الذرة غير مثارة .



شكل (1−1)

شكل تخطيطي لذرتي الهيدروجين والهليوم

1−3 العدد الكتلي والعدد الذري Mass and atomic numbers

العدد الكتلي للذرة هو مجموع عددي البروتونات والنيترونات في نواتها. ويوضح هذا العدد كتلة الذرة التقريبية بوحدات الكتلـــة الذريـــة حيث أن العدد الكتلي يكون دائما عددا صحيحا، أما الكتلة بوحدات الكتلة الذرية فتكون كسرا يقل قليلا عن العدد الصحيح. ولا يدخل في هذا العدد كتلة الإلكترونات نظراً لصغرها. ويرمز للعدد الكتلي بـــالرمز A. أمـــا

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

العدد الذري فهو عبارة عن عدد البروتونات في النواة، ويرمز له بالرمز Z. وعلى ذلك تتميز ذرة الهيدروجين $_1^1H$ بعدد ذري Z = 1 ، وعدد كتلي A = 1 . وأما ذرة الهليوم $_2^4He$ فيميزها عدد ذري Z = 2 وعدد كتلي A = 4 . وتتميز ذرة الكربون $_6^{12}C$ بعدد ذري Z = 6 وعدد كتلي A = 12 ، حيث تحتوي نواتها على ستة بروتونات وستة نيوترونات. أما ذرة اليورانيوم $_{92}^{238}U$ فعددها الذري Z = 92 في حين أن عددها الكتلي A = 238 ، حيث تحتوي نواة اليورانيوم على 92 بروتونا، 146 نيوترونا. ويعتبر اليورانيوم آخر وأثقل العناصر الموجودة في الطبيعة، ولكنه يمكن إنتاج عناصر ذات عدد ذري أو كتلي أعلى وذلك بطرق صناعية مثل البلوتونيوم $_{94}Pu$ وغيرها. ومن المتفق عليه أن يرمز للعنصر بأحرفه اللاتينية الأولى، ويكتب عدده الذري في الركن السفلي الأيسر وعدده الكتلي في الركن العلوي الأيسر .

4-1 النظائر The isotopes

تحتوي ذرات العنصر الواحد على العدد نفسه من البروتونات، إلا أنها قد تحتوي على أعداد مختلفة من النيترونات. ويعني هذا أن العدد الذري للعنصر الواحد لا يتغير، في حين يتغير عدده الكتلي تبعاً لعدد النيترونات. ويقال في هذه الحالة إن العنصر الواحد له عدة نظائر . فمثلاً نجد أن للهيدروجين ثلاثة نظائر هي:

الهيدروجين-1 $_1^1H$: وتتكون نواته من بروتون واحد ولا تحتوي على نيوترونات (A = 1، Z = 1)

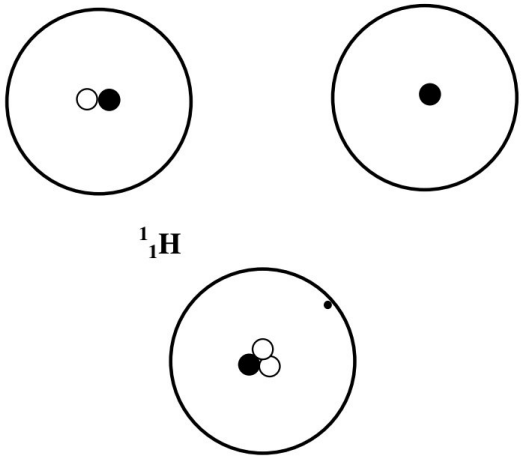
الهيدروجين-2 $_1^2H$: وتتكون نواته من بروتون واحد ونيوترون واحد (A = 2، Z = 1) ويعرف باسم الديتيريوم.

الهيدروجين-3 $_1^3H$: وتتكون نواته من بروتون واحد ونيوترونين، أي أن (A = 3 ، Z = 1) ويعرف باسم التريتيوم.

ويبين شكل (1-2) النظائر المختلفة لعنصر الهيدروجين.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ويوجد لكل عنصر عدد من النظائر تصل أحياناً إلى أكثر من خمسين نظيراً للعنصر الواحد. وتكون بعض النظائر مستقرة في حين يكون بعضها الآخر نشطاً (radioactive) فيصدر إشعاعات نووية. وعموما، يوجد العنصر في الطبيعة في شكل خليط من بعض نظائره، وأما بعضها الآخر فلا يوجد عادة في الطبيعة وإنما يمكن إنتاجه صناعياً باستخدام المفاعلات أو المعجلات النووية.



$^{2}_{1}H$ $^{1}_{1}H$

$^{3}_{1}H$

شكل (1-2)

النظائر المختللفة لعنصر الهيدروجين

وتجدر الإشارة إلى أن نظائر العنصر الواحد تتحد في جميع خواصها الكيميائية، حيث أن العدد الذري للعنصر هو الذي يحدد خواصه الكيميائية. ولذلك، فإنه لا يمكن فصل النظائر بالطرق الكيميائية وإنما يتم فصلها عن بعضها بطرق فيزيائية أخرى.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

وبالنسبة للعناصر الخفيفة (أي ذات العدد الذري الصغير) يمكن أن يكون عدد النيوترونات مساوياً أو أكبر أو أقل من عدد البروتونات. أما بالنسبة للعناصر ذات الأعداد الذرية المتوسطة والكبيرة فيكون عدد النيوترونات أكبر عادة من عدد البروتونات.

ويزداد الفرق بين هذين العددين كلما زاد العدد الذري Z وتوضح نظائر اليورانيوم هذه الحقيقة، حيث يبلغ العدد الذري لليورانيوم92 في حين يتراوح العدد الكتلي بين حوالي 230، 240.

5-1 حجم وكتلة النواة The size and the mass of the nuclues

ورد أن نصف قطر النواة يكون عادة أصغر بكثير من نصف قطر الذرة، حيث يقل نصف قطر النواة عن نظيره للذرة بحوالي مائة ألف مرة. ويمكن النظر إلى نواة أي نظير على أنها مجموعة من النيوترونات والبروتونات متراصة بجوار بعضها في شكل كرة نصف قطرها R وبذلك يكون حجمها عبارة عن $4\pi R^3/3$. وبزيادة عدد البروتونات والنيوترونات في النواة (أي بزيادة العدد الكتلي A) يزداد حجم النواة. وقد وجد عملياً أنه يمكن إيجاد نصف قطر النواة (بالسنتيمتر) باستخدام العلاقة التالية:

$$R = 1.2 \times A^{1/3} \times 10^{-13} \text{ (cm)} \qquad (1\text{-}1)$$

وحيث أن A تتراوح بين 1 ، 240 لجميع النوى الموجودة في الطبيعة فإن نصف قطر أكبر نواة لا يتعدى 10^{-12}سم.

أما بالنسبة لكتلة النواة فقد ذكر أن العدد الكتلي A يحدد بالتقريب كتلة النواة. وفي الحقيقة فإن الكتلة الحقيقية للنواة تكون دائماً أقل من العدد الكتلي. فلكي تبقى النواة متماسكة ومترابطة فإنها تحتاج إلى طاقة تربط هذه المكونات ببعضها، وإلا تفككت النواة إلى مكوناتها الأولية. وتبعاً لعلاقة أينشتين بين الطاقة والكتلة فإن جزءاً من كتلة النواة يتحول إلى طاقة ترابط تؤدي إلى تماسك مكونات النواة مع بعضها. بذلك، تصبح الكتلة الفعلية للنواة أقل من مجموع كتل مكوناتها.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

وقد استخدمت وحدة لقياس كتل النوى والذرات تعرف باسم وحدة الكتلة الذرية (atomic mass unit). ولقد اتفق عالمياً على اعتبار كتلة نظير الكربون 12 ($M(^{12}_{6}C)$ 12 مساوية 12 وحدة كتلة ذرية. وبالقياس على ذلك تكون كتلة نظير الهيدروجين $M(^{1}_{1}H)=1.007825$، وكتلة البروتون هي $M_P=1.007276$ ، وكتلة النيوترون هي $M_n=1.008665$ ، في حين أن كتلة الإلكترون هي $M_e = 0.0005486$ ، وذلك بوحدات الكتلة الذرية.

وهكذا، فإن وحدة الكتلة الذرية (amu) التي هي عبارة عن 12/1 من كتلة ذرة الكربون ($^{12}_{6}C$) تساوي كتلة مقدارها 1.6555×10^{-27} كجم.

6-1 الوحدات الذرية للطاقة Atomic units of energy

أثبت أينشتين أن الطاقة والمادة متكافئتان. بمعنى أن المادة يمكن أن تتحول إلى طاقة، والطاقة بدورها يمكن أن تتحول إلى مادة. وقد استنتج أينشتين العلاقة التي تربط بين المادة والطاقة عند حدوث التحول وهي العلاقة المعروفة باسم علاقة تكافؤ المادة والطاقة، وهي:

$$E_o = m_o C^2 \qquad (1\text{-}2)$$

حيث أن: E_o قيمة الطاقة بالجول، m_o كتلة المادة عند السكون بالكيلوجرامات، C سرعة الضوء بالمتر/ثانية ($C = 3 \times 10^8$ m/Sec)

وللتعبير عن الطاقة في المجالات الذرية والنووية تستخدم عادة وحدة صغيرة تعرف باسم وحدة الإلكترون – فولت eV unit. والإلكترون – فولت عبارة عن كمية الطاقة التي يكتسبها أو يفقدها إلكترون (أو بروتون) عند اجتيازه فرق جهد مقداره فولت واحد.

وحيث أن شحنة الإلكترون – 1.6×10^{-19} كولوم، نجد أن:

إلكترون – فولت واحد (eV) = 1.6×10^{-19} جول

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ومضاعفات هذه الوحدة هي:

كيلو إلكترون فولت (KeV) = 10^{3} إلكترون فولت
= 1.6×10^{-16} جول.

ميغا إلكترون فولت (MeV) 1 = 10^{6} إلكترون فولت
= 1.6×10^{-13} جول.

وإنه لمن المفيد ذكر بعض العلاقات الخاصة بالتحويل من وحدة الجول إلى بعض وحدات الطاقة الآتية:

1 سعر = 4.18 جول
1 كيلو واط . ساعة = 3.6×10^{6} جول

وباستخدام هذه العلاقات فإنه يمكن تحديد قيمة وحدة الكتلة الذرية سواءً بالجول أو بالإلكترون فولت، حيث نجد أن:

1 وحدة كتلة ذرية = 1.6555×10^{-27} (كجم)
× (3×10^{8} متر / ثانية)^{2}
= 1.49×10^{-10} جول
1 و ك ذ = 1.49×10^{-10} / 1.6×10^{-19}
= 931 ميغا إلكترون فولت

7-1 طاقة الترابط للنواة The nuclear binding energy

لما كانت النواة تحتوي على عدد معين من البروتونات الموجبة الشحنة فإنه تتولد بين هذه البروتونات داخل النواة قوى تنافر كهروستاتيكية، تتناسب تناسباً عكسياً مع مربع المسافات بينها. وحيث أن المسافات بين البروتونات في النواة صغيرة للغاية فإنه من المتوقع أن تكون قيمة قوى التنافر كبيرة للغاية، بحيث أن النواة لا تتكون، وإذا تكونت فإنها سرعان ما تتفكك. إلا أن بقاء النواة متماسكة يعني أن هناك

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

قوى أخرى للجذب أقوى من قوى التنافر المذكورة. وهذه القوى الجاذبة تعرف بالقوى النووية، وهي تؤثر بين كل من بروتون وبروتون، ونيوترون ونيوترون، وكذلك بين البروتون والنيوترون إذا وجدت هذه الجسيمات بجوار بعضها. وقد ثبت فيما بعد أن القوى النووية بين جميع هذه الجسيمات متكافئة مهما يكن نوعها. لذلك، فإنه من الناحية النووية (وليس من ناحية الشحنة) يمكن اعتبار كل من البروتون والنيوترون جسماً واحداً يطلق على أي منهما اسم نيوكلون (nucleon).

وهكذا، تجذب النيوكلونات بعضها بعضا ما دامت المسافة بين هذه النيوكلونات صغيرة (أقل من 10^{-13} سم). ويؤدي ذلك إلى ترابط هذه النيوكلونات وتكوين البناء المترابط والمعروف باسم النواة. ولكي تتفكك النواة إلى النيوكلونات المكونة لها فإنه يجب منحها كمية معينة من الطاقة، إذ أنه نتيجة لوجود طاقة الترابط تقل كتلة النواة عن مجموع كتل النيوكلونات المكونة لها. وهذا الفرق بين الكتلة الفعلية للنواة وبين مجموع كتل مكوناتها يشكل ما يسمى كتلة الترابط أو طاقة الترابط اللتان ترتبطان فيما بينهما بعلاقة التكافؤ بين الكتلة والطاقة.

أي أن كتلة الترابط للنواة تساوي مجموع كتل النيكلونات المكونة للنواة مطروح منها كتلة النواة الفعلية. وبالتالي نجد أن طاقة الترابط B هي:

$$B = (N M_n + Z M_p - M) C^2 \qquad (1\text{-}3)$$

حيث: M كتلة النواة الفعلية، M_n هي كتلة النيوترون، M_p هي كتلة البروتون و N عدد النيوترونات في النواة، Z عدد البروتونات فيها أي العدد الذري.

ولنحسب الآن طاقة الترابط لنواة الديتيريوم المكونة من بروتون ونيوترون، حيث أن كتلة الديتيريوم هي 2.013547 و ك ذ

$$B = 1 \times 1.008665 + 1 \times 1.007276 - 2.013547$$
$$= 0.002394 \text{ amu}$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

= 0.002394 x 931 = 2.23 MeV

أي أن طاقة الترابط لنواة الديتيريوم هي 2.23 ميغا إلكترون فولت. وبقسمة هذه القيمة على عدد نيوكلونات النواة نجد أن طاقة الترابط للنيوكلون الواحد في نواة الديتيريوم هي 1.165 ميغا إلكترون فولت. وتعتبر قيمة طاقة الترابط للنيوكلون الواحد بمثابة مقياس لمدى تماسك واستقرار النواة . فكلما زادت هذه القيمة كانت النواة متماسكة ومستقرة، وكلما قلت هذه القيمة فإن هذا يعني أن النواة أكثر تفككاً وغير مستقرة.

وتجدر الإشارة إلى أن طاقة الترابط للنيوكلون الواحد للنوى الخفيفة (مثل نظائر الهيدروجين والهليوم والليثيوم) تكون عادة صغيرة ثم تزداد بزيادة العدد الكتلي، وتستمر ثابتة عند حوالي 8.5 ميغا إلكترون فولت لكل نيوكلون للنوى المتوسطة الكتلة، ثم تبدأ في الانخفاض من جديد للنوى الثقيلة (حوالي 7.5 ميغا إلكترون فولت لنواة اليورانيوم). وهذا هو السبب الذي يؤدي إلى انطلاق طاقة كبيرة عند انشطار اليورانيوم والعناصر الثقيلة الأخرى مثل الثوريوم، وانطلاق طاقة أكبر عند اندماج عناصر خفيفة مثل نظائر الهيدروجين.

8-1 مسائل وأسئلة للمراجعة

1- ارسم رسما تخطيطيا يمثل ذرات العناصر التالية
$^{14}_{6}C$, $^{9}_{4}Be$, $^{3}_{1}H$

2- ما هي كتلة الإلكترون بوحدات الكتلة الذرية وبوحدات الميغا إلكترون فولت؟

3- ماذا تعني كلمة نظير؟ مثّل لما تقول.

4- أوجد نصف قطر نواة الراديوم 226، إذا اعتبرنا أن النواة على شكل كرة.

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الفصل الثاني

النشاط الإشعاعي والإشعاعات
Radioactivity and radiation

مقدمة – تفكك ألفا – تفكك بيتا – إشعاعات جاما – التفكك الإشعاعي– السلاسل الإشعاعية الطبيعية – النشاط الإشعاعي المستحث – وحدات قياس النشاط الإشعاعي – أسئلة ومسائل.

2–1 مقدمة

تتميز الكثير من النظائر – سواء الطبيعية أو الاصطناعية (أي المجهزة باستخدام المفاعلات أو المعجلات النووية)– بخاصية تعرف باسم النشاط الإشعاعي (radiaoactivity).

والنشاط الإشعاعي عبارة عن تفكك Decay (أو اضمحلال Disintegration) تلقائي لنواة النظير مع إصدار جسيمات نووية مثل جسيمات ألفا أو بيتا، قد يتبعها انطلاق إشعاعات جاما. وتعرف النظائر التي يحدث فيها هذا التفكك أو الاضمحلال بالنظائر المشعة. وتجدر الإشارة إلى أن عملية التفكك تحدث في النظائر سواء أكانت في صورة نقية أم تدخل ضمن مركبات كيميائية أو بيولوجية أو غيرها. كما أن عملية التفكك لا تعتمد إطلاقاً على الظروف الطبيعية مثل الحرارة وحالة النظير ..الخ.

2–2 تفكك ألفا α - decay

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

تتميز نوى العناصر الثقيلة (الأثقل من الرصاص) بانخفاض قيمة طاقة الترابط لكل نيوكلون في النواة. لذلك، فإن هذه النوى غير مستقرة، وتتفكك إلى نوى أخف وأكثر استقراراً. فعلى سبيل المثال، نجد أن نواة اليورانيوم $^{238}_{92}U$ التي تتكون من 92 بروتونا، 146 نيوترونا تتفكك إلى نواة الثوريوم $^{234}_{90}Th$ المكونة من 90 بروتونا، 144 نيوترونا وينبعث نتيجة هذا التفكك جسيم ألفا α، الذي هو عبارة عن نواة الهليوم والمكون من بروتونين ونيوترونين. وتمثل عملية التفكك هذه بالمعادلة التالية:

$$^{238}_{92}U \longrightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He\ (\alpha)$$

وهكذا، يتكون نتيجة تفكك نواة اليورانيوم نواة جديدة أكثر استقراراً هي نواة الثوريوم مع إصدار جسيم ألفا. كذلك، نجد أن نواة البولونيوم $^{214}_{82}Po$ تتفكك إلى نواة الرصاص $^{214}_{82}Pb$ مع إصدار جسيم ألفا، أي أن:

$$^{218}_{84}Po \longrightarrow {}^{214}_{82}Pb + \alpha$$

ولكي تكون النواة مشعة لجسيم ألفا يجب أن تكون كتلتها أكبر من مجموع كتلتي النواة الوليدة (daughter nucleus) وجسيم ألفا (يطلق اسم النواة الأم Parent nuvleus على النواة المشعة التي تتفكك، في حين يطلق اسم النواة الوليدة على النواة الناتجة عن التفكك). أي أنه كي تستطيع النواة الأم أن تتفكك بإصدار جسيم ألفا يجب أن يتحقق الشرط التالي:

$$M_p - (M_d + M_\alpha) > 0 \qquad (2\text{-}1)$$

حيث M_p كتلة النواة الأم، M_d كتلة النواة الوليدة، M_α كتلة جسيم ألفا. ولا يتحقق هذا الشرط إلا لنوى بعض العناصر الأثقل من الرصاص وعدد محدود جدا من العناصر الأخف من الرصاص. أما نوى العناصر الأخف فإنها تكون مستقرة بالنسبة لإصدار جسيمات ألفا.

