تقوم عالمة الآثار في هذه الصورة بإزالة بقايا سلحفاة بحرية من داخل تجويف حجري صنعه الإنسان القديم. إنّ تحديد عمر هذه البقايا بواسطة الكربون يمكن أن يخبرنا عن الزمن الذي سكن فيه الإنسان هذا الموقع.
في هذا الفصل، سنبدأ دراستنا للفيزياء النووية بما في ذلك خصائص الأنوية، والأشكال المختلفة للنشاط الإشعاعي، وكيفية استخدام التحلل الإشعاعيّ في مجالات مختلفة لتحديد عمر الأجسام القديمة؛ من العظام، والأشجار إلى الصخور ومواد معدنية أخرى، والحصول على معلومات عن تاريخ الأرض.

الفصل 30

الفيزياء النوويَّة و النّشاط الإشعاعي

في القرن العشرين، أدّت تجربة رذرفورد إلى فكرة أنّ مركز الذرّة تشغله نواة صغيرة وثقيلة. وفي الوقت نفسه الذي كانت تتطوّر فيه النظرية الكمية، ويحاول العلماء فهم تركيب الذرة وإلكتروناتها، كان البحث في النواة نفسها قد بدأ أيضًا. وفي هذا الفصل والذي يليه، سنقدّم لمحة مختصرة عن الفيزياء النووية.

1-30 تركيب الذرة وخصائصها

لقد كان السؤال المهم للعلماء هو: هل النواة مركبة؟ وما هو تركيبها؟ لقد تبين أنّ النواة كينونة معقدة ولم تفهم بشكل كامل حتى وقتنا الحاضر. على أيّ حال، في بدايات 1930 طور نموذج للنواة ومازال مفيدًا. واستنادًا إلى هذا النموذج، فإنّ النواة مكونة من نوعين من الجُسيمات هما: البروتونات والنيوترونات. (هذه الجُسيمات لها أيضًا خصائص موجية، ولكن لتبسيط تخيلها نشير إليها ببساطة كـ" جُسيمات").

البروتون هو نواة أبسط ذرة، الهيدروجين. شحنته موجبة ($+e = +1.60 \times 10^{-19}\,\mathrm{C}$ وهو المقدار نفسه للإلكترون) وكتلته.

البروتون

$$m_{\mathrm{p}} = 1.67262 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$$

أما النيوترون، الذي تأكد وجوده في عام 1932 عن طريق الفيزيائي الإنجليزي جيمس شادويك (1891-1974)، فهو متعادل كهربائيًّا ($q = 0$) كما يتضح من اسمه، وكتلته أكبر قليلًا من تلك التي للبروتون:

النيوترون

$$m_{\mathrm{n}} = 1.67493 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$$

هذان الجُسيمان يشكلان النواة، ويشار إليهما بشكل مجتمع **بالنيوكلونات**.

نيوكلونات

وعلى الرغم من أنّ نواة الهيدروجين تحتوي على بروتون واحد، إلا أنّ أنوية العناصر الأخرى جميعها تحتوي على النيوترونات والبروتونات. يشار إلى الأنوية المختلفة عادة بـ**"نيوكليدات"**. يُسَمّى عددُ البروتونات في نواة معينة (نيوكليد) العددَ الذريَّ، ويرمز إليه بالحرف Z. أما العدد الكتلي للنيوكلونات- النيوترونات زائد البروتونات- فيرمز إليه بالحرف A، ويُسَمّى **العدد الكتلي** الذري، ويُسَمّى أحيانًا ببساطة **العددَ الكتلي**. يستخدم هذا الاسم لأنّ كتلة النواة قريبة جدًّا من حاصل ضرب A في كتلة نيوكلون واحد. وهكذا، فإنّ النواة التي تحتوي على 7 بروتونات و 8 نيوترونات يكون لها $Z = 7$، و $A = 15$. أما **عدد النيوترونات** N فهو $N = A - Z$.

Z و A

ولتحديد نواة ما؛ نحتاج إلى إعطاء كلّ من A و Z فقط. وهناك رمز خاص يستعمل بشكل شائع ويأخذ الشكل التالي:

$${}^{A}_{Z}\mathrm{X},$$

حيث X الرمز الكيميائي للعنصر (انظر الملحق B والجدول الدوري الذي على الجزء الداخلي للغطاء الخلفي للكتاب). أمّا A فهو العدد الكتلي الذري، في حين يشير Z إلى العدد الذري. على سبيل المثال، ${}^{15}_{7}\mathrm{N}$ يعني نواة النتيروجين التي تحتوي على 7 بروتونات، و8 نيوترونات وهو ما مجموعه 15 نيوكلونا.