وتجدر الإشارة إلى أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير معين تتخذ قيمة واحدة. ولكن إذا تكونت النواة الوليدة في حالات مختلفة الإثارة فعندئذ تكون طاقات جسيمات ألفا مختلفة ولكنها ذات قيم محددة. فمثلاً

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

نجد أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير البولونيوم 210 تتخذ قيمة واحدة هي 5.305 ميغا إلكترون فولت. أما جسيمات ألفا الصادرة عن اليورانيوم 238 فتتخذ قيمتين هما 4.198 ميغا إلكترون فولت، 4.149 ميغا إلكترون فولت. ويعود السبب في ذلك إلى أن نواة الثوريوم 234 الوليدة قد تتكون في الحالة الأرضية فتتخذ جسيمات ألفا القيمة الأكبر للطاقة، وقد تتكون هذه النواة الوليدة في حالة مثارة فتتخذ جسيمات ألفا القيمة الأصغر للطاقة. ويمكن حساب طاقة جسيمات ألفا الصادرة من نظير معين وذلك باستخدام علاقة أينشتين لتكافؤ الكتلة والطاقة، حيث أن الطاقة E الناتجة عن التفكك هي:

$$E = \{ (M_p - (M_d + M_\alpha) \} C^2 \qquad (2\text{-}2)$$

وتتوزع هذه الطاقة بين جسيم ألفا والنواة الوليدة بنسب معاكسة لكتلتيهما وذلك طبقا لقانون بقاء الزخم (قانون بقاء كمية الحركة)، أي أن جسيم ألفا يحمل الجزء الأكبر من الطاقة الناتجة عن التفكك في حين تحمل النواة الوليدة جزءاً صغيراً جداً من هذه الطاقة. ويسهل حساب طاقة جسيمات ألفا E_α بدلالة طاقة التفكك E وكتلة النواة الوليدة M_d وكتلة النواة الأم M_p ، وذلك بتطبيق قانونا بقاء الزخم والطاقة الحركية، حيث يتبين أن:

$$E_\alpha = (M_d / M_p) E \qquad (2\text{-}3)$$

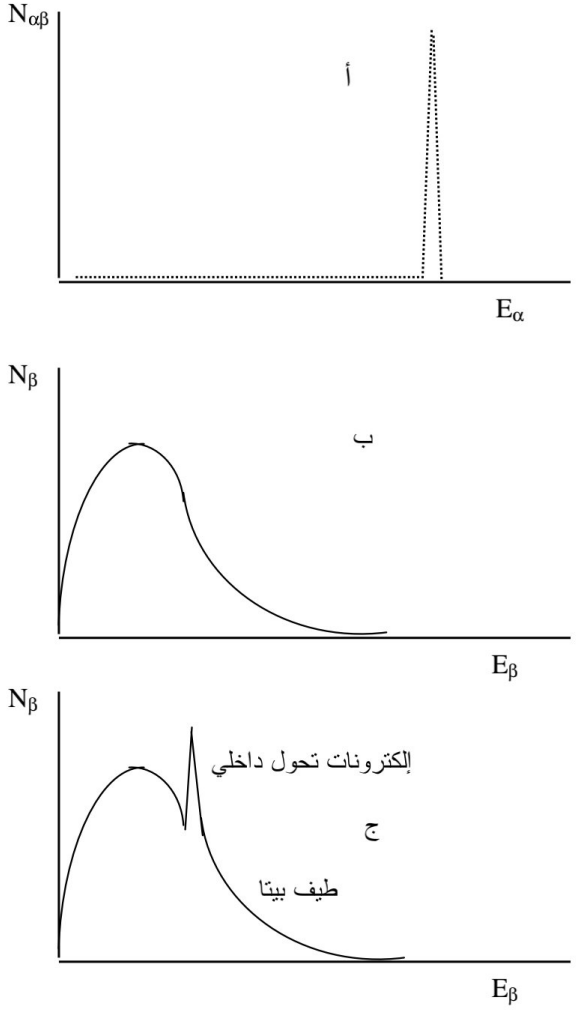
وحيث أن كتل النوى ثابتة، وطاقة التفكك ثابتة بالنسبة لكل نواة تكون طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن النظير المعين واحدة عندما تتفكك النواة الأم إلى نواة وليدة في الحالة الأرضية، وقد تتخذ طاقات هذه الجسيمات قيما متعددة لكنها محددة عندما تتكوّن النواة الوليدة في حالات مثارة مختلفة. لذلك يقال أن طيف جسيمات ألفا هو طيف محدد الطاقات ويختلف من نظير لآخر، ويعتبر بصمة من البصمات التي تميز هذا النظير دون غيره. ويبين شكل (2-1أ) مخططا لمثل هذا الطيف.

2-3 تفكك بيتا β - decay

تصدر نوى بعض النظائر المشعة جسيمات أخرى تعرف باسم جسيمات بيتا (β - particles). وهذه الجسيمات عبارة عن إلكترونات أو

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

بوزيترونات. والبوزيترون (positron) عبارة عن جسيم كتلته مساوية تماما لكتلة الإلكترون ولكن شحنته موجبة. ويحدث هذا النوع من التفكك (المعروف باسم تفكك بيتا) للنوى في كثير من النظائر سواء أكانت ثقيلة أم خفيفة.



الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

شكل (2-1): أ- طيف ألفا ب- طيف جسيمات بيتا
ج- طيف جسيمات بيتا + إلكترونات تحول داخلي

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

فمن المعروف أنه كي يكون النظير مستقراً بالنسبة لإصدار جسيمات بيتا يجب أن تكون النسبة بين عدد النيوترونات والبروتونات (أي N/Z) في نواة هذا النظير نسبة معينة تتراوح بين 1 بالنسبة للنظائر الخفيفة وتزداد حتى تصل إلى حوالي 1.6 بالنسبة للنظائر الثقيلة. فمثلاً يلاحظ أن نواة نظير الكربون 12 ($^{12}_{6}C$) مستقرة حيث أن نسبة النيوترونات إلى البروتونات فيها هي N/Z = 6/6 = 1. وتعتبر هذه النواة من النوى الخفيفة. أما نواة نظير الكربون 14($^{14}_{6}C$) فهي نواة غير مستقرة حيث إن هذه النسبة تصبح:

$$N / Z = 8/6 = 1.33$$

كذلك، يلاحظ أن نواة نظير السيزيوم 133 ($^{133}_{55}Cs$) مستقرة لأن النسبة تصبح 1.42 في حين أن نواة نظير السيزيوم 137($^{137}_{55}Cs$) غير مستقرة لأن النسبة تصبح 1.49. ويوضح شكل (2–2) منحنى الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا. وهذا المنحنى عبارة عن العلاقة بين عدد النيوترونات N وعدد البروتونات Z للنظائر المستقرة. فإذا كانت النسبة بين عدد البروتونات والنيوترونات للـــنظير المعـــين واقعة على منحنى الاستقرار كان النظير مستقراً بالنسبة لتفكك بيتا. وأما إذا خرجت هذه النسبة عن المنحنى فإن النظير يكون نشطاً بالنسبة لهذا التفكك.

كذلك، يمكن أن يكون النظير المعين مستقراً بالنسبة لتفكك ألفا ولكنه غير مستقر بالنسبة لتفكك بيتا والعكس صحيح. فمثلاً تعتبر نواة اليورانيوم 238 مستقرة بالنسبة لتفكك بيتا (أي أنها لا تتفكك مصدرة جسيم بيتا)، ولكنها غير مستقرة بالنسبة لتفكك ألفا (أي تتفكك مع إصدار جسيم α) . ونتيجة لإصدارها جسيم α تتكون نواة جديدة هي الثوريوم 234. وعند حساب النسبة N/Z لليورانيوم 238 نجدها:

$$N / Z = 146 / 92 = 1.587$$

أما بالنسبة للثوريوم 234 نجد أن النسبة هي:

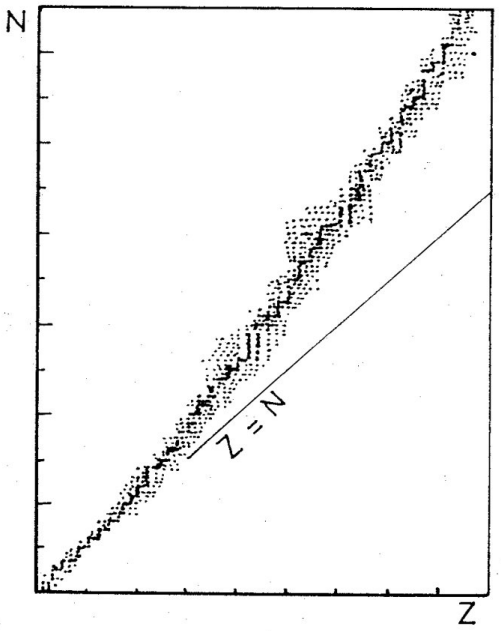
$$N / Z = 144 / 90 = 1.60$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

أي أن نسبة النيوترونات إلى البروتونات خرجت عن منحنى الاستقرار. لذا، نجد أن نواة الثوريوم تصبح غير مستقرة بالنسبة لتفكك بيتا مع إصدار جسيم بيتا. ويعبر عن هذا التفكك كالتالي:

$$^{234}_{90}\mathrm{Th} \longrightarrow {}^{234}_{91}\mathrm{Pa} + \beta^-$$

أي أن نواة الثوريوم 234 تتفكك إلى نواة بروتكتينيوم 234 مع إصدار جسيم بيتا سالب (إلكترون). ويلاحظ أنه نتيجة لهذا التفكك زاد عدد البروتونات داخل النواة بمقدار بروتون واحد، في حين قل عدد النيوترونات بمقدار نيوترون واحد فتصبح نسبة N/Z في البروتكتينيوم هي 1.571 ، وهي تحقق الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا.



شكل (2-2)
منحنى الاستقرار بالنسبة لتفكك بيتا

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

2-3-1 أنواع تفكك بيتا Types of β-decay

أ- التفكك الإلكتروني The electron decay

يلاحظ أن إصدار إلكترون من النواة ناتج عن تحول نيوترون من نيوترونات النواة إلى بروتون، وذلك كي تصبح النسبة بين النيوترونات والبروتونات هي نسبة الاستقرار. ويعبر عن هذا التفكك كالآتي:

$$^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}p + \beta^{-}$$

ومن أمثلة التفكك الإلكتروني تفكك الكوبلت 60 (^{60}Co) إلى النيكل 60 (^{60}Ni) وتفكك السيزيوم 137 (^{137}Cs) إلى الباريوم 137 (^{137}Ba).

ب- التفكك البوزيتروني The positron decay:

في بعض الأحيان تكون نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النظير المعين أقل من النسبة التي تحقق الاستقرار. وفي هذه الحالة يتحول أحد بروتونات النواة إلى نيوترون، وينطلق نتيجة لذلك التحول بوزيترون يحمل شحنة البروتون الموجبة. ويعرف تفكك بيتا في هذه الحالة بالتفكك البوزيتروني، ويعبر عنه كالآتي:

$$^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \beta^{+}$$

ومن أمثلة التفكك البوزتروني تفكك الصوديوم 22 (^{22}Na) إلى النيون 22 (^{22}Ne).

ج- الأسر الإلكتروني The electron capture

يمكن أن يحدث تحول أحد بروتونات النواة إلى نيوترون بطريقة أخرى بخلاف المذكورة في التفكك البوزتروني. ويتم ذلك بأن تأسر النواة إلكتروناً من الإلكترونات المدارية القريبة من النواة (أي من المدار K وفي أحيان قليلة من المدار L) ويتحد هذا الإلكترون المأسور مع أحد بروتونات النواة فيتكون النيوترون دون إصدار جسيم بيتا. ويعرف تفكك بيتا في هذه الحالة بالأسر الإلكتروني ويعبر عنه كالآتي:

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

$$^{0}_{-1}e + {}^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n$$

وهكذا فإنه يوجد ثلاثة أنواع لتفكك بيتا هي التفكك الإلكتروني (β^-) والبوزيتروني (β^+) والأسر الإلكتروني (electron capture). وفي حالة الأسر الإلكتروني لا تصدر النواة أيا من جسيمات بيتا.

ولقد ثبت فيما بعد أنه عند حدوث أي نوع من تفكك بيتا ينطلق من النواة جسيمات تعرف باسم النيوترونيو (neutrino) – ν (نيو) . والنيوترينو عبارة عن جسيم متعادل الشحنة وكتلة السكون له مساوية للصفر (أي $m_\nu=0$) . وعلى هذا يمكن التعبير عن الأنواع الثلاثة لتفكك بيتا كالآتي:

(تفكك إلكتروني) $\quad {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}P + \beta^- + \nu'$

(تفكك بوزيتروني) $\quad {}^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \beta^+ + \nu$

(أسر إلكتروني) $\quad {}^{0}_{-1}e + {}^{1}_{1}P \longrightarrow {}^{1}_{0}n + \nu$

ويعرف ν' باسم النيوترينو المضاد(anti - neutrino). وعموما، يعرف الجسيم المضاد على أنه هو الذي إذا تلاقى مع جسيمه عند تحركهما بسرعة محدودة نسبيا فإنهما يفنيان معا ككتلة مادية وينتج عن هذا الفناء طاقة في شكل إشعاعات كهرومغناطيسية (إشعاعات جاما أو أشعة سينية).

ويمكن معرفة ما إذا كان النظير المعين مستقرا أو غير مستقر بالنسبة لأي نوع من تفكك بيتا. فإذا تحقق الشرط:

$$^{A}_{Z}M > (\,^{A}_{Z+1}M + m_e) \qquad (2\text{-}4)$$

حيث $^{A}_{Z}M$ ، $^{A}_{Z+1}M$ ، m_e هي كتل النواة الأم والنواة الوليدة والإلكترون بالترتيب، تكون النواة نشطة بالنسبة لإصدار الإلكترونات. وإذا تحقق الشرط:

$$^{A}_{Z}M > (\,^{A}_{Z-1}M + m_e) \qquad (2\text{-}5)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

حيث $^{A}_{Z-1}M$ ، هي كتلة النواة الوليدة في حالة التفكك البوزيتروني، تكون النواة نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات. وأخيراً فإنه لكي تكون النواة نشطة بالنسبة للأسر الإلكتروني يجب أن يتحقق الشرط:

$$(m_e + {}^{A}_{Z}M) > {}^{A}_{Z-1}M \qquad (2\text{-}6)$$

فإذا تحقق الشرط (2–5) نجد أن الشرط (2–6) قد تحقق هو الآخر. لذلك، فإن أي نواة نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات تكون في الوقت نفسه نشطة بالنسبة للأسر الإلكتروني. لذلك، فإن التفكك البوزيتروني يصاحبه دائماً نسبة معينة من الأسر الإلكتروني والعكس غير صحيح. فإنه يمكن أن يتحقق الشرط (2–6) دون أن يتحقق الشرط (2–5). عندئذ، نجد أن النواة نشطة بالنسبة للأسر الإلكتروني ولكنها غير نشطة بالنسبة لإصدار البوزيترونات.

2–3–2 طاقة جسيمات بيتا Energy of β- particles

ذكرنا أن طاقة جسيمات ألفا الصادرة عن نظير معين تتخذ قيمة واحدة أو قيما محددة للطاقة. وأما بالنسبة لجسيمات β الصادرة عن نفس النظير فإن طاقاتها يمكن أن تتخذ أي قيم للطاقة، اعتبارا من الصفر وحتى قيمة قصوى معينة لكل نظير. ويرجع السبب في ذلك إلى أنه بالإضافة إلى جسيم بيتا الصادر عن النظير المشع يَصدر جسيم آخر هو النيوترينو المضاد أو النيوترينو. فطاقة تفكك بيتا الناتجة بالنسبة للتفكك الإلكتروني تكون ثابتة، ويمكن تحديدها بالعلاقة:

$$E = \{ {}^{A}_{Z}M - ({}^{A}_{Z+1}M + m_e)\} C^2 \qquad (2\text{-}7)$$

وفي حالة التفكك البوزيتروني تكون الطاقة الناتجة من التفكك ثابتة كذلك وهي:

$$E= \{ {}^{A}_{Z}M - ({}^{A}_{Z-1}M + m_e)\} C^2 \qquad (2\text{-}8)$$

وتتوزع طاقة التفكك في كلتا الحالتين بين الجسيمين الناتجين وهما الإلكترون والنيوترينو المضاد في حالة التفكك الإلكتروني، أو بين البوزيترون والنيوترينو في حالة التفكك البوزيتروني. وفي حالة الأسر الإلكتروني تكون الطاقة الناتجة عن التفكك ثابت أيضا للنظير المعين وهي:

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

$$E = ({}^{A}_{Z}M - {}^{A}_{Z-1}M)\, C^2 \qquad (2\text{-}9)$$

وتوزيع الطاقة بين الجسيمين الناتجين عن كل تفكك غير محـــدد بنسبة معينة. فقد تكون طاقة النيوترنيو المضاد قريبة جدا مـــن الصـــفر وبذلك يحمل الإلكترون (في التفكك الإلكتروني) كل طاقة التفكك وتعرف طاقة الإلكترون عندئذ بالطاقة القصوى للتفكك أو طاقة نقطـــة النهايـــة (end point). وقد يحمل النيوترنو المضاد جزءا أكبر من طاقة التفكـــك فيحمل الإلكترون الجزء الباقي من هذه الطاقـــة. كـــذلك، قـــد يحمـــل النيونرينو المضاد طاقة التفكك كلها فتكون طاقة الإلكترون قريبـــة مـــن الصفر. وعند قياس طاقة الإلكترونات الصادر عن عدد كبير جدا مـــن النوى المشعة ورسم العلاقة بين عدد الإلكترونات ذات الطاقة المعينـــة وبين طاقاتها يمكن الحصول على طيف جسيمات بيتا الذي يمثله منحنى شبيه بالمبين في شكل (2-1ب).

ويعرف هذا المنحنى باسم طيف أشعة بيتا وهو يوضح أن طاقة جسيمات بيتا الصادرة عن نظير معين يمكن أن تتخذ أية قيمة، ابتداءً من الصفر وحتى أقصى قيمة وهي قيمة طاقة التفكك أو ما يعـــرف باســـم نقطة النهاية. لذا، فإنه يقال أن طيف جسيمات بيتا عبارة عـــن طيـــف مستمر على عكس طيف جسيمات ألفا الذي يتخذ قيمة واحـــدة أو قيمـــا محددة.

2-4 إشعاعات جاما Gamma radiation

في اغلب الأحيان تكون النوى الوليدة الناتجة عن تفكك ألفـــا أو تفكك بيتا (أوالنوى الناتجة عن أية عملية نووية أخـــرى كالتفـــاعلات النووية في حالة مثارة أو متهيجة excited state). ويعني هذا أن طاقـــة مكونات النواة تكون أعلى من طاقتها في الحالة الأرضية (المســـتقرة)، أي أن كتلة النواة في الحالة المثارة تكون أكبر من كتلتها فـــي الحالـــة الأرضية (ground state). عندئذ، تنتقل النواة من الحالة المثارة إلى حالة أقل إثارة أو إلى الحالة الأرضية للتخلص من طاقـــة الإثـــارة، وذلـــك بإصدار إشعاعات كهرومغناطيسية تعرف باسم إشعاعات جامـــا. كمـــا يمكن أن تتخلص النواة من طاقة الإثارة بتجميع هـــذه الطاقـــة الزائـــدة

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

وتركيزها على أحد الإلكترونات المدارية (خاصة المدار K لقربه من النواة) فينطلق هذا الإلكترون تاركا الذرة وحاملا معه قيمة محددة من الطاقة. وتعرف هذه العملية باسم التحول الداخلي (internal conversion)

وتجدر الإشارة إلى أن إزالة الإثارة عن طريق إصدار إشعاعات كهرومغنيطيسية (إشعاعات جاما) يمكن أن يحدث بانتقال النواة من الحالة المثارة مباشرة إلى الحالة الأرضية. كذلك، يمكن أن يحدث الانتقال على مراحل كأن تنتقل النواة من الحالة المثارة إلى حالة أقل إثارة ثم إلى حالة أقل ... وهكذا، إلى أن تصل النواة للحالة الأرضية. فعلى سبيل المثال، فإنه عند حدوث تفكك بيتا لنواة الصوديوم 22 سواءً عن طريق التفكك البوزيتروني أو عن طريق الأسر الإلكتروني تتكون نواة عنصر جديد هو النيون 22، وفقا للتفكك البوزتروني التالي:

$$^{22}_{11}Na \longrightarrow {}^{22}_{10}Ne^{*} + \beta^{+}$$

أو وفقا لتفكك الأسر الإلكتروني:

$$e^{-} + {}^{22}_{11}Na \longrightarrow {}^{22}_{20}Ne^{*}$$

والعلامة * معناها أن نواة النيون في حالة مثارة، حيث يتكون النيون 22 في نمطي التفكك في حالة مثارة بطاقة إثارة مقدارها 1.275 ميغا إلكترون فولت. ثم تضمحل نواة النيون 22 من الحالة المثارة إلى الحالة الأرضية مع إصدار إشعاع جاما (فوتون جاما) طاقته مساوية لطاقة الإثارة. ويبين شكل (2–3أ) مخططا لهذه العملية.

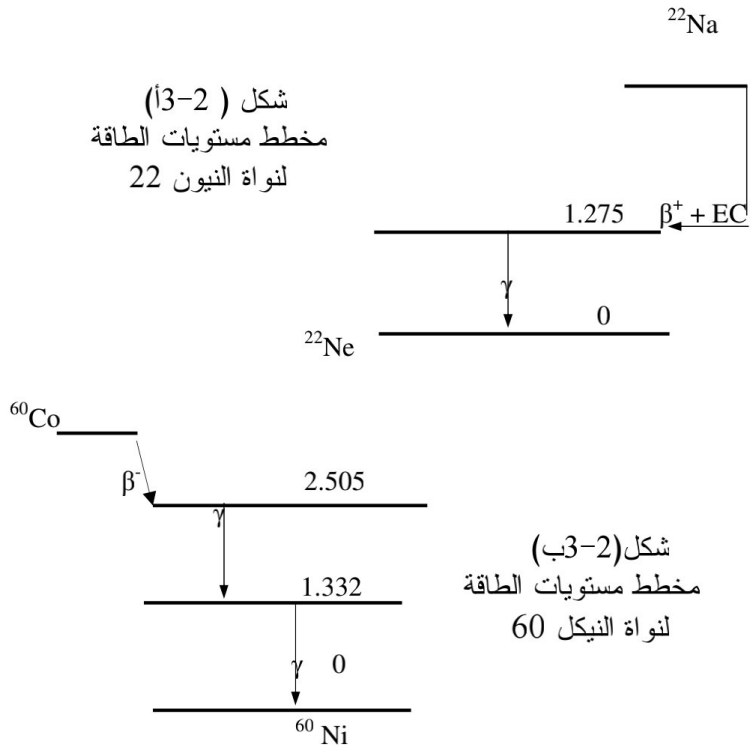
ويمثل مخطط تفكك واضمحلال الكوبالت 60 (شكل2–3ب) مثالا للتحول من الحالة المثارة إلى الحالة الأرضية على مراحل . فعند تفكك نواة الكوبالت 60 وإصدار الإلكترون تتحول إلى نواة نيكل60 لمعادلة التفكك البيتاوي التالية:

$$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni^{*} + \beta^{-} + \upsilon$$

وتكون نواة النيكل في الحالة المثارة الرابعة بطاقة إثارة مقدارها 2.505 ميغا إلكترون فولت. فتنتقل (تضمحل) نواة النيكل 60 من هذه الحالة إلى الحالة المثارة الأولى مباشرة بطاقة إثارة أقل وهي 1.332

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ميغا إلكترون فولت مع إصدار فوتون جاما بطاقة مقدارها 1.173 ميغا إلكترون فولت (أي تساوي فرق الطاقة بين الحالتين المثارتين). ثم تنتقل



شكل (2-3أ)
مخطط مستويات الطاقة
لنواة النيون 22

شكل(2-3ب)
مخطط مستويات الطاقة
لنواة النيكل 60

نواة النيكل من الحالة المثارة الأولى إلى الحالة الأرضية مع إصدار فوتون جاما بطاقة مقدارها 1.332 ميغا إلكترون فولت. وبصفة عامة تكون طاقة فوتون جاما γ E نتيجة انتقال النواة من حالة مثارة ابتدائية i إلى حالة نهائية f أقل إثارة مساوية للفرق بين طاقتي الحالتين وتحدد بالعلاقة:

$$E\gamma = E_i - E_f = h\nu$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

حيث E_i ترمز لطاقة الحالة الابتدائية للنواة، E_f ترمز لطاقة الحالة النهائية، h هو ثابت بلانك ($h = 6.63x10^{-34}$ جول.ثانية)، ν تردد الفوتون.

2-4-1 التحول الداخلي The internal conversion

سبق الإشارة إلى أنه في بعض الأحيان ينتج عن اضمحلال جاما انطلاق أحد إلكترونات القشرات K أو L أو M الذرية دون أن يخرج فوتون جاما المنبعث من النواة خارج الذرة. في هذه الحالة لا يسجل فوتون جاما كناتج لاضمحلال جاما وإنما يسجل إلكترون بطاقة محددة تساوي طاقة فوتون جاما مطروحا منها طاقة ترابط الإلكترون في القشرة المحددة.

وتعرف الإلكترونات المنطلقة من القشرة K أو L أو M نتيجة لاضمحلال جاما للنواة بإلكترونات التحول الداخلي وتظهر هذه الإلكترونات في صورة خط طيفي رفيع محدد الطاقة للإلكترونات فوق طيف الإلكترونات الناتجة عن تفكك بيتا شكل (2-1ج). فعلى سبيل المثال يتفكك الذهب 198 من خلال تفكك بيتا السالب إلى الزئبق 198 في حالته المثارة الأولى، بصفة أساسية، بطاقة إثارة 412 ك إ ف. وعند اضمحلال الزئبق 198 إلى الحالة الأرضية ينطلق فوتون جاما حاملا فرق الطاقة وهو 412 ك إ ف. ويمكن أن يتفاعل هذا الفوتون عند انطلاقه مع أحد الإلكترونات المدارية القريبة من النواة مثل إلكترونات القشرة K أو L أو M فيمنحه كل طاقته (راجع الفصل الثالث) فيستهلك الإلكترون جزءا من هذه الطاقة على فك ترابطه بالنواة وينطلق حاملا الجزء الباقي من الطاقة، وتعرف العملية عندئذ بالأثر الكهروضوئي الداخلي أي في نفس الذرة التي انطلق منها الفوتون.

كذلك، يمكن أن تنطلق طاقة الإثارة من النواة لأحد الإلكترونات مباشرة دور انطلاق فوتون جاما بشرط أن يكون هذا الإلكترون قريبا من النواة أي من الإلكترونات التي تنتمي للقشرة K أساسا، وأحيانا للقشرة L ،وأحيانا نادرة للقشرة M. ويعرف اضمحلال النواة، عندئذ،

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

بأنه اضمحلال جاما من خلال إلكترونات التحول الداخلي .ولا تختلف طاقة هذه الإلكترونات الناتجة عن التحول الداخلي عن طاقة إلكترونات الأثر الكهرضوئي للفوتون المنطلق من النواة. لذلك يستحيل فصل إلكترونات التحول الداخلي عن إلكترونات الأثر الكهروضوئي الداخلي . وتكون طاقتهم هي

$$E_e = E_\gamma - Be$$

حيث E_e طاقة الإلكترون المنطلق، E_γ طاقة فوتون جاما أو فرق طاقتي الإثارة الذي حدث الإضمحلال بينما،B_e طاقة الترابط للإلكترون.

وفي حالة الزئبق 198 تكون طاقة ترابط الإلكترون في القشرة K هي 83 ك إ ف. بذلك تكون طاقة إلكترونات التحول من هذه النواة هي:

$$E_e = 412 - 83 = 329 \quad KeV$$

وذلك بالنسبة للإلكترونات المنطلقة من القشرة K . أماعند انطلاق الإلكترونات من القشرة L (وهو الحتمال الأصغر)، وحيث أن طاقة ترابط الإلكترون في هذه القشرة للذهب تبلغ حوالي8.9 ك إ ف، تكون طاقة إلكترونات التحول الداخلي من القشرة L هي:

$$E_e = 412 - 8.9 = 403.1 \quad KeV$$

وهذان الخطان من الإلكترونات وحيدة الطاقة يظهران عادة فوق الطيف المستمر لجسيمات بيتا.

وعند انطلاق أحد إلكتروني القشرة K (أو أي من الإلكترونات الثمانية للقشرة L فإنه يترك مكانه فارغا، ويقال عندئذ أن هناك فجوة في القشرة K أو L أو حتى M . وبالتالي، تبدأ الإلكترونات الموجودة في المدرات الأبعد من النواة بشغل هذه الفجوة، ويحدث نتيجة لذلك انطلاق أشعة سينية تحمل فرق الطاقة بين المستويين كما سيرد لاحقا.

ويعرف الاحتمال النسبي لحدوث التحول الداخلي من القشرة K α_k على أنه نسبة عدد الإلكترونات المنطلقة من القشرة K إلى عدد

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

فوتونات جاما المنبعثة من نفس العينة من هذه النوى. وعموما، تتغير قيمة معامل التحول الداخلي α_k بين صفر ، 1 وتزيد قيمته عموما بزيادة العدد الذري Z للنواة. وتحدد معاملات التحول الداخلي بالنسبة للقشرات L ، M بنفس الأسلوب إلا أن هذه المعاملات تقل كثيرا بالنسبة لمعاملات القشرة K .

وهكذا، نجد أن هناك العديد من النظائر التي تتميز بنشاط إشعاعي طبيعي. وتتفكك هذه النظائر مصدرة إما جسيمات ألفا أو بيتا أو كليهما معا، وقد يتبع ذلك مباشرة أو خلال فترة زمنية معينة انطلاق إشعاعات جاما نتيجة اضمحلال النويات الوليدة من الحالات المثارة إلى حالات أقل إثارة أو إلى الحالةالأرضية.

2-5 الأشعة السينية X - rays

تصدر الأشعة السينية عن الذرة بخلاف جسيمات ألفا وبيتا وإشعاعات جاما التي تصدر عن النواة. ويجب التفريق بين نوعين مختلفين من الأشعة السينية يختلفان من حيث أسلوب توزع طاقة الأشعة وهما:

2-5-1 الأشعةالسينية المميزة للعنصر

يصدر هذا النوع من الأشعة السينية عند انتقال الإلكترونات الذرية من مدارات (قشرات) ذات طاقة أعلى إلى مدارات ذات طاقة أقل في الذرة نفسها. فعند وجود فجوة إلكترونية في مدار ذي طاقة أقل ينتقل أحد الإلكترونات من مدار ذي طاقة أعلى ليشغل هذه الفجوة، وينطلق في اللحظة نفسها فوتون أشعة سينية (موجة كهرومغناطيسية) حاملاًفرق طاقتي الإلكترون في المدارين. ولما كانت قيم طاقات الإلكترونات في المدارات الذرية محددة وثابتة للعنصر الواحد وتختلف من عنصر لآخر، فإنه تتخذ فوتونات الأشعة السينية المنطلقة نتيجة لانتقال الإلكترونات بين المدارات قيما محددة وثابتة للطاقة بالنسبة للعنصر الواحد، وتختلف هذه القيم باختلاف العنصر. وهذا يعني أنه عند إثارة الإلكترونات في مدارات ذرات العنصر الواحد بأي أسلوب من

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

أساليب الإثارة تصدر ذرات هذا العنصر (لحظة التخلص من الإثـــارة) فوتونات سينية ذات طاقات محددة ومعلومة ومميزة للعنصـــر. ويطلـــق علىهذه الأشعة اسم الأشعة السينية المميزة للعنصر وتعد بصـــمة مـــن بصماته، وتستخدم عادة في عمليات التحليل الكمي والكيفي للعناصر.

وتوسم الأشعة السينية المميزة للعنصر المعين بمنحهـــا نفـــس الرمز الخاص بالقشرة التي ينتقل إليها الإلكترون. فعلى سبيل المثـــال، فإنه عند انتقال الإلكترون من القشرة L إلى القشرة K توسم هذه الأشعة بالحرف K . أما عند انتقال الإلكترون من القشرة M إلـــى القشـــرة L فتوسم الأشعة السينية بالحرف L . ولا يقتصر التوسيم على ذكر رمـــز القشرة التي ينتقل إليها الإلكترون وإنما يؤخذ فـــي الحســـبان، كـــذلك، المستويات الفرعية لنفس القشرة التي يتم الانتقال منها وكذلك المستويات الفرعية التي يتم الانتقال إليها. فعندالانتقال من القشرة الفرعيـــة الأبعـــد (أي الأعلى طاقة) وهي القشرة L_3 إلى القشرة K توسم بـــالرمز $K_{\alpha 1}$ ، والأشعة المميزة للانتقال من القشرة الفرعية L_2 إلى القشرة K توســـم بالرمز $K_{\alpha 2}$. ويبين شكل (2−4) مخططا للقشرات الفرعية (المـــدارات الفرعية للإلكترونات) ولتوسيم الأشعة الـــــسينية النـــــاتجةعن انتقـــال الإلكترونات بين هذه القشرات.

مثال:

إذا علمت أن طاقـــة تـــرابط الإلكترونـــات فـــي مـــدارات ذرة الرصاص هي كالمبينةفي الجدول التالي. فما هي طاقة أهـــم الخطـــوط الطيفية للأشعة السينية المميزة للرصاص.