في الذرة المتعادلة، عدد الإلكترونات التي تدور حول النواة يساوي العدد الذري Z (لأنّ الشحنة التي على الإلكترون لها مقدار الشحنة نفسه التي على البروتون ولكن تعاكسها في الإشارة).

تُحَدَّد الخصائص الرئيسة للذرة وكيفية تفاعلها مع الذرات الأخرى بشكل كبير بمعرفة عدد الإلكترونات. لذا، فإنّ Z تحدد أيّ نوع من الذرات: كربونا، أكسجينا، أو أي شيء آخر. إنّ تعيينَ كلّ من رمز النواة وعددها الذري Z كما وصفنا سابقًا نوعٌ من الإسهاب. ولهذا، إذا كانت النواة هي النيتروجين على سبيل المثال، فإننا نعرف مباشرة أنّ $Z = 7$. وعليه، فإنّ الحرف السفلي Z يسقط من الرمز، وبالتالي فإنّ ${}^{15}_{7}\mathrm{N}$ تكتب ببساطة $^{15}\mathrm{N}$: وبتعبير لفظي نقول، نيتروجين خمسة عشر.

لقد وجد أنّ نوعًا محددًا من الذرّات (الكربون، مثلًا) تحتوي أنويته على أعداد مختلفة من النيوترونات، على الرغم من أنّ لها العدد نفسه من البروتونات؛ فعلى سبيل المثال، أنوية الكربون لها دائمًا 6 بروتونات، ولكن قد يكون لها 5، 6، 7، 8، 9، 10 نيوترونات. تُسَمّى الأنوية التي تحتوي على عدد البروتونات، واختلاف أعداد النيوترونات بـ**" النظائر"**. وهكذا، فإنّ ${}^{11}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{15}_{6}\mathrm{C}$, ${}^{16}_{6}\mathrm{C}$ وجميعها نظائر للكربون. إنّ النظائر لعنصر ما ليست متوافرة كلها بشكل متساوٍ؛ فعلى سبيل المثال، 98.9% من الكربون الموجود في الطبيعة (على الأرض) هو للنظير ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$، وحوالي 1.1% للنظير ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$. يشار إلى هذه النسب المئوية بـ**"الوفرة الطبيعية"**. هناك العديد من النظائر غير موجودة في الطبيعة، ولكن يمكن إنتاجها في المختبر بواسطة التفاعلات النووية (المزيد عن ذلك سوف يأتي لاحقًا). في الواقع، العناصر التي بعد اليورانيوم ($Z > 92$) جميعها لا توجد في الطبيعة على الأرض بل تنتج صناعيًّا فقط ، مثل العديد من النويدات التي عددها الذري $Z \leq 92$.

النظائر

إنّ الحجم التقريبي للأنوية كان قد حدد في الأصل عن طريق رذرفورد من تشتت جسميات مشحونة عن شرائح فلزية رقيقة. ولكن لا نستطيع الحديث عن حجم مؤكد للنواة بسبب ازدواجية جُسيم – موجة: وهكذا يجب أن يبقى الحيز المكاني للأنوية غير واضح نوع ما. ومع ذلك، يمكن قياس الحجم التقريبي للنواة عن طريق تشتت إلكترونات عالية السرعة بعيدًا عنها. لقد وجد أنّ الأنوية لها شكل واضح نوع ما. ومع ذلك، يمكن قياس الحجم التقريبي للنواة عن طريق تشتت إلكترونات عالية السرعة بعيدًا عنها. لقد وجد أنّ الأنوية لها شكل كروي يزداد نصف قطره مع زيادة A حسب الصيغة التقريبية التالية:

* إن قيم الكتل الذرية للعناصر الواردة في الجدول الدوري *(الجزء الداخلي من الغطاء الأخير)* هي معدل كتل النظائر الموجوده في الطبيعة.