القشرة	K 1S1/2	L1 2S1/2	L2 2P1/2	L3 2P3/2	M1 2S1/2	M2 2P1/2	M3 2P3/2
طاقة الترابط ك.ف	88.005	15.861	15.200	13.035	30851	30554	3.066

الحل:

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

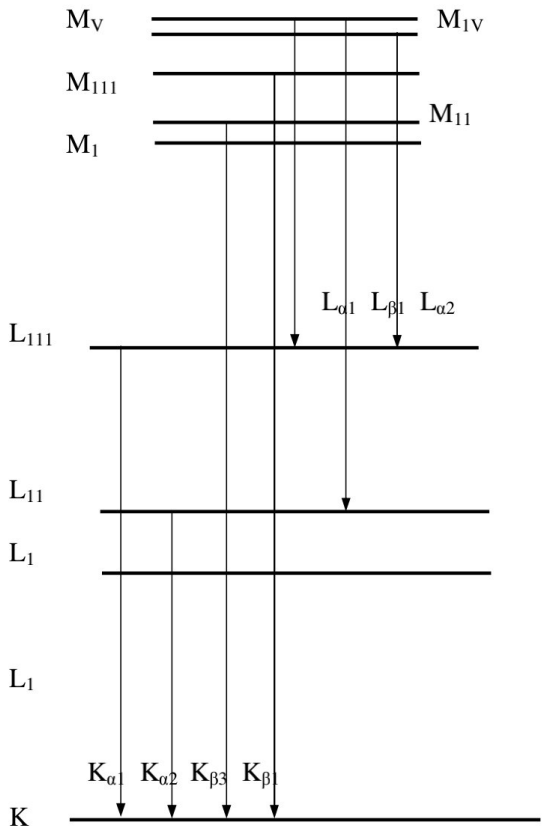
من المعروف أن $K_{\alpha 1}$ تنتج عن انتقال الإلكترون من القشرة الفرعية L_3 إلى القشرة K . بذلك تكون طاقة الأشعة السينية من الرصاص $_{82}Pb$ هي:

$K_{\alpha 1}$ (L_3 –> K) = 88.005 – 13.035 = 74.97 KeV

$K_{\alpha 2}$ (L_2 –> K) = 88.005 – 15.200 = 72.805 KeV

$K_{\beta 1}$ = (M_3 –> K) = 88.005 – 3.066 = 84.939 KeV

$K_{\beta 2}$ = (M_2 –> K) = 88.005 – 3.554 = 84.451 KeV

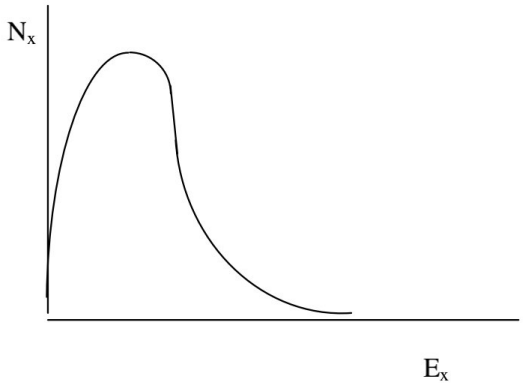


الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

شكل (2–4)
القشرات والقشرات الفرعية للإلكترونات في الذرة وخطوط الأشعة الشينية المنبعثة عند انتقال الإلكترونات من القشرات الأعلى للأدنى

2–5–2 الأشعة السينية الانكباحية

عند حدوث انكباح شديد (أي تناقص شديد في السرعة) للإلكترون، أو لأي جسيم مشحون سريع بصفة عامة، بسبب تفاعل هذا الإلكترون أو الجسيم المشحون مع المجال الكهربائي الشديد للذرة أو للنواة تنطلق الطاقة التي يفقدها الإلكترون (أو الجسيم المشحون) بسبب تناقص سرعته في صورة فوتون أشعة سينية يحمل فرق طاقة الإلكترون أو الجسيم قبل وبعد التفاعل. وتسمى الأشعة المتولدة بهذا الأسلوب بالأشعة السينية الانكباحية. ويتميز طيف الأشعة الانكباحية شكل (2–5) بأنه طيف مستمر، أي تتخذ طاقة الفوتونات قيما مختلفة تبدأ من الصفر وتنتهي عند أقصى قيمة لطاقة الإلكترون أو الجسيم المنكبح. ومن أمثلة الأشعة السينية الانكباحية تلك الأشعة التي يتم توليدها في أنابيب الأشعة السينية المستخدمة في التشخص الطبي وفي التطبيقات الصناعية المختلفة، حيث يتم تعجيل الإلكترونات باستخدام فرق جهد كبير ثم تكبح الإلكترونات المعجلة علىمادة المصعد (الأنود) فتنطلق الأشعة الانكباحية.



الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

شكل (2-5): طيف الأشعة السينية الانكباحية

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

2-5-3 إلكترونات أوجر Auger electrons

في الفقرة (2-5-1) السابقة ورد أنه عند حدوث فجوة (أي فراغ إلكتروني) في إحد القشرات K أو L أو M فإنه يقال أن الذرة مثارة وأنها تعود إلى حالتها غير المثارة بهبوط أحد الإلكترونات من المدار الأعلى ليشغل هذه الفجوة أو بهبوط عدد من الإلكترونات من مدارات أعلى إلى مدارات أدنى لشغل جميع المدارات الأدنى بالعدد المقنن لها من الإلكترونات. وورد أن ذلك يترتب عليه انطلاق أشعة سينية مميزة تكون طاقة الفوتون لكل منها مساوية تماما لفرق طاقتي القشرتين.

إلا أنه لايحدث في بعض الأحيان انطلاق للفوتون. فعلى سبيل المثال لوحظ أنه عند وجود فجوة في القشرة K يمكن أن يهبط إلكترون من القشرة L ليشغل الفراغ الموجود في القشرة K ، عندئذ تتكون الفجوة في القشرة L مع انطلاق فوتون أشعة سينية مميزة. إلا أنه قد لايحدث بعد ذلك هبوط إلكترون من قشرة أعلى لشغل الفجوة في القشرة L. وإنما يلاحظ انطلاق إلكترون آخر من القشرة التالية M ، بدلا من فوتون الأشعة السينية. وبهذا تكون فجوة ثانية في القشرة M. ويطلق على الإلكترون المنطلق من القشرة M إلكترون أوجر. ويحمل هذاالإلكترون طاقة E_e تساوي:

$$E_e = h\nu - E_M$$
$$= E_K - E_L - E_M$$

حيث $h\nu$ طاقة الفوتون الذي ينبغي أن ينطلق عند الانتقال من القشرة L إلى القشرة K.

وجدير بالذكر أن هذه العملية تشبه تماما عملية التحول الداخلي الذي يتمخض عن انطلاق إلكترونات مدارية بدلا من فوتونات جاما المنبعثة من النواة. إلا أن إلكترون أوجر يعني تحول فوتون أشعة سينية إلى إلكترون وعدم انطلاق الفوتون وانطلاق إلكترون بدلا منه. ويطلق على إلكترون أوجر في هذه الحالة إلكترون KLM ، لأنه بدأ بوجود

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

فجوة في القشرة K وانتهت العملية إلى انطلاق إلكترون من القشـــرة M بدلا من الفوتون الناتج عن انتقال الإلكترون من القشرة M إلى القشرة L

وتجدر الإشارة إلى إمكانية انطـــلاق إلكترونـــات أوجـــر مـــن مستويات أعلى وتسمى عندئذ بثلاثة أحرف يمثل أيسرها القشرة الاقرب الى النواة التي تكونت فيها الفجوة وأيمنها القشرة التـــي انطلـــق منهـــا إلكترون مثل K L M أو غيرها.

ويبقى تعريف احتمال حدوث انطلاق إلكترونات أوجر ω_K على أنه النسبة بين عدد فوتونات الأشعة السينية المنطلقة من القشرة K إلى عدد الفجوات المتكونة في القشرة K .

2–6 التفكك الإشعاعي The radioactive decay

يعتبر التفكك الإشعاعي مع إصدار حسيم ألفا أو بيتا أو إشعاعات جاما عملية إحصائية خاضعة لقوانين الفيزياء الإحصائية، حيث أنه ليس بالإمكان توقع النواة أو النوى التي يمكن أن تتفكك في لحظـــة معينـــة. ويمكن إيجاد القانون الذي تتفكك بموجبه النوى انطلاقا مـــن النظريـــة الإحصائية.

2–6–1 قانون التفكك الإشعاعي The radioactive decay law

نفرض أن (لامدا) هو عبارة عن احتمال تفكك نواة معينة فـــي ثانية واحدة، وأن هذا الاحتمال صغير جدا، أي أن:

$$0 < \lambda << 1$$

معنى ذلك أن احتمال تفكك هذه النواة خلال زمن قصير مقداره dt هـــو (λ dt) . فإذا كان عدد النوى النشطة التي لم تتفكك بعد هو N فهذا يعني أن احتمال التفكك لكل هذا العدد من النوى خلال الزمن dt هو λ dt N . أي أن عدد النوى الذي يمكن أن يتفكك خلال هذا الزمن هو:

$$dN = - N \lambda dt$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

وتعني الإشارة السالبة أن عدد النوى N المتبقي دون تفكك يقل كلما زاد الزمن. وبقسمة طرفي هذه المعادلة الأخيرة على العدد N وأخذ تكامل الطرفين مع اعتبار أن عدد النوى النشطة عند الزمن t = 0 هو N_0 نجد أن :

$$N(t) = N_0 \, e^{-\lambda t} \qquad (2\text{-}10)$$

حيث، N(t) هوعدد النوى النشطة المتبقية دون تفكك حتى اللحظة t . وتعرف هذه العلاقة **بقانون التفكك الإشعاعي**، وتعرف الكمية λ **بثابت التفكك** (أو الاضمحلال)

2-6-2 الشدة الإشعاعية للعينة The sample activity

في معظم الأحيان يكون المطلوب هو معرفة عدد النوى A(t) التي تتفكك في الثانية، وليس عدد النوى المتبقية دون تفكك والمحددة بالعلاقة (2-10). ويعرف عدد النوى التي تتفكك في الثانية الواحدة من أي عينة مشعة باسم الشدة الإشعاعية لهذه العينة أو نشاطها الإشعاعي (Activity of a Sample). ويسهل تحديد هذه الشدة وذلك بتفاضل المعادلة (2-10) بالنسبة للزمن، أي أن:

$$A(t) = dN(t)/dt$$

$$= \lambda N_0 \, e^{-\lambda t} = \lambda N(t) \qquad (2\text{-}11)$$

وتعرف $A_0 = \lambda N_0$ بالشدة الإشعاعية عند اللحظة t = 0 ، لذا فإن:

$$A(t) = A_0 \, e^{-\lambda t} \qquad (2\text{-}12)$$

2-6-3 عمر النصف ومتوسط العمر The half-life and mean-life

عمر النصف (أو العمر النصفي) للنظير المشع المعين هوعبارة عن الفترة الزمنية التي تنخفض خلالها الشده الإشعاعية لعينة من هذا النظير إلى النصف. وبمعنى آخر فإن عمر النصف هو الزمن اللازم لتفكك نصف عدد نوى العينة. ويرمز للعمر النصفي، عموما،

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

بالرمز $t_{1/2}$. وباقتفاء هذا التعريف فإنه بوضـــع $t = t_{1/2}$ ، $N(t) = N_o/2$ في العلاقة (2–10) يتبين أن:

$$N_0 / 2 = N_0 e^{- \lambda t1/2}$$

ومنها يتبين أن:

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

$$= 0.693 / \lambda \qquad (2\text{-}13)$$

وحيث إن وحدة الزمن هي الثانية فإن وحدة قياس ثابت التفكك λ هي 1/ ثانية (أي ثانية$^{-1}$).

أما متوسط العمر لعينة مشعة والذي يرمز له عـــادة بـــالرمز τ (تاو) فهو عبارة عن مجموع أعمار جميع النوى العينة مقســـوما علـــى عددها ويسهل تحديده باستخدام العلاقة(2–10) كالآتي:

$$\tau = (1 / N_0 \int_0^{\infty} dN(t).t = 1/\lambda = t_{1/2} / 0.693 \qquad (2\text{-}14)$$

وهكذا نجد أن كلا من λ ، $t_{1/2}$ ، τ مرتبطـــة ببعضـــها بعلاقـــة بسيطة، ومعرفة إحداها يعين باقيها.

2–6–4 تعيين ثابت التفكك λ وعمر النصف $t_{1/2}$ عمليا

يمكن تحديد ثابت التفكك λ للعديد من النظائر المشعة باســـتخدام القانون (2–12) والذي يمكن كتابته في الشكل التالي

$$\ln \{A(t) / A_0\} = - \lambda t$$

حيث يمثل الرمز (ln) لوغاريتم الأساس الطبيعـــي (e = 2.71). وعند استخدام لوغاريتم الأساس العشري تأخذ العلاقة الأخيـــرة الشـــكل التالي:

$$\log \{A(t) / A_0\} = - 0.4343 \lambda t \qquad (2\text{-}15)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

بالرمز $t_{1/2}$. وباقتفاء هذا التعريف فإنه بوضـــع $t = t_{1/2}$ ، $N(t) = N_o/2$ في العلاقة (2–10) يتبين أن:

$$N_0 / 2 = N_0 e^{- \lambda t1/2}$$

ومنها يتبين أن:

$$t_{1/2} = \ln 2 / \lambda$$

$$= 0.693 / \lambda \qquad (2\text{-}13)$$

وحيث إن وحدة الزمن هي الثانية فإن وحدة قياس ثابت التفكك λ هي 1/ ثانية (أي ثانية$^{-1}$).

أما متوسط العمر لعينة مشعة والذي يرمز له عـــادة بـــالرمز τ (تاو) فهو عبارة عن مجموع أعمار جميع النوى العينة مقســـوما علـــى عددها ويسهل تحديده باستخدام العلاقة(2–10) كالآتي:

$$\tau = (1 / N_0 \int_0^{\infty} dN(t).t = 1/\lambda = t_{1/2} / 0.693 \qquad (2\text{-}14)$$

وهكذا نجد أن كلا من λ ، $t_{1/2}$ ، τ مرتبطـــة ببعضـــها بعلاقـــة بسيطة، ومعرفة إحداها يعين باقيها.

2–6–4 تعيين ثابت التفكك λ وعمر النصف $t_{1/2}$ عمليا

يمكن تحديد ثابت التفكك λ للعديد من النظائر المشعة باســـتخدام القانون (2–12) والذي يمكن كتابته في الشكل التالي

$$\ln \{A(t) / A_0\} = - \lambda t$$

حيث يمثل الرمز (ln) لوغاريتم الأساس الطبيعـــي (e = 2.71). وعند استخدام لوغاريتم الأساس العشري تأخذ العلاقة الأخيـــرة الشـــكل التالي:

$$\log \{A(t) / A_0\} = - 0.4343 \lambda t \qquad (2\text{-}15)$$

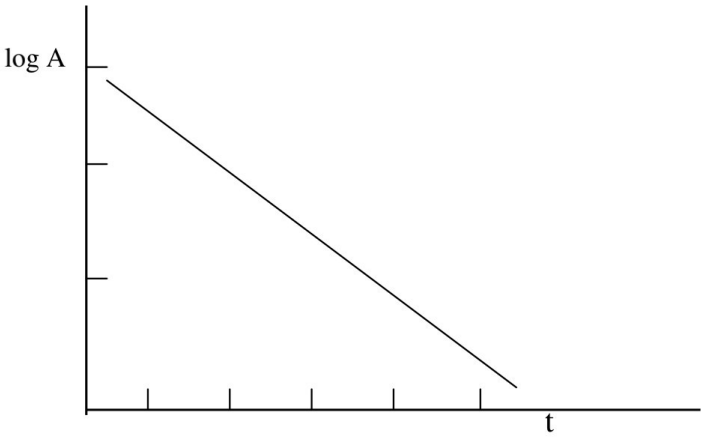
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

لأن لوغاريتم عدد ما للأساس العشري = 0.4343 لوغاريتم العدد نفسه للأساس الطبيعي، أي أن:

$$\log A(t) = \log A_0 - 0.4343\ \lambda\ t \qquad (2\text{-}16)$$

وهكذا، فإنه عند قياس الشدة الإشعاعية للعينة كدالة من الزمن ورسم العلاقة بين log A(t) والزمن t ، فإننا نحصل على خط مستقيم كالمبين في شكل (2–6) يبلغ ميله $S = -0.4343\ \lambda$. وبمقارنة الميل المحدد تجريبيا مع هذه القيمة الأخيرة يمكن تحديد قيمة ثابت التفكك λ. وبمعرفة ثابت التفكك يسهل إيجاد قيمة عمر النصف $t_{1/2}$ أو متوسط العمر τ لهذه العينة باستخدام العلاقات (2–13) و(2–14). ولقياس ثابت التفكك λ لعينة ما توضع هذه العينة على مسافة مناسبة من عداد الإشعاعات (الجهاز المستخدم لتسجيل عدد الإشعاعات) ويتم قياس معدل العد R (counting rate) خلال فترات زمنية متساوية. ويجب ملاحظة أن معدل العد R (وهو عبارة عن عدد الجسيمات المسجلة في وحدة الزمن) يتناسب مع الشدة الإشعاعية للعينة طالما أن وضع العينة بالنسبة للعداد لم يتغير طوال فترة إجراء التجربة أي أن:

$$R(t) / R_0 = A(t) / A_0$$



شكل (2–6)

العلاقة بين لوغاريتم الشدة الإشعاعية log A والزمن t

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ولسهولة تحديد λ يستخدم ورق رسم بياني نصف لوغاريتمي حتى يستغنى عن استخراج قيمة اللوغاريتم في كل مرة. ولتحديد الميل تقسم عدد الدورات اللوغاريتمية على الزمن المقابل. ويمكن كذلك تحديد λ باستخدام العلاقة (2–16) مباشرة، حيث إن

$$\lambda = \{ \log A_0 - \log A(t) \} / 0.4343\, t$$

وفي هذه الحالة تختار نقطتان متباعدتان على المستقيم لتمثلا A_0 ، $A(t)$ ويكون t هو الفارق الزمني المقابل بين النقطتين المختارتين.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد عمر النصف مباشرة، وذلك من العلاقة (2–12). فعند قياس معدل العد $R(t)$ كدالة ورسم العلاقة بين $R(t)$ حيث $[R(t) \alpha A(t)]$ والزمن t نحصل على منحنى كالمبين في شكل (2–7)، ومنه يمكن تحديد عمر النصف $t_{1/2}$ مباشرة، حيث إنه عبارة عن الزمن الذي تنخفض خلاله شدة العينة إلى النصف. ويلاحظ أنه خلال فترتي عمر نصف تصبح شدة العينة $(2/1)^2 = (4/1)$ الشدة الأصلية، وخلال 7 فترات عمر نصف تصبح شدة العينة $(2/1)^7 = (128/1)$ من الشدة الأصلية وخلال عشر فترات تصبح الشدة $(2/1)^{10} = (1024/1)$ من الشدة الأصلية، أي أقل من 0.1 % من شدتها الأصلية . وهكذا فإنه بمرور الوقت تقل شدة العينة وتصبح قيمة مهملة بالنسبة للشدة الأصلية ولكنها لاتصل إلى الصفر.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد ثابت التفكك λ أو عمر النصف $t_{1/2}$ بهذه الطريقة بالنسبة للنظائر التي يتراوح عمرها النصفي بين عدة ثواني وعدة سنوات. أما بالنسبة للنظائر التي يبلغ عمرها النصفي قيما عالية(كاليورانيوم 238 مثلا والذي يبلغ عمره النصفي 4.468×10^9 سنة) فإنه لا يمكن تحديد إعمارها النصفية أو ثابت التفكك لها بهذه الطريقة حيث أن الانخفاض في الشدة الإشعاعية لها لا يكون محسوسا خلال زمن التجربة حى ولو استمر هذا الزمن عشرات السنين. لذا، فإنه لتحديد ثابت التفكك للنظائر ذات العمر النصفي

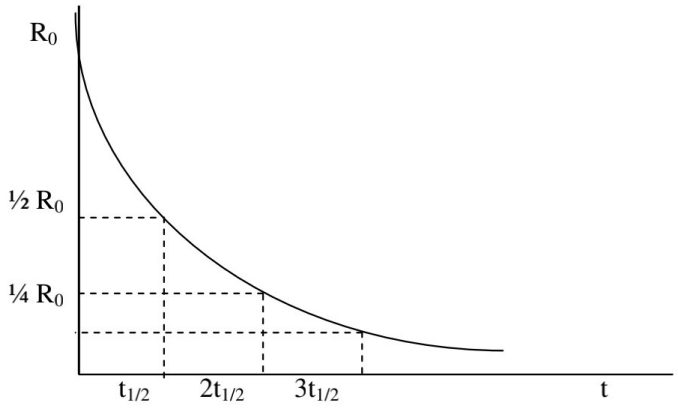
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الطويل فإنه يجب معرفة عدد النويات النشطة الموجودة في العينة في لحظة معين. ولما كان:

$$| dN / dt | = \lambda N$$

$$= A = R / C$$

حيث C عبارة عن ثابت يحدد نسبة عدد الجسيمات التي يسجلها العداد إلى عدد جميع الجسيمات الصادرة من العينة، R هو معدل العد فإنه بمعرفة معدل العد R والثابت C وعدد النوى النشطة في العينة N يمكن تحديد ثابت التفكك λ وبالتالي حساب عمر النصف للنظير المعين.



شكل (2-7)
العلاقة بين معدل العد R(t) والزمن t

أما بالنسبة للنظائر ذات العمر النصفي الصغير فتستخدم طرق أخرى لتحديد أعمارهم النصفية.

2-6-5 تحديد العمر النصفي للنظائر المختلطة

يحدث أحيانا أن تكون العينة غير نقية وتحتوي على خليط من بعض النظائر المشعة المختلطة. فإذا كان الخليط مكونا من عدد محدود من النظائر المشعة (اثنين أو ثلاثة على الأكثر) واختلفت الأعمار

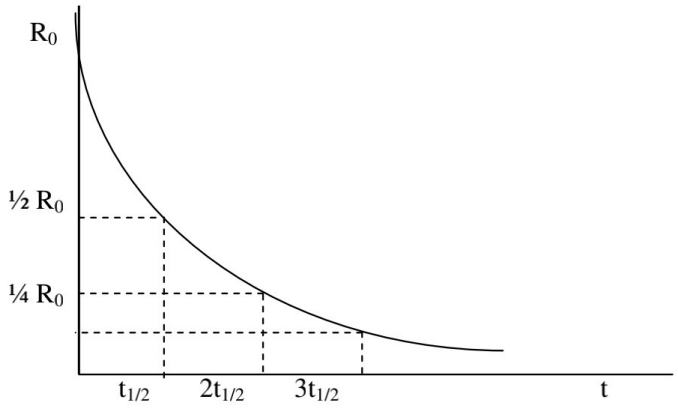
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الطويل فإنه يجب معرفة عدد النويات النشطة الموجودة في العينة في لحظة معين. ولما كان:

$$| dN / dt | = \lambda N$$

$$= A = R / C$$

حيث C عبارة عن ثابت يحدد نسبة عدد الجسيمات التي يسجلها العداد إلى عدد جميع الجسيمات الصادرة من العينة، R هو معدل العد فإنه بمعرفة معدل العد R والثابت C وعدد النوى النشطة في العينة N يمكن تحديد ثابت التفكك λ وبالتالي حساب عمر النصف للنظير المعين.



شكل (2-7)
العلاقة بين معدل العد R(t) والزمن t

أما بالنسبة للنظائر ذات العمر النصفي الصغير فتستخدم طرق أخرى لتحديد أعمارهم النصفية.

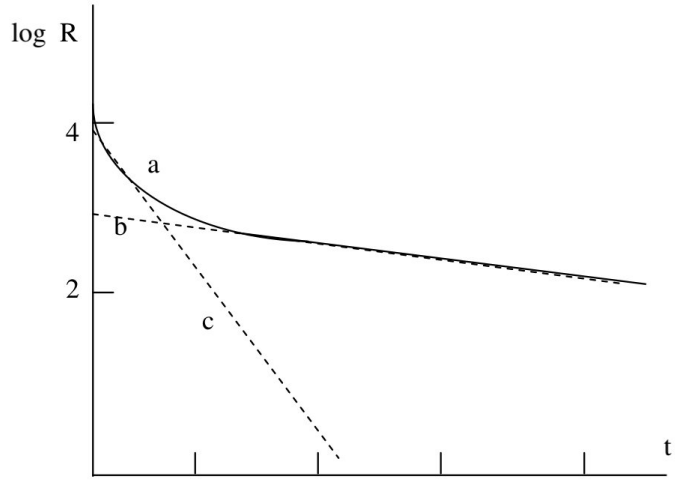
2-6-5 تحديد العمر النصفي للنظائر المختلطة

يحدث أحيانا أن تكون العينة غير نقية وتحتوي على خليط من بعض النظائر المشعة المختلطة. فإذا كان الخليط مكونا من عدد محدود من النظائر المشعة (اثنين أو ثلاثة على الأكثر) واختلفت الأعمار

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

النصفية لهذه النظائر اختلافا ملموسا، فإنه يمكن تحديد العمر النصـــفي لكل نظير في المخلوط حتىعندما تكون الجسيمات الصادرة من النظائر المختلفة من النوع نفسه.

ولإجراء ذلك، يجب قياس معدل العد R(t) للعينة كدالة من الزمن ورسم العلاقة بين log R والزمن t . ولغرض الإيضاح نفرض أن العينة تحتوي على خليط من نظيرين فقط، وأن المنحنى المستمر a في الشـــكل (2–8) يحدد العلاقة بين log R ، t .



شكل(2–8)
العلاقة بين لوغاريتم معدل العد log R والزمن t
لعينة تحتوي على خليط من نظيرين فقط

ويلاحظ أن الجزء الأيمن من المنحنى في الشكل (2–8) يمثـــل خطا مستقيما وهو بمثابة خط التفكك بالنسبة للنظير ذي العمر النصـــفي الأكبر، حيث إن النظير الآخر أسرع تفككا لصغر عمره النصفي. وعند مد الجزء المستقيم من المنحنى a إلى اليسار نحصل علـــى المســـتقيم b الذي يمثل التفكك بالنسبة للنظير الأطول عمرا. وبطرح المستقيم b مـــن

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

المنحنى a نحصل على مستقيم آخر هو c الذي يعتبر بمثابة مستقيم التفكك للنظير الأقصر عمرا. وبتحديد الميل لكل مستقيم من هذين المستقيمين يمكن تحديد ثابت التفكك λ_1 ، λ_2 لكل نظير على حدة.

2-6-6 التفكك الإشعاعي المتتابع

The successive radioactive decay

عند تفكك النواة الأم إلى نواة وليدة فإنه قد تكون النواة الوليدة نشطة إشعاعيا. عندئذ تتفكك النواة الوليدة إلى ان نواة تعرف باسم الحفيدة (grand-daghter). وهكذا، تستمر العملية إلى تصل في النهاية إلى نواة مستقرة. وتعرف هذه العملية بالتفكك الإشعاعي المتتابع .

فعلى سبيل المثال تتفكك نواة الراديوم 226(عمرها النصفي 1.6×10^3 سنة) إلى الرادون 222. وتتفكك هذه الأخيرة (عمرها النصفي 3.82 يوم) إلى نواة البولونيوم 218، التي تعتبر هي الأخرى مشعة (عمرها النصفي 3.05 دقيقة). وهكذا تستمر العملية إلى أن تصل في النهاية إلى نواة الرصاص 206 المستقرة.

والغرض من دراسة التفكك المتتابع هو معرفة عدد الذرات (النوى) في كل عضو من أعضاء هذه السلسلة.

فإذارمزنا لعدد ذرات النويدة الأم عند الزمن t بالرمز N_1 وثابت التفكك لها بالرمز λ_1 ، وعدد ذرات النويدة الوليدة N_2 التي يعتبر بدورها نشطة وثابت التفكك لها هو λ_2 ، وعدد ذرات النويدة الحفيدة N_3 واعتبارها مستقرة، وإذا فرضنا أنه عند اللحظة $t = 0$ كان عدد ذرات كل جيل هو:

$$N_1 = N_{10} , \qquad N_2 = 0 , \qquad N_3 = 0$$

أي أنه عند تحضير العينة كانت كلها من ذرات النويدة الأم، وباستخدام العلاقة (2-11)، والأخذ في الحسبان أن معدل تفكك النويدة الأم يساوي تماما معدل تكوين النويدة الوليدة، وأن معدل تفكك النويدة

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الوليدة مساو لمعدل تكوين النويدة الحفيدة، فإنه يمكن التعبير عن العملية كلها بالمعادلات الثلاث التالية:

$$d N_1 / d t = - \lambda_1 N_1 \qquad (2\text{-}17)$$

$$d N_2 / d t = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}18)$$

$$d N_3 / d t = \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}19)$$

وتحدد العلاقة (2–17) معدل التفكك بالنسبة للنويدة الأم وذلك طبقا للقانون الأساسي للتفكك الإشعاعي. وأما العلاقة (2–18) فتعني أن النويدة الوليدة تتكون بمعدل $N_1 \lambda_1$. في حين أن العلاقة (2–19) تحدد معدل تكوين الذرات الحفيدة المستقرة N_3.

وبحل مجموعة المعادلات (2–17)، (2–18)، (2–19) فإنه يمكن تحديد عدد ذرات كل نوع من الأعضاء الثلاثة للسلسلة كدالة من الزمن t، وذلك كالآتي:

$$N_1 = N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} (e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t}) \qquad (2\text{-}20)$$

$$N_3 = N_{10} [1 + \{\lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1)\}] e^{-\lambda 2 t} - \{\lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1)\} e^{-\lambda 1 t}] \qquad (2\text{-}21)$$

وهذه العلاقة صحيحة إذا كان $N_{20} = N_{30} = 0$ عند لحظةالصفر. أما إذا اختلف كل من N_{20} ، N_{30} عن الصفر فيصبح عدد الذرات الوليدة والحفيدة كدالة من الزمن هو:

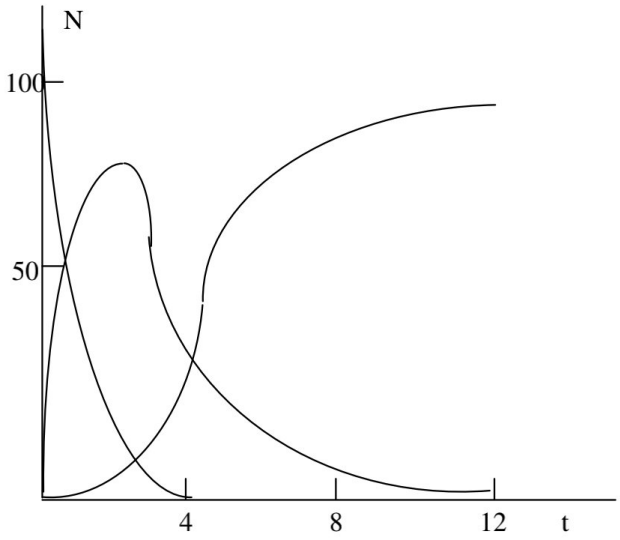
$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} (e^{-\lambda 1 t} - e^{-\lambda 2 t}) + N_{20} e^{-\lambda 2 t} \qquad (2\text{-}22)$$

$$N_3 = N_{30} + N_{20} (1 - e^{-\lambda 2 t}) + N_{10} [1 + \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} e^{-\lambda 2 t} - \{ \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} e^{-\lambda 1 t}] \qquad (2\text{-}23)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ويوضح شكل (2–9) كيفية تغير كل من N_1 ، N_2 ، N_3 كدالة من الزمن للتفكك المتتابع لنظير الروثينيوم 105، حيث يتفكك إلى الروديوم 105، وهذا الأخير يتفكك بدوره إلى البلاديوم 105 المستقر.

$$^{105}_{44}Ru \xrightarrow[t_{1/2} = 4.5\ h]{\beta^-} {}^{105}_{45}Rh \xrightarrow[t_{1/2} = 35\ h]{\beta^-} {}^{105}_{46}Pd$$



شكل (2–9)

تغير كل من عدد الذرات N_1 ، N_2 ، N_3 مع الزمن t
لنظير الروثينيوم 105

ويعبر المحور الرأسي عن عدد النوى الأم والوليدة والحفيدة عندما يكون عدد النوى الأم $N_{10}=100$، $N_{20} = N_{30} = 0$ ، في حين يعبر المحور الأفقي عن الزمن بالساعة. ويلاحظ أن N_1 يتناقص أسيا طبقا

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

لقانون التفكك الإشعاعي. أما N_2 فيكون صفرا عند $t = 0$ ثم يزداد طبقا للعلاقة (2-20) إلى أن يصل إلى أقصى قيمة عند زمن يساوي تقريبا ثلاثة أضعاف العمر النصفي ثم ينخفض من جديد.

أما بالنسبة للنوى الحفيدة N_3 فتكون أولا مساوية للصفر ثم تزداد ببطء كبير ولا تقترب من نهايتها (أي 100%) إلا بعد انقضاء زمن طويل (حوالي 5 أضعاف العمر النصفي للنظير الوليد).

2-6-7 التوازن الإشعاعي Radioactive equilibrium

عموما، فإن التوازن بالنسبة لأي كمية فيزيائية يعني أن هذه الكمية لا تتغير بالنسبة للزمن.

فإذا طبقنا هذا التعريف على جميع أعضاء سلسلة التفكك المتتابع فإن هذا يعني عدم تغير كل من N_1 ، N_2 ، N_3 بالنسبة للزمن، أي أن:

$$dN_1/dt = dN_2/dt = dN_3/dt \qquad (2\text{-}24)$$

وبذلك فإن شروط التوازن للتفكك المتتابع هي:

$$dN_1/dt = -\lambda_1 N_1 = 0 \qquad (2\text{-}25)$$

$$dN_2/dt = 0 = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

أي أن

$$\lambda_1 N_1 = \lambda \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}26)$$

وعموما، لا يمكن أن يحدث التوازن بمعناه الحرفي لأن هذا يعني بالنسبة للنواة الأم المشعة أن $\lambda \lambda_1 = 0$ (حيث N_1 لا تساوي صفرا). وهذا يعني أن النواة غير نشطة إشعاعيا وهو ما يتعارض مع النشاط الإشعاعي للنواة.

التوازن الأبدي The secular equilibrium

يمكن أن تتحقق حالات هي أقرب ما يمكن إلى التوازن. وتحدث هذه الحالات عندما تكون λ_1 صغيرة جدا وتقترب من الصفر (أي أن

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

العمر النصفي للنظير الأم كبيرجدا) في حين أن $\lambda_2 > \lambda_1$. عندئذ يسمى هذا النوع من التوازن بالتوازن الأبدي. وعندما يتحقق هذا النـــوع مـــن التوازن، فإنه بالتعويض عن λ_1 بقيم صغيرة في العلاقة (2–20)، تتخذ هذه العلاقة الشكل التالي:

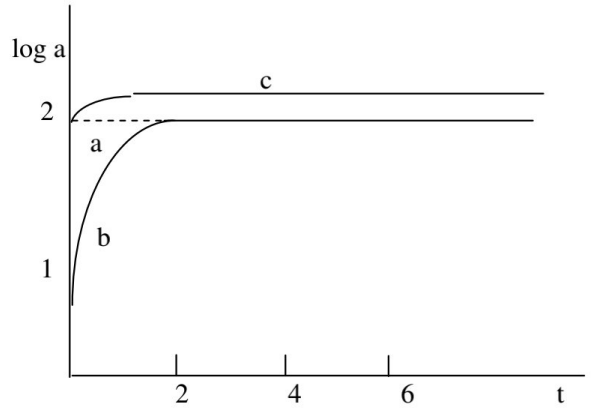
$$N_2 \cong (\lambda_1 / \lambda_2)\, N_{10}\, (1 - e^{-\lambda 2\, t})$$

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10}\, (1 - e^{-\lambda 2\, t}) \qquad (2\text{-}27)$$

وتبين العلاقة(2–27) أنه بزيادة الزمن t يقترب الحد $e^{-\lambda\, 2t}$ من الصفر، وبالتالي نجد أن:

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_{10} \qquad (2\text{-}28)$$

أي أنه يتحقق التوازن الأبدي حيث تصبح الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة مساوية تماما للشدة الإشعاعية للنوى الأم. ويعكس شكل (2–10) صورة التوازن الأبدي حيث يبين الخط a الشدة الإشعاعية للنـــوى الأم وهي ثابتة وتساوي $\lambda_1 N_{10}$ (حيث إن العمر النصفي كبير جدا). أمـــا الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة (المنحنى b) فهي تزداد بمرور الوقـــت إلى أن تصل لنفس القيمة الثابتة وهي $\lambda_1 N_1$. ويبين المنحنى c الشـــدة الإشعاعية الكلية لكلا النظيرين المتتابعين.



الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

شكل (2–10): التوازن الأبدي

ويمكن استخدام التوازن الأبدي لقياس ثابت التفكك λ_1 للنظائر ذات العمر النصفي الكبير وذلك باستخدام العلاقة (2–28). ولهذا الغرض، يجب معرفة ثابت التفكك λ_2 للنظير الوليد ذي العمر النصفي الصغير، وعدد ذرات النظير الأم ونسبة وجود النوى (الذرات) الأم مع النوى الوليدة بعد حدوث التوازن وبذلك يسهل تحديد قيمة λ.