أنصاف الأقطار النووية

$$r \approx (1.2 \times 10^{-15}\,\text{m})(A^{\frac{1}{3}}) \qquad \textbf{(1-30)}$$

بما أنّ حجم الكرة $V = \frac{4}{3}\pi r^3$، لذلك نلاحظ أنّ حجم النواة يتناسب تقريبًا مع عدد النيوكلونات، $V \propto A$ وهذا هو الذي يجب أن نتوقعه إذا كانت النيوكلونات مثل كرات بلياردو صلبة: إذا ضاعفت عدد الكرات، يتضاعف الحجم الكلي. وهكذا، فإنّ الأنوية جميعها لها الكثافة نفسها تقريبًا، وهي بالتأكيد كبيرة جدًّا (انظر إلى مثال 30-2).

الاختصار المتري لـ $10^{-15}\,\text{m}$ هو الفيرمي (نسبة إلى إنريكوفيرمي) أو الفيمتومتر، fm (الجدول 1-4 أو داخل الغطاء الأمامي للكتاب). لذلك، فإنّ $1.2 \times 10^{-15}\,\text{m} = 1.2\,\text{fm}$ أو 1.2 فيرمي.

المثال 30-1 قدّر **الحجوم النووية**

قدر قطر الأنوية التالية: (أ) $^{1}_{1}\text{H}$ ، (ب) $^{40}_{20}\text{Ca}$ ، (جـ) $^{208}_{82}\text{Pb}$ ، (د) $^{235}_{92}\text{U}$.

النّهج : نصف قطر نواة ما يرتبط مع عدد النيوكلونات A الموجودة فيها وفقًا (للمعادلة 30-1)، القطر $d = 2r$.

الحلّ: (أ) للهيدروجين، $A = 1$، من (المعادلة 30-1) نحصل على

$$d = \text{diameter} = 2r \approx 2(1.2 \times 10^{-15}\,\text{m})(A^{\frac{1}{3}}) = 2.4 \times 10^{-15}\,\text{m}$$

لأنّ $A^{\frac{1}{3}} = 1^{\frac{1}{3}} = 1$

(ب) للكالسيوم $d = 2r \approx (2.4 \times 10^{-15}\,\text{m})(40)^{\frac{1}{3}} = 8.2 \times 10^{-15}\,\text{m}$

(جـ) للرصاص $d \approx (2.4 \times 10^{-15}\,\text{m})(208)^{\frac{1}{3}} = 14 \times 10^{-15}\,\text{m}$

(د) لليورانيوم $d \approx (2.4 \times 10^{-15}\,\text{m})(235)^{\frac{1}{3}} = 15 \times 10^{-15}\,\text{m}$

وهكذا تتراوح الأقطار النووية فقط من 2.4 fm إلى 15 fm.

ملحوظة: بما أنّ أنصاف الأقطار النووية تتغير وفقًا لـ $A^{\frac{1}{3}}$، فإنّ أكبر الأنوية لها نصف قطر أكبر بست مرات فقط من ذلك الذي لأصغر الأنوية.

المثال 30-2 قدّر **الكثافة الذرية والنووية**

قارن كثافة المادة النووية مع كثافة المواد الصلبة الطبيعية.

النّهج: كثافة المواد الصلبة والسائلة الطبيعية في حدود $10^3 - 10^4\,\text{kg/m}^3$، (انظر الجدول 10-1) وبما أنّ الذرات متقاربة ومكتظة، فإنّ لها الكثافة نفسها تقريبًا. وهكذا، فإننا نقارن كثافة النواة (كتلة / حجم) مع تلك التي لذرتها ككل.

الحلّ: كتلة البروتون أكبر من كتلة الإلكترون بعامل يساوي

$$\frac{1.7 \times 10^{-27}\,\text{kg}}{9.1 \times 10^{-31}\,\text{kg}} \approx 2 \times 10^3$$

وهكذا، فإنّ أكثر من 99.9% من كتلة الذرة مركزة في النواة. ولتقديرنا؛ يمكن القول إنّ كتلة الذرة تساوي كتلة النواة، أي أنّ $m_{\text{ذرة}} / m_{\text{نواة}} = 1$. يبلغ نصف قطر الذرات تقريبًا $10^{-10}\,\text{m}$ (الفصل 27)، أمّا الأنوية فيصل إلى $10^{-15}\,\text{m}$ (المعادلة 30-1)، وبالتالي فإنّ نسبة الكثافة النووية إلى الكثافة الذرية تساوي تقريبًا

$$\frac{\rho_{\text{نووية}}}{\rho_{\text{ذرة}}} = \frac{(m_{\text{نووية}}/V_{\text{نووية}})}{(m_{\text{ذرة}}/V_{\text{ذرة}})} = \left(\frac{m_{\text{نووية}}}{m_{\text{ذرة}}}\right)\frac{\frac{4}{3}\pi r^3_{\text{ذرة}}}{\frac{4}{3}\pi r^3_{\text{نووية}}} \approx (1)\frac{(10^{-10})^3}{(10^{-15})^3} = 10^{15}$$

أي أنّ النواة أكثر كثافة من المادة الاعتيادية بحوالي 10^{15}.