مثال:

ملح من أملاح اليورانيوم 238 وجد أنه يحتوي على نسبة ضئيلة جدا من الراديوم 226 وهذا الراديوم يتكون نتيجة للتفكك المتتابع لليورانيوم 238. فإذا كانت هذه النسبة هي عبارة عن ذرة واحد لكل 2.8×10^6 ذرة يورانيوم، وإذا علمت أن العمر النصفي للراديوم هو 1620 سنة فما هو العمر النصفي لليورانيوم.

الحل:

من قانون الاتزان الأبدي:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2$$

أي أن:

$$N_1 / N_2 = \lambda_2 / \lambda_1 = t_1 / t_2$$

حيث ، يرمزان للعمر النصفي لليورانيوم والراديوم بالترتيب، وبالتعويض في طرفي العلاقة الأخيرة فإن:

$$2.8 \times 10^6 \times 1620 = 1 \times t_1$$

أي أن:

$$t_1 = 4.54 \times 10^9 \text{ years}$$

التوازن الانتقالي **The transient equilibrium**

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

يوجد نوع آخر من التوازن يعرف باسم التوازن الانتقالي (transient equilibrium). ويحدث هذا النوع من التوازن عندما يكون ثابت التفكك λ_1 للنظير الأم أصغر من ثابت التفكك λ_2 للنظير الوليد (أي أن $\lambda_2 > \lambda_1$) ولكن λ_1 ليست قريبة من الصفر (أي أن العمر النصفي للنظير الأم ليس كبيرا). في هذه الحالة لا يمكن اعتبار أن $\lambda_1 = 0$. ومع ذلك فإن الحد الأسي $e^{-\lambda_2 t}$ يقترب من الصفر أسرع من الحد $e^{-\lambda_1 t}$. لذلك، فإنه بعد مرور زمن كاف يحدث التوازن الانتقالي وتتخذ العلاقة (2–20) الشكل التالي:

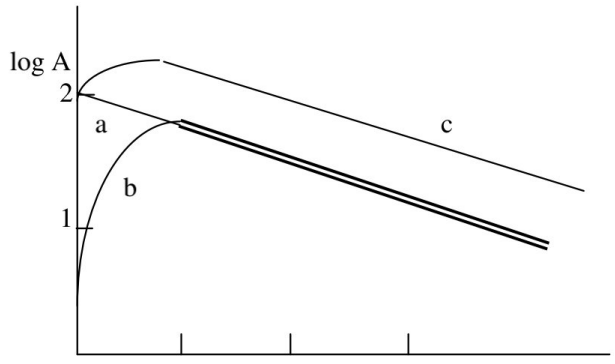
$$N_2 = \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_{10} e^{-\lambda_1 t}$$

$$= \{ \lambda_1 / (\lambda_2 - \lambda_1) \} N_1 \qquad (2\text{-}29)$$

وهذا يعني أن النوى الوليدة تتفكك بنفس معدل تفكك النوى الأم. وبذلك، تكون النسبة بين الشدة الإشعاعية A لكل من النوى الأم والنوى الوليدة هي:

$$A_1 / A_2 = \lambda_1 N_1 / \lambda_2 N_2 = (\lambda_2 - \lambda_1) / \lambda_2 \qquad (2\text{-}30)$$

وتبين هذه العلاقة أن الشدة الإشعاعية للنوى الوليدة تصبح بعد فترة زمنية معينة أكبر من الشدة الإشعاعية للنوى الأم. وهذا ما يوضحه شكل (2–11) الذي يبين الشدة الإشعاعية لكل من النوى الأم والنوى الوليدة كدالة في الزمن t إذا كان عدد النوى الوليدة عند $t = 0$ مساويا للصفر.



الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

2 4 6 t

شكل (2–11): التوازن الانتقالي

2–7 السلاسل الإشعاعية الطبيعية

The natural radioactive series

تتميز نوى جميع النظائر ذات العدد الذري الأكبر من 82 بأنها جميعا غير مستقرة إشعاعيا، وذلك بسبب زيادة عدد البروتونات في النواة مما يجعل قوى التنافر الكهروستاتيكية كبيرة. ويؤدي هذا بدوره إلى تفكك بعض تلك النظائر من خلال تفكك ألفا وإصدار جسيمات ألفا. ونتيجة لإصدار هذه الجسيمات تزداد نسبة النيوترونات إلى البروتونات في النواة مما يؤدي إلى استيفاء شروط تفكك بيتا في بعض هذه النوى الوليدة وحدوث هذا التفكك مع إصدار الإلكترونات (جسيمات بيتا). وتوجد في الطبيعة ثلاث مجموعات تعرف بسلاسل الإشعاع الطبيعية وهي سلسلة الثوريوم ^{232}Th ، وسلسلة اليورانيوم – راديوم ، وسلسلة الأكتينيوم. وكانت هناك مجموعة رابعة هي سلسلة النبتونيوم، وهي لا توجد في الطبيعة الآن نظرا لأن العمر النصفي لأطول عناصرها عمرا هو 2.2×10^{6} سنة ، وهو أقل بكثير من عمر الأرض، الذي يقدر بحوالي 3×10^{9} سنة. ويبين جدول (2–1) أهم خصائص هذه السلاسل، والمعروفة أحيانا باسم سلاسل التفكك للعناصر الثقيلة .

جدول(2–1): السلاسل الإشعاعية الطبيعية

اسم السلسلة	النواة النهائية المستقرة للمجموعة	النواة الأطول عمرا للسلسلة وعمرها النصفي بالسنوات
الثوريوم	الرصاص–208	الثوريوم–232، 1.39×10^{10}
اليورانيوم – راديوم	الرصاص–206	اليورانيوم–238، 1.47×10^{9}
الأكتينيوم	الرصاص–207	اليورانيوم–235، 8.12×10^{8}
النبتونيوم		

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

	بسموت–209	النيتونيوم–237، 2.2×10^{6}

وبالإضافة للسلاسل الإشعاعية الطبيعية توجد في الطبيعة بعض النظائر المشعة الأخرى مثل البوتاسيوم $^{40}_{19}K$ والساماريوم $^{147}_{62}Sm$ وغيرها. وتتميز هذه النظائر بأنها جميعا نشطة بالنسبة لإصدار جسيمات بيتا(إلكترونات)، وأعمارها كبيرة جدا (أكثر من 10^{9} سنة).

8-2 النشاط الإشعاعي المستحث The induced radioactivity

بالإضافة إلى النظائر المشعة الطبيعية تمكن العلماء من إنتاج ما يزيد على ألف وثلاثمائة نظير مشع اصطناعي. وتنتج هذه النظائر الأخيرة عن طريق قذف النظائر المستقرة بأنواع مختلفة من الجسيمات النووية مثل جسيمات ألفا والبروتونات والنيوترونات وإشعاعات جاما. وتستخدم لهذا الغرض المفاعلات النووية كمصدر للنيوترونات أو معجلات الأيونات كمصدر للجسيمات المشحونة مثل جسيمات ألفا أو البروتونات أو حتى الأيونات الثقيلة، وكذلك كمصدر لإشعاعات جاما.

فمثلا لإنتاج الكوبلت 60 وهو نظير نشط له استخدامات عديدة في مجالات مختلفة تحضر عينة من الكوبلت 59 المستقرة، ويتم تشعيع هذه العينة بالنيوترونات داخل مفاعل نووي. وعند قذف نواة الكوبلت 59 المستقر بالنيوترون تتكون نواة الكوبلت 60 ،ويصدر هذا التفاعل في نفس لحظة التفاعل فوتون جاما وفقا للتفاعل.

$$^{59}_{27}Co + n \longrightarrow {}^{60}_{27}Co + \gamma\gamma$$

ويعرف هذا التفاعل بتفاعل الأسر النيوتروني الإشعاعي (neutron radioactive capture)، حيث يتم أسر النيوترون وتتكون بذلك نواة نظير جديد مع صدور فوتون جاما عن هذا الأسر في الحال. والكوبلت 60 المتكون نظير مشع، وعمره النصفي 5.27 سنة، ويتفكك إلى النيكل 60 مصدرا جسيم بيتا السالب، أي:

$$^{60}_{27}Co \longrightarrow {}^{60}_{28}Ni + \beta^{-} + \nu'$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ويمكن في الوقت الحالي، إنتاج المئات من النظائر المشعة الاصطناعية بهذا الأسلوب. كما يستخدم نفس الأسلوب للحصول على عناصر جديدة أثقل من اليورانيوم، وهي المعروفة باسم عناصر ما وراء اليورانيوم (Trans- uranium elements). وهذه العناصر غير موجودة في الطبيعة نظرا لأن عمرها النصفي صغير.

فمثلا عند وجود نظير اليورانيوم 238 داخل المفاعل النووي يمكن أن تأسر نواة اليورانيوم نيوترونا، فيتكون بذلك اليورانيوم 239 وهو نظير مشع يتفكك مع إصدار جسيم بيتا مكونا عنصرا جديدا هو النبتونيوم 239، وذلك كالآتي:

$$^{238}_{92}U + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{239}_{92}U + \gamma$$

$$^{239}_{92}U \longrightarrow {}^{239}_{93}Np + \beta^{-} + \nu'$$

والنبتونيوم بدوره نظير مشع ويتفكك مصدرا جسيم بيتا ومكونا بذلك عنصرا جديدا هو البلوتونيوم 239

$$^{239}_{93}Np \longrightarrow {}^{239}_{94}Pu + \beta^{-} + \nu'$$

لذا ينتج نظير البلوتونيوم داخل المفاعلات بكميات كبيرة ويستخدم هذا النظير في إنتاج الطاقة وفي الأسلحة النووية. وعموما، فإنه يتم إنتاج العديد من العناصر الثقيلة كالأميريشيوم $_{95}Am$ (نسبة إلى أمريكا) والكوريوم $_{96}Cm$ (نسبة إلى السيدة ماري كوري) . والبيركيليوم $_{97}Bk$ (نسبة إلى مختبر بيركلي) والكالفورنيوم $_{98}Cf$ والأينشتينيوم $_{99}Es$ والفيرميوم $_{100}Fm$ (نسبة للعالم فيرمي) وغيرها بهذا الأسلوب نفسه.

وتجدر الإشارة إلى أن النظائر المصنعة باستخدام التشعيع النيوتروني تتفكك مصدرة الإلكترونات وذلك لزيادة نسبة النيوترونات على البروتونات.

وبالإضافة لاستخدام التشعيع النيوتروني في إنتاج النظائر المشعة فإنه يمكن إنتاج العديد من النظائر المشعة باستخدام الجسيمات المشحونة كالبروتونات وجسيمات ألفا والأيونات الثقيلة. ولهذا الغرض تعجل هذه

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الجسيمات المشحونة بواسطة المعجلات النووية حتى طاقات مناسبة ثم تقذف بها النظائر المستقرة فتتكون بذلك النظائر المشعة . وتبين المعادلات التالية أمثلة لإنتاج بعض النظائر المشعة باستخدام الجسيمات المشحونة.

$$^{31}_{15}P + {}^{2}_{1}d \longrightarrow {}^{32}_{15}P + p$$

أي أنه عند قذف الفسفور 31 المستقر بالديوترون (نظير الهيدروجين) يتكون الفسفور 32 المشع وينطلق بروتون. كذلك، يمكن إنتاج الفلور 17 المشع كالتالي:

$$^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{17}_{9}F + {}^{1}_{0}n$$

ويعني هذا التفاعل الأخير أنه عند قذف النيتروجين 14 المستقر بجسيمات ألفا α يتكون الفلور 17 المشع وينطلق نيوترون. كذلك، فإنه عند قذف اليورانيوم 238 بأيون ثقيل مثل أيون الأكسجين يتكون نظير الفرميوم 250 وتخرج أربعة نيوترونات.

$$^{238}_{92}U + {}^{16}_{8}O \longrightarrow {}^{250}_{100}Fm + 4\,n$$

وعموما تستخدم تفاعلات الأيونات الثقيلة بكثرة للحصول على عناصر ما وراء اليورانيوم.

وتجدر الإشارة إلى أن إنتاج النظائر المشعة بقذفها بالنيوترونات أو الجسيمات المشحونة يتطلب وجود سيال (تيار) عال من هذه الجسيمات نظرا لأن احتمال حدوث التفاعل المعين يكون عادة صغير جدا. لذلك، يجب أن تكون كثافة التدفق النيوتروني في حدود 10^{12} حتى 10^{16} نيوترون لكل سم^2 في الثانية، تبعا لاحتمال حدوث الأسر النيوتروني في النظير المعين. وتحقق جميع المفاعلات النووية هذا المطلب. أما المعجلات فيكون عادة سيالها أقل. ويعرف احتمال حدوث التفاعل المعين بالمقطع العرضي (cross-section) وهو عبارة عن احتمال حدوث التفاعل لو قذف جسيم واحد على نواة واحدة موجودة في مساحة

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

مقدارها ا سم^2. ووحدة المقطع العرضي هي البارن (barn) ، وهي وحدة صغيرة تعادل مساحة مقدارها 10^{-24} سم^2 ، أي أن:

(1 بارن = 10^{-24} سم^2)

2-8-1 حساب عدد النوى المشعة المستحثة بالتشعيع

عند إنتاج النظائر المشعة بالتشعيع في مفاعل ما فإنه يجب معرفة الشدة الإشعاعية للعينة بعد التشعيع. فبعد بدء التشعيع يتراكم عدد النوى المستحثة وتبدأ بدورها في التفكك. ويكون هناك معدلان، الأول عبارة عن معدل تكوين النوى المشعة والآخر هو معدا تفككها.

وطبقا للمعادلة(2-18) فإن تغير النوى المستحثة هو:

$$dN_2/dt = \lambda\lambda_1 N_1 - \lambda\lambda_2 N_2$$

حيث $\lambda\lambda_1 N_1$ هو عبارة عن معدل التكوين عن طريق التشعيع، $\lambda\lambda_2 N_2$ هو معدل التفكك. وحيث إن تكوين الذرات المشعة لم ينتج عن تفكك الذرة الأم ولكن ينتج عن تشعيع ذرات مستقرة فإنه يجب التعبير عن $\lambda\lambda_1 N_1$ بأسلوب آخر. ومن المعروف أن عدد الذرات النشطة N التي تتكون في الثانية بالتشعيع سوف تتناسب تناسبا طرديا مع عدد الذرات المستقرة في العينة N_{10} ومع كثافة النيترونات n (عدد النيوترونات في وحدة الحجم) ومقدار المقطع العرضي σ للأسر النيوتروني وكذلك مع سرعة النيوترونات vv ،أي أن:

$$\lambda_1 N_1 = N = n\, v\, v\sigma\, N_{10} \qquad (2\text{-}31)$$

وبالتعويض عن $\lambda\lambda_1 N_1$ بقيمتها في العلاقة السابقة، نجد أن:

$$dN_2/dt = n\, v\, \sigma\, N_{10} - \lambda_2 N_2 \qquad (2\text{-}32)$$

وبحل هذه المعادلة التفاضلية بالنسبة للعدد N_2 ، نجد أن:

$$N_2 = [\, n\, v\, \sigma\, N_{10} / \lambda\,]\, (1 - e^{-\lambda\lambda_2 t}) \qquad (2\text{-}33)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ويعرف الحد المحصور بين القوسين الدائريين باسم معامل نمو العينة.
فإذا كان زمن التشعيع أصغر من العمر النصفي $t_{1/2}$ نجد أن:

$$(1- e^{- \lambda 2t}) \approx \lambda_2 t$$

وعندئذ تأخذ العلاقة (2−33) الشكل التالي:

$$N_2 = n v \sigma v N_{10} t$$

أما إذا استمر التشعيع لمدة طويلة (ثلاثة أضعاف العمر النصفي فأكثر) فإننا نجد أن:

$$(1- e^{- \lambda 2t}) = 1$$

عندئذ تأخذ العلاقة (2−33) الشكل التالي:

$$N_2 = n v \sigma N_{10} / \lambda_2 \qquad (2\text{-}35)$$

أي أن عدد النوى المشعة في العينة يصبح ثابتا ولا يزداد العدد مهما زاد زمن التشعيع ويقال إن العينة وصلت إلى حالة التشبع. وبمعنى آخر يكون قد تحقق التوازن الأبدي. لذا، فإنه لا جدوى بعد ذلك من استمرار التشعيع لأن عدد النوى المستحثة يكون مساويا تماما لعدد النوى المتفككة. ولزيادة الشدة الإشعاعية للعينة يجب زيادة عدد الذرات المستقرة N_{10} قبل التشعيع أو زيادة كثافة النيوترونات n (أي وضع العينة في مكان تكون كثافة النيوترونات فيه أعلى).

2−9 وحدات قياس النشاط الإشعاعي Units of radioactivity

كانت الوحدة الأساسية لقياس الشدة الإشعاعية للعينة هي الكوري Courie (Ci) وأجزاؤه وهي المللي كوري (mCi) والميكروكوري(μμ Ci) وقد ارتبط الكوري تاريخيا بأنه الشدة الإشعاعية (عدد التفككات في الثانية الواحدة) لجرام واحد من الراديوم 226. وبعد معايرة الشدة الإشعاعية لجرام الراديوم وجدت أنها مساوية 3.7×10^{10} تفكك في الثانية. بذلك أصبح تعريف الكوري وأجزائه هو:

كوري واحد 1Ci = 3.7×10^{10} تفكك في الثانية

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

مللي كوري 1mCi = 3.7 x 10^{7} تفكك في الثانية
ميكروكوري 1μμCi = 3.7 x 10^{4} تفكك في الثانية

وينتج عن التفكك الواحد، عادة، جسيم مشحون (بيتا أو ألفا) ويصاحب ذلك في معظم الحالات وليس في كلها إصدار إشعاع أو إشعاعات جاما.

والوحدة المعيارية الدولية الآن للشدة الإشعاعية هي البكرل (Becquerel) . والبكرل عبارة عن تفكك واحد في الثانية. وبمقارنة البيكريل بالكوري نجد أنه وحدة صغير جدا. لذا، تستخدم مضاعفات البكرل وهي الكيلوبكرل والميغابكرل والغيغابكرل والتيرابكرل وقيمها كالتالي:

بيكريل واحد 1Bq = 1 تفكك في الثانية
كيلوبيكريل 1 K Bq = 10^{3} تفكك في الثانية
ميغابيكريل 1 M Bq = 10^{6} تفكك في الثانية
غيغابيكريل 1 G Bq = 10^{9} تفكك في الثانية
تيرابيكريل 1 T Bq = 10^{12} تفكك في الثانية

وهناك وحدة ثالثة للنشاط الإشعاعي ولكنها نادرة الاستخدام وهي راذرفورد (rd) Rutherford وهي عبارة عن 10^{6} تفكك في الثانية وأجزاء الراذرفورد هي المللي والميكرو وغيرها.

10-2 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- باستخدام جداول الكتل الذرية مع إهمال طاقة الربط للإلكترونات المدارية حدد أسلوب تفكك النظائر التالية:

$^{225}_{88}Ra$, $^{228}_{88}Ra$, $^{230}_{89}Ac$, $^{234}_{92}U$, $^{234}_{90}Th$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الفصل الثالث

تفاعل الإشعاعات المتبادل مع المادة
Interaction of radiation with matter

مقدمة – التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة الثقيلة والمادة – التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة – التفاعل المتبادل بين إشعاعات جاما والمادة – التفاعل المتبادل بين النيوترونات والمادة – أسئلة ومسائل.

3-1 مقدمة

يتعرض هذا الفصل للتفاعل المتبادل بين الإشعاعات والمادة. والمقصود بكلمة الإشعاعات هنا هو جميع أنواع الإشعاعات كالجسيمات المشحونة الثقيلة (جسيمات ألفا والديوترونات والبروتونات)، والجسيمات المشحونة الخفيفة كالإلكترونات والبوزيترونات، وإشعاعات جاما والأشعة السينية، والنيوترونات. ولا يتعرض هذا الفصل للتفاعلات النووية التي قد تحدثها الإشعاعات في المادة ولكنه يقتصر على دراسة التأثير الجهري (الماكروسكوبي) المتبادل بين الإشعاعات والمادة مثل امتصاص الإشعاعات في المادة أو اختراقها لها. ونظرا لاختلاف هذه التأثير باختلاف نوع الإشعاعات واختلاف طاقاتها فسوف يدرس التأثير كل نوع على حدة.

3-2 التفاعل المتبادل بين الجسيمات المشحونة والمادة
Interaction of heavy charged particles with matter

3-2-1 انتقال الطاقة بين الجسيمات للمادة The energy transfer

عند سقوط الجسيمات المشحونة الثقيلة، كجسيمات ألفا والديوترونات والبروتونات وغيرها، على المادة تنتقل طاقة هذه

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الجسيمات إلى المادة بالتدريج إلى أن تتوقف الجسيمات الساقطة. ويتم هذا الانتقال أساسا عن طريق التصادمات غير المرنة (inelastic collision) مع إلكترونات ذرات المادة التي تمر خلالها الجسيمات. وينتج عن هذه التصادمات بين الجسيمات المشحونة الساقطة والإلكترونات إثارة لهذه الذرات (أي انتقال أحد إلكترونات الذرة من مداره إلى مدار آخر ذي طاقة أعلى) أو تأينها (أي انفصال إلكترون عن ذرته تماما). وهكذا يحدث تأين ابتدائي لذرات المادة وهو ذلك التأين الناتج عن الجسيمات الثقيلة ذاتها. ويمثل هذا التأين الابتدائي حوالي 30 % من إجمالي التأين الناتج عن توقف الجسيم المشحون في المادة. وأما النسبة الباقية وهي حوالي 70 % من إجمالي التأين فتعرف بالتأين الثانوي، وهو ناتج عن إلكترونات التأين الابتدائي التي تنطلق بسرعات عالية نسبيا، فتؤدي بدورها إلى تأين المادة . وتسمى الإلكترونات الثانوية باسم إلكترونات دلتا (δ- electrons) .

وهكذا، تفقد الجسيمات المشحونة الثقيلة طاقتها بالتدريج مع تغلغلها داخل المادة وتقل بالتالي سرعاتها إلى أن تصبح قريبة من سرعة إلكترونات المدار K لذرة الجسيم الساقط، فيحدث عندئذ تبادل بين الإلكترونات المدارية لذرات المادة وإلكترونات التأين الناتجة عن الجسيم الساقط. وقد يصل عدد هذه التبادلات إلى 10^3 مرة قبل أن يتحول الجسيم الساقط إلى ذرة متعادلة.

وهكذا، يتكون نتيجة لتأين الذرة الواحدة زوج إلكتروني– أيوني. ويمكن قياس العدد الكلي n للأزواج الإلكترونية – الأيونية الناتجة عن كل من التأين الابتدائي والثانوي، وذلك باستخدام الطرق التجريبية المختلفة. وبمعرفة كل من طاقة الجسيمات المشحونة الساقطة E وعدد الأزواج n فإنه يمكن حساب القيمة المتوسطة $\bar{W}$ للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني – أيوني واحد من العلاقة التالية:

$$\bar{W} = E / n \qquad (3\text{-}1)$$

ولقد وجد أن قيمة $\bar{W}$ اللازمة لتكوين زوج واحد تعتمد اعتمادا واضحا على نوع المادة ولكنها لا تعتمد على طاقة الجسيمات الساقطة أو

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

على طبيعة هذه الجسيمات. كما وجد أن قيمة W تكون صغيرة جدا فهي تساوي 35 إلكترون فولت بالنسبة للهواء في الظروف المعيارية من الضغط ودرجة الحرارة. وهذا يعني أن الجسيمات الساقطة تتعرض لعدد كبير للغاية من التصادمات قبل أن تتوقف. وعند فقد هذه الكمية الصغيرة من الطاقة في كل تصادم فإن الجسيمات الساقطة لا تغير اتجاه مسارها، وهذا هو السبب في أن أثر (the track) الجسيمات المشحونة الثقيلة في المادة يكون عبارة عن خط مستقيم. كذلك، يلاحظ أن طول الأثر للجسيمات المشحونة الثقيلة يعتمد على طاقة هذه الجسيمات ونوعها ونوع المادة. وبالنسبة للنوع نفسه من الجسيمات والمادة تكون أطول آثار الجسيمات المشحونة الثقيلة واحدة تقريبا طالما كانت طاقاتها واحدة.

وتجدر الإشارة إلى أن الجسيمات المشحونة الساقطة تتفاعل مع نوى المادة التي تمر خلالها. إلا أن هذا التفاعل يعتبر مهملا كوسيلة من وسائل فقد الطاقة حيث أن احتمال التصادم مع النوى أقل بكثير جدا من احتمال التصادم مع الإلكترونات.

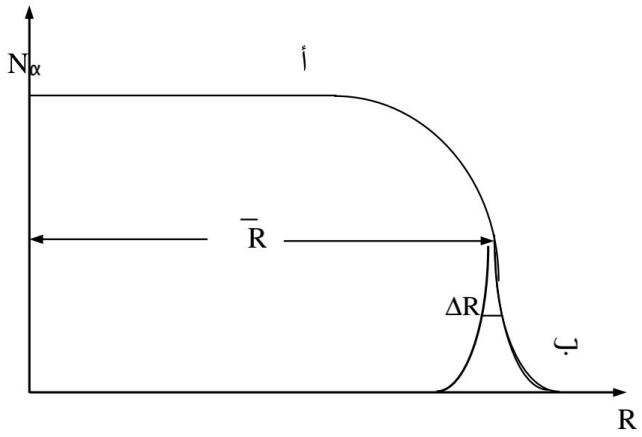
3-2-2 مدى الجسيمات المشحونة الثقيلة

Range of heavy charged particles

مدى الجسيم المشحون في مادة ما هو عبارة عن طول المسافة المستقيمة التي يقطعها الجسيم، في اتجاه سقوطه، في هذه المادة. ولما كان أثر الجسيم الثقيل عبارة عن خط مستقيم فإن مدى الجسيم الثقيل هو نفسه عبارة عن أثر هذا الجسيم في المادة. وقد ذكر في البند السابق أن طول الأثر للجسيمات المعينة يكون واحدا تقريبا طالما كانت طاقتها الابتدائية واحدة. ولكن يجب ملاحظة أن تصادم الجسيم الساقط مع الإلكترونات عملية إحصائية بحتة. فقد تختلف المسافة بين التصادمات، وبالتالي، يختلف طول الأثر اختلافا طفيفا، مما يؤدي إلى حدوث اختلاف طفيف في المدى للجسيمات من النوع نفسه وذوي الطاقة الواحدة. ويعرف هذا الاختلاف أو التراوح في مدى الجسيمات ذات الطاقة الواحدة بالتبعثر في المدى (straggling).

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

وعند قياس مدى جسيمات ألفا في الهواء (وذلك بقياس عدد جسيمات ألفا التي تسجل عند مسافات مختلفة من مصدر هذه الجسيمات، شريطة أن تكون جسيمات ألفا الخارجة من المصدر في شكل حزمة ضيقة ومتوازية)، تكون الصورة كالمبينة في شكل (3−1) بالمنحنى (أ). وبتفاضل هذا المنحنى ينتج منحنى جديد (ب) يعرف باسم المنحنى التفاضلي للتبعثر، وهو يوضح طبيعة التبعثر في المدى. ويسمى المقدار R المبين بالشكل بالمدى المتوسط (mearange). ويعتبر نصف العرض ΔR للمنحنى ب ، الذي يقاس ($1/e = 1/2.71$) من أقصى ارتفاع لهذا المنحنى وسيطا مهما لقياس قيمة التبعثر. فكلما زاد ΔR كان التبعثر في المدى كبيرا والعكس صحيح.



شكل(3−1)

أ− مدى جسيمات α في الهواء

ب− المنحنى التفاضلي للتبعثر

ولقياس مدى الجسيمات الثقيلة في الغازات أو الأجسام الصلبة فإنه يفضل تثبيت كل من المصدر والكاشف على مسافة مناسبة في حيز مفرغ من الهواء الجوي ثم يتم إدخال الغاز المعين بضغوط مختلفة،

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ويحسب عدد الجسيمات التي تسجل في الكاشف عند كل ضغط. ويــزاد الضغط حتى يتوقف الكاشف عن تسجيل الجسيمات. وترسم العلاقة بين معدل العد وضغط الغاز فنحصل على منحنى مشابها للمنحنــى (أ). ثــم تحول الضغوط المختلفة عند مسافة مسافة ثابتة إلى مسافات مختلفة عند ضغط ثابت مساو للظروف الطبيعية، فنحصل على علاقة بين معدل العد N والمسافة R كالمبينة في شكل (3-1). والسبب في اتباع ذلك الأسلوب هو المحافظة على قيمة زاوية رؤية الكاشف للمصدر ثابتة. أما بالنســبة للمواد الصلبة فيقاس المدى بعد تثبيت كل من المصدر والكاشف في حيز مفرغ ثم يوضع سُمك صغير من المادة أولا ويزداد السمك بالتدريج إلى أن يتوقف الكاشف تماما عن العد. ثم ترسم العلاقة بــين معــدل العــد والسمك المقابل للمادة.

3-2-3 التأين النوعي وقدرة الإيقاف

The specific ionization and the stopping power

التأين النوعي S The specific ionization

يعرف التأين النوعي S على أنــه عــدد الأزواج الإلكترونيــة – الأيونية المتكونة خلال ملليمتر واحد من الأثر في الهواء الجــوي عنــد درجة حرارة 15° مئوية وضغط مساو 760 مم زئبق. وتصل قيمــة S بالنسبة لجسيمات ألفا عدة آلاف زوج لكل ملليمتر من الأثر، وذلك عندما تكون طاقة جسيمات ألفا في حدود عدة ميغا إلكترون فولت.

وعند رسم العلاقة بين التأين النوعي S لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر هذا الجسيم نحصل على علاقة كالمبينة في شكل (3-2). ويبين هذا الشكل أن التأين النوعي يكون صغيرا عنــدما يكون جسيم ألفا في بداية الأثر أي عندما تكون طاقته مازلــت كبيــرة. ويزداد التأين النوعي بالتدريج إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له عنــدما يصبح جسيم ألفا في نهاية الأثر أي عندما تصبح طاقته صــغيرة جــدا. ويرجع السبب في ذلك إلى أن زمن تعرض إلكترونــات ذرات المــادة للمجال الكهربي للجسيم يصبح طويلا نسبيا عندما تنخفض سرعة هــذا

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

ويحسب عدد الجسيمات التي تسجل في الكاشف عند كل ضغط. ويــزاد الضغط حتى يتوقف الكاشف عن تسجيل الجسيمات. وترسم العلاقة بين معدل العد وضغط الغاز فنحصل على منحنى مشابها للمنحنــى (أ). ثــم تحول الضغوط المختلفة عند مسافة مسافة ثابتة إلى مسافات مختلفة عند ضغط ثابت مساو للظروف الطبيعية، فنحصل على علاقة بين معدل العد N والمسافة R كالمبينة في شكل (3-1). والسبب في اتباع ذلك الأسلوب هو المحافظة على قيمة زاوية رؤية الكاشف للمصدر ثابتة. أما بالنســبة للمواد الصلبة فيقاس المدى بعد تثبيت كل من المصدر والكاشف في حيز مفرغ ثم يوضع سُمك صغير من المادة أولا ويزداد السمك بالتدريج إلى أن يتوقف الكاشف تماما عن العد. ثم ترسم العلاقة بــين معــدل العــد والسمك المقابل للمادة.

3-2-3 التأين النوعي وقدرة الإيقاف

The specific ionization and the stopping power

التأين النوعي S The specific ionization

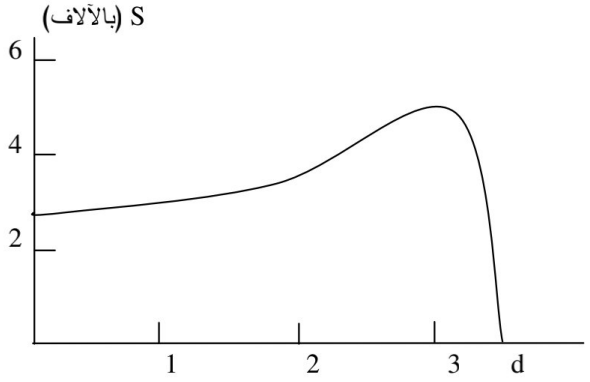
يعرف التأين النوعي S على أنــه عــدد الأزواج الإلكترونيــة – الأيونية المتكونة خلال ملليمتر واحد من الأثر في الهواء الجــوي عنــد درجة حرارة 15° مئوية وضغط مساو 760 مم زئبق. وتصل قيمــة S بالنسبة لجسيمات ألفا عدة آلاف زوج لكل ملليمتر من الأثر، وذلك عندما تكون طاقة جسيمات ألفا في حدود عدة ميغا إلكترون فولت.

وعند رسم العلاقة بين التأين النوعي S لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر هذا الجسيم نحصل على علاقة كالمبينة في شكل (3-2). ويبين هذا الشكل أن التأين النوعي يكون صغيرا عنــدما يكون جسيم ألفا في بداية الأثر أي عندما تكون طاقته مازلــت كبيــرة. ويزداد التأين النوعي بالتدريج إلى أن يصل إلى أقصى قيمة له عنــدما يصبح جسيم ألفا في نهاية الأثر أي عندما تصبح طاقته صــغيرة جــدا. ويرجع السبب في ذلك إلى أن زمن تعرض إلكترونــات ذرات المــادة للمجال الكهربي للجسيم يصبح طويلا نسبيا عندما تنخفض سرعة هــذا

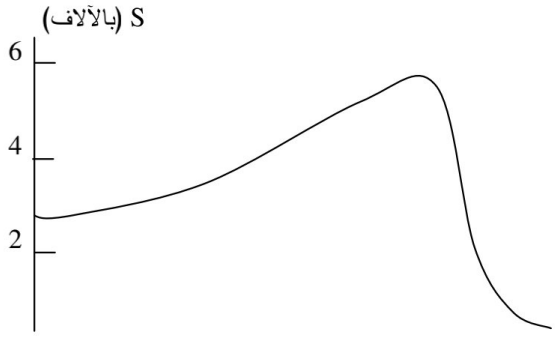
الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

الجسيم، أي عندما تقل طاقته. وزيادة زمن التعرض يؤدي بالتالي إلـــى زيادة احتمال التأين.

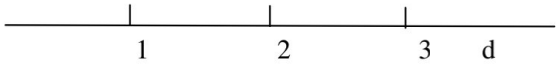
وعند رسم العلاقة بين التأين النـــوعي S وبـــين المســـافة مـــن المصدر بالنسبة لحزمة متوازية من جسيمات ألفا نحصل على منحنـــى كالمبين في شكل (3–3). وهذا المنحنى يختلف اختلافا طفيفا عن سابقه عند نهاية الأثر. ويرجع السبب في هذا الاختلاف إلى التبعثر. ويعـــرف هذا المنحني الأخير بمنحنى براغ (Bragg curve) للتأين النوعي.



شكل (3–2) :العلاقة بين التأين النوعي S لجسيم واحد من جسيمات ألفا وبين المسافة من مصدر الجسيم



الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner



شكل (3–3): منحنى براغ للتأين النوعي

قدرة الإيقاف The stopping power (- dE/dx)

هي عبارة عن معدل فقد الجسيم المعين ذي الطاقة المعينة لطاقته داخل المادة. والإشارة السالبة تعني فقد الطاقة كلما زادت مسافة التغلغل في المادة. وترتبط قدرة الإيقاف بالتأين النوعي S بالعلاقة التالية:

$$(- dE / dx) = \overline{W}. S \qquad (3\text{-}2)$$

حيث $\overline{W}$ هي القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني _ أيوني. ومن هذه العلاقة الأخيرة يمكن تعريف قدرة الإيقاف على أنها كمية الطاقة التي يفقدها الجسيم في ملليمتر واحد من الأثر. ولما كانت S تعتمد على طاقة الجسيم ونوعه، $\overline{W}$ تعتمد على نوع المادة، فإن قدرة الإيقاف تعتمد على كل من نوع الجسيم وطاقته ونوع المادة.

ولقد تمكن هانز بيتي (H.Bethe) من اشتقاق العلاقة النظرية لقدرة الإيقاف المتوسطة لكل 1 سم من المادة، وهي:

$$(-dE /dx) = (4\pi e^4 z^2 /m_0 v^2)\, ZN\, [\ln (2m_0 v / I)_v - \ln(1-v^2/c^2) - v^2 /c^2] \qquad (3\text{-}3)$$

حيث z ، v هما شحنة وسرعة الجسيم الساقط، m_0 هي كتلة الإلكترون عند السكون، N هو عدد ذرات المادة لكل اسم^3 ، Z هو العدد الذري للمادة، I هو متوسط كمون (الجهد) التأين لذرات هذه المادة و c هي سرعة الضوء في الفراغ. فإذا كانت طاقة الجسيمات الثقيلة الساقطة صغيرة (أي حدود عدة عشرات من الميغا إلكترون فولت) تكون سرعتها صغيرة بالنسبة لسرعة الضوء وبالتالي يمكن اعتبار أن النسبة بين سرعة الجسيم وسرعة الضوء تساوي صفر($v / c = 0$) ، عندئذ تعطى قدرة الإيقاف المتوسطة بالعلاقة:

$$(- dE/dx) = (4\pi e^4 z^2 / m_0 v^2)\, N Z \ln (2m_0 v / I)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

$$= (4\pi e^4 z^2 / m_0 v^2) N B \qquad (3\text{-}4)$$

حيث

$$B = Z \ln (2m_0 v / I)$$

وتجدر الإشارة إلى أن العلاقتين (3-3)، (3-4) لا تصلحان للاستخدام عند الطاقات الصغيرة جدا حيث يحدث تبادل الإلكترونات بين المادة والجسيم. كذلك، فإن قيمة I الواردة في العلاقتين يجب تحديدها تجريبيا.

وفي الأغراض العلمية يفضل اتخاذ قيمة فيزيائية أخرى تعرف باسم قدرة الإيقاف النسبية (Relative Stopping Power RSP) . وقدرة الإيقاف النسبية لمادة ما هي عبارة عن النسبة بين مدي الجسيمات المعينة في الهواء عند الظروف المعيارية ومدى نفس الجسيمات في المادة.

وباستخدام العلاقة (3-4) لكل من الهواء والمادة نجد أن

$$RSP = (- dE / dx)_{air} / (-dE/dx)_{abs} = N_{air} B_{air} / N_{abs} B_{abs} \qquad (3\text{-}5)$$

حيث air تعود على الهواء، abs تعود على المادة الممتصة للطاقة.

وعندما تكون المادة في شكل مركب كيميائي لعدة عناصر فإنه يجب إيضاح أن طاقة الروابط الكيميائية بين العناصر المختلفة تعتبر مهملة ولا تشكل أي أثر على قدرة الإيقاف للمادة المكونة من عدة عناصر. لذا، فإنه عندما تكون المادة الممتصة في شكل مركب كيميائي تعتبر قدرة الإيقاف في المركب مساوية لمجموع قدرات الإيقاف في كل مادة على حدة مع الأخذ في الاعتبار نسب المواد في المركب، أي أن قدرة الإيقاف في المادة المركبة هي:

$$(- dE/dx)_{comp} = (N_1/N_0) (-dE/dx)_1 + (N_2/N_0)_2 (-dE/dx)_2 + \ldots\ldots \qquad (3\text{-}6)$$

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

حيث $(-\ dE/dx)_{comp}$ هي قدرة الإيقاف للمادة المركبة، $(-dE/dx)_1$، $(-\ dE/dx)_2$ ،... هي قدرات الإيقاف في المواد الأولى والثانية، و.... المكونة لهذا المركب، N_0 هو عدد ذرات المركب لكل ا سم^3 و N_1 , N_2 عدد ذرات المادة الأولى والثانية لكل سم^3.

وباستخدام العلاقة (3–4) يمكن إيجاد العلاقة بين قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا والبروتونات في المادة نفسها، حيث نجد أن:

$$\{ (-\ dE/dx)_{\alpha\,(4E)} / (-\ dE/dx)_{p\,(E)} \} = 4 \qquad (3\text{-}7)$$

وتعني هذه العلاقة أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا أكبر بمقدار أربعة أضعاف من قدرة الإيقاف للبروتونات التي طاقتها تساوي ¼ طاقة جسيمات ألفا، وذلك عند استخدام المادة نفسها. فمن المعروف أن مدى جسيمات ألفا في الهواء يساوي 3.5 سم إذا كانت طاقتها حوالي 5 ميغا إلكترون فولت. وبذلك، يكون مدى البروتون الذي تبلغ طاقته $5 \div 4 = 1.25$ ميغا إلكترون فولت، هو $3.5 \times 4 = 14.0$ سم عند الظروف نفسها من الضغط والحرارة. ويوضح هذا المثال أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا كبيرة (أي أن مداها قصير). وتقل هذه القدرة كلما صغرت كتلة الجسيم أو شحنته.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد المدى بدلالة قدرة الإيقاف، وذلك طبقا للعلاقة التالية:

$$R = \int_0^R dx = \int_0^E dE\ /(-dE\ /\ dx) \qquad (3\text{-}8)$$

وتعرف هذه المعادلة بالعلاقة بين المدى والطاقة (range - energy relation) ، وعند التعويض عن قدرة الإيقاف من العلاقة (3–4) فإنه يمكن إيجاد قيمة المدى. ولكن هذه القيمة تكون غير دقيقة حيث أن العلاقة (3–4) لا تصلح للاستخدام عن نهاية المدى.

3–3 التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة

Interaction of electrons with matter

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

حيث $(-\ dE/dx)_{comp}$ هي قدرة الإيقاف للمادة المركبة، $(-dE/dx)_1$، $(-\ dE/dx)_2$ ،... هي قدرات الإيقاف في المواد الأولى والثانية، و.... المكونة لهذا المركب، N_0 هو عدد ذرات المركب لكل ا سم^3 و N_1 , N_2 عدد ذرات المادة الأولى والثانية لكل سم^3.

وباستخدام العلاقة (3–4) يمكن إيجاد العلاقة بين قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا والبروتونات في المادة نفسها، حيث نجد أن:

$$\{ (-\ dE/dx)_{\alpha\,(4E)} / (-\ dE/dx)_{p\,(E)} \} = 4 \qquad (3\text{-}7)$$

وتعني هذه العلاقة أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا أكبر بمقدار أربعة أضعاف من قدرة الإيقاف للبروتونات التي طاقتها تساوي ¼ طاقة جسيمات ألفا، وذلك عند استخدام المادة نفسها. فمن المعروف أن مدى جسيمات ألفا في الهواء يساوي 3.5 سم إذا كانت طاقتها حوالي 5 ميغا إلكترون فولت. وبذلك، يكون مدى البروتون الذي تبلغ طاقته $5 \div 4 = 1.25$ ميغا إلكترون فولت، هو $3.5 \times 4 = 14.0$ سم عند الظروف نفسها من الضغط والحرارة. ويوضح هذا المثال أن قدرة الإيقاف لجسيمات ألفا كبيرة (أي أن مداها قصير). وتقل هذه القدرة كلما صغرت كتلة الجسيم أو شحنته.

وتجدر الإشارة إلى أنه يمكن تحديد المدى بدلالة قدرة الإيقاف، وذلك طبقا للعلاقة التالية:

$$R = \int_0^R dx = \int_0^E dE\ /(-dE\ /\ dx) \qquad (3\text{-}8)$$

وتعرف هذه المعادلة بالعلاقة بين المدى والطاقة (range - energy relation) ، وعند التعويض عن قدرة الإيقاف من العلاقة (3–4) فإنه يمكن إيجاد قيمة المدى. ولكن هذه القيمة تكون غير دقيقة حيث أن العلاقة (3–4) لا تصلح للاستخدام عن نهاية المدى.

3–3 التفاعل المتبادل بين الإلكترونات والمادة

Interaction of electrons with matter

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

3-3-1 انتقال الطاقة من الإلكترون للمادة

عندما تكون طاقة الإلكترونات الساقطة (أقل من ½ ميغا إلكترون فولت) تفقد هذه الإلكترونات طاقاتها عن طريق إثارة الإلكترونات المدارية لذرات المادة أو تأيين هذه الذرات بنفس أسلوب انتقال الطاقة من الجسيم الثقيل إلى المادة. وتبلغ نسبة التأين الابتدائي في حالة الإلكترونات حوالي 20 % والباقي ناتج عن التأين الثانوي. ونظرا لأن كتلة الإلكترون صغيرة للغاية بالنسبة لكتلة الجسيم الثقيل تكون سرعة الإلكترونات كبيرة للغاية بالمقارنة بسرعة الجسيم الثقيل الذي يكون له نفس الطاقة. وهذا يعني أن زمن بقاء الإلكترون بالقرب من ذرة معينة من ذرات المادة يكون صغيرا للغاية، مما يؤدي إلى انخفاض التأين النوعي S . فإذا كان التأين النوعي لجسيمات ألفا يبلغ عدة آلاف في بداية الأثر ويتضاعف عند نهايته، فيلاحظ أن التأين النوعي للإلكترونات لا يتعدى 10 في بداية الأثر ويصل إلى حوالي المائة عند نهايته.

وطبقا لقوانين بقاء الطاقة والزخم (حفظ الطاقة والزخم) فإنه عند تصادم الجسيم الثقيل مع إلكترون المادة تنتقل نسبة ضئيلة جدا من طاقة الجسيم إلى الإلكترون لا تتجاوز $4m_0 / M$ ، حيث M كتلة الجسيم الثقيل. أما عند تصادم الإلكترون الساقط مع إلكترون المادة فيمكن أن تصل قيمة الطاقة المنتقلة من الإلكترون الساقط إلى إلكترون المادة نصف طاقة الإلكترون الساقط في التصادم الواحد. أي أنه في حالة الإلكترونات هناك احتمال لانتقال كمية كبيرة من طاقة الإلكترون الساقط في التصادم الواحد إلى أحد الإلكترونات المدارية. ويؤدي هذا إلى زيادة التبعثر في حالة الإلكترونات، بحيث يكون، عادة، أكبر بكثير من التبعثر في حالة الجسيمات الثقيلة. وبالإضافة إلى ذلك فإنه نظرا لصغر كتلة الإلكترون فإن التصادمات بين الإلكترون الساقط وإلكترونات ونوى المادة قد تؤدي إلى انكسار مسار الإلكترون الساقط. لذا يكون أثر الإلكترون الساقط في المادة عادة عبارة عن خط منكسر.

وعند زيادة طاقة الإلكترونات الساقطة فإنه بالإضافة إلى فقد الطاقة عن طريق التصادمات غير المرنة (إثارة وتأين ذرات المادة)

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

يمكن أن تفقد الإلكترونات الساقطة طاقتها في صورة إشعاعات تعرف باسم إشعاعات الانكباح (bresmsstrahlung radiation). وتقوم العملية الأخيرة (أي فقد الطاقة بالإشعاع) بالدور الأساسي في فقد طاقة الإلكترونات الساقطة كلما زادت طاقة هذه الإلكترونات .

وتفقد البوزيترونات طاقتها بالأسلوب نفسه. إلا أنه يوجد فرق جوهري بين البوزيترونات والإلكترونات عند نهاية الأثر. فبعد أن يفقد البوزيترون طاقته عند نهاية الأثر فإنه عند اصطدامه بإلكترون يفنيان معا (الإلكترون والبوزيترون) مكونين بذلك فوتونين من فوتونات جاما، وهي الظاهرة المعروفة بتلاشي المادة والمادة المضادة عند تلاقيهما (annihilation) .

3-3-2 فقد الطاقة بالتصادمات غير المرنة

Energy loss by inelastic collision

لا تختلف نظريات انتقال الطاقة في حالة الإلكترونات عن طريق التصادمات غير المرنة (الإثارة والتأين) عن مثيلاتها بالنسبة للجسيمات المشحونة الثقيلة. ويمكن الحصول على القيمة النظرية لقدرة الإيقاف للإلكترونات عندما تكون طاقتها صغيرة ($E < m_0C^2$) بالمقارنة بطاقة السكون لها، وذلك من العلاقة التالية:

$$(- dE/dx) = (4\pi e^4 / m_0 v^2) N Z [\ln (m_0 v^2 /2 I) + 0.15] \quad (3\text{-}9)$$

أما إذا كانت طاقة الإلكترونات كبيرة ($E > m_0c^2$) تكون القيمة النظرية لقدرة الإيقاف هي:

$$(- dE/ dx) = (2\pi e^4 / m_0 c^2) N Z [\ln (m_0 c^2 /2 I) + 0.15] \quad (3\text{-}10)$$

3-3-3 فقد الطاقة بالإشعاع Energy loss by radiation

طبقا لقوانين الكهروديناميكا، فإنه عند تعجيل (تسريع) جسيم مشحون فإن هذا الجسيم يصدر إشعاعات كهرومغناطيسية تتناسب شدتها مع مربع العجلة (التسارع). وعند مرور إلكترون بالقرب من نواة

الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

شحنتها Z فإن مساره ينحرف. وهذا الانحراف هو بمثابة التعجيل. وينتج عن هذا التعجيل إشعاعات كهرومغناطيسية تعرف باسم إشعاعات الانكباح، تؤدي إلى فقد الإلكترون لجزء من طاقته. ولا يحدث هذا الفقد للطاقة على نواة الذرة فحسب، وإنما يحدث كذلك على الإلكترونات المدارية للذرة. وطيف إشعاعات الانكباح طيف مستمر، وهي تصاحب تفكك بيتا كما تصدر عن جميع أنابيب الأشعة السينية عند فقد الإلكترونات لطاقتها على مادة المصعد (الأنود).

ولحساب الطاقة التي يفقدها إلكترون في شكل إشعاع انكباح على وحدة الطول من المسار داخل المادة تستخدم العلاقة التالية:

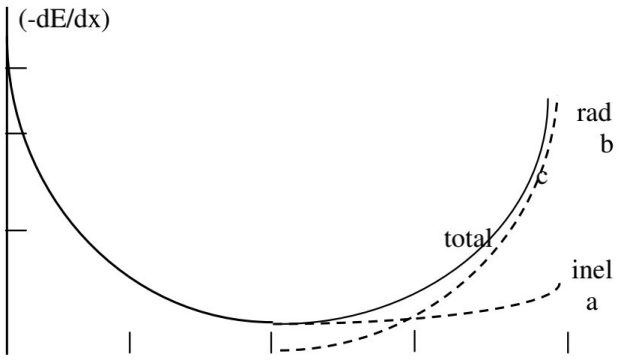
$$(-\,dE/dx)_{rad} = [4Z(Z+1)e^4\,NE\,/137\,m_0^2\,C^2]\,(\ln 183Z^{-1/2} + 0.125) \qquad (3\text{-}11)$$

وهذه العلاقة التي تمثل قدرة الإيقاف عن طريق الإشعاع صالحة مادامت طاقة الإلكترونات كبيرة، أي ($E >> m_0 c^2$). أما إذا كانت طاقة الإلكترونات صغيرة فإنه يمكن إهمال فقد الطاقة عن طريق الإشعاع.

وهكذا فإن قدرة الإيقاف الكلية بالنسبة للإلكترونات هي:

$$(-\,dE/dx)_{tot} = (-\,dE/dx)_{inel} + (-\,dE/dx)_{rad} \qquad (3\text{-}12)$$

ويوضح شكل (3–4) كيفية تغير قدرة الإيقاف عن طريق التصادمات غيرالمرنة $(-dE/dx)_{inel}$ وعن طريق الإشعاع $(-dE/dx)_{rad}$ وكذلك القدرة الكلية $(-dE/dx)_{tot}$ كدالة من طاقة الإلكترونات الساقطة،



الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner

0.01 0.1 1.0 10 100

E / mc^2

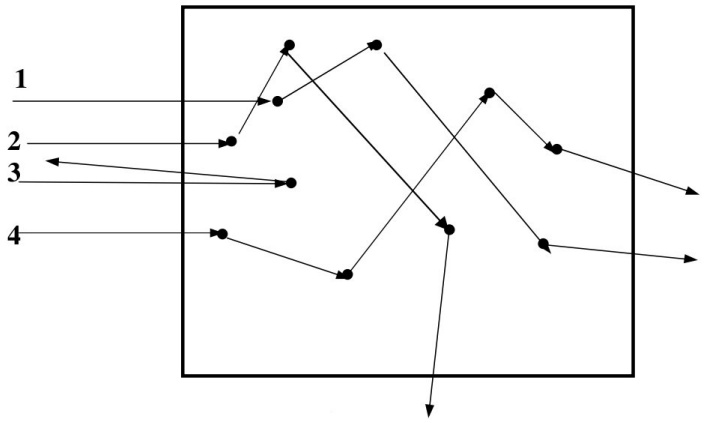
شكل (3–4)

تغير قدرة الإيقاف كدالة من طاقة الإلكترونات الساقطة

حيث يمثل المحور الأفقي نسبة طاقة الإلكترونات الساقطة E إلى طاقة السكون للإلكترون m_0c^2 ، ويمثل المنحنى a قدرة الإيقاف بالتصادمات غير المرنة والمنحنى b قدرة الإيقاف بالإشعاع أما منحنى c المستمر فيمثل القدرة الكلية للإيقاف.

3–3–4 امتصاص الإلكترونات Absorption of electrons

لاحظنا أن سلوك الإلكترونات عندما تسقط على المادة يختلف اختلافا كبيرا عن سلوك الجسيمات الثقيلة. وتتمثل بعض نواحي هذا الاختلاف في أن أثر الإلكترون في المادة لا يكون على شكل خط مستقيم كما هو الحال بالنسبة للجسيمات الثقيلة ولكن يكون في صورة كالمبينة بشكل(3–5) ، بالإضافة إلى ذلك فإن طول أثر الإلكترون يختلف كليا عن مداه (فالمدى عبارة عن المسافة المستقيمة التي يقطعها الجسيم في اتجاه سقوطه حتى يتوقف). لذا، فإن مفهوم المدى بالنسبة لإلكترون معين غير وارد.



الممسوحة ضوئيا بـ CamScanner