تنويه !

عدم اليقين غير ناتج من قصور الأجهزة، ولكنه متأصل في الطبيعة (الموجة – الجسم)

يمكن تحديد كتل الأنوية من نصف قطر انحناء أنوية سريعة تتحرك (مثل أيونات) في مجال مغناطيسي باستعمال مقياس الطيف الكتلي الذي تمت دراسته في (البند 11-20).

وفي الحقيقة، فإنّ وجود نظائر مختلفة للعنصر نفسه (عدد مختلف من النيوترونات) كان قد اكتشف باستعمال هذا الجهاز. يمكن تحديد الكتل النووية في **وحدات كتلة ذرية موحدة** (u). وعلى هذا المقياس، أعطيت ذرة الكربون المتعادلة $^{12}_{6}\mathrm{C}$ قيمة دقيقة تساوي 12.000000 u. لذا، فإنّ كتلة النيوترون المقيسة هي 1.008665 u والبروتون 1.007276 u، وذرة الهيدروجين المتعادلة (البروتون + الإلكترون) 1.007825 u. يحتوي الفهرس B على كتل العديد من الأنوية. ويجب ملاحظة أنّ الكتل التي في هذا الجدول، كما هو مألوف، هي للذرة المتعادلة (بما فيها الإلكترونات) وليست للنواة المجردة. تعين الكتل غالبًا باستعمال وحدة طاقة الإلكترون – فولت. ويمكن عمل ذلك لأنّ الكتلة والطاقة مرتبطتان مع بعضهما بعضًا، والعلاقة الدقيقة التي تربط بينهما تُعطى حسب معادلة آينشتاين $E = mc^2$ (الفصل 26). وبما أنّ كتلة البروتون هي $1.67262 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$ أو 1.007276 u، فإنّ

$$1.0000\,\mathrm{u} = \left(\frac{1.0000\,\mathrm{u}}{1.007276\,\mathrm{u}}\right)(1.67262 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}) = 1.66054 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg}$$

وهذا يكافىء الطاقة (انظر إلى الجدول الذي على الغطاء الأمامي من الداخل).
بوحدة MeV (= 10^6 eV) كما يلي:

$$E = mc^2 = \frac{(1.66054 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg})(2.9979 \times 10^{8}\,\mathrm{m/s})^2}{(1.6022 \times 10^{-19}\,\mathrm{J/eV})} = 931.5\,\mathrm{MeV}$$

وهكذا فإنّ

$$1\,\mathrm{u} = 1.6605 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg} = 931.5\,\mathrm{MeV}/c^2.$$

وحدة الكتلة الذرية و *MeV*

(جدول 30-1)
كتل السكون بالكيلوجرام، وحدات الكتلة الذرية الموحدة و MeV/c^2

جدول 30-1
كتل السكون بالكيلوجرام، وحدات الكتلة الذرية الموحدة و MeV/c^2

الكتلة	الكتلة		
	kg	u	MeV/c^2
إلكترون	9.1094×10^{-31}	0.00054858	0.51100
بروتون	1.67262×10^{-27}	1.007276	938.27
ذرة	1.67353×10^{-27}	1.007825	938.78
نيوترون	1.67493×10^{-27}	1.008665	939.57

إنّ الأنوية ومكوناتها؛ البروتون والنيوترون، لها مغزلية (برم) $\frac{1}{2}$ وأعداد كمية لكمية التحرك الزاوية كتلك التي للإلكترون. وهذا يعني أنّ البروتون والنيوترون جُسيمات لكلّ منهما مغزلية (برم). كما أنّ النواة، التي تتكون من بروتونات ونيوترونات، لها عدد كمي للمغزلية النووية (برم نووي) I والذي يمكن أن يكون عددًا صحيحًا، أو نصف صحيح اعتمادًا على عدد النيوكلونات المكونة لها، زوجية كانت أم فردية.

30-2 طاقة الترابط والقوى النووية

طاقات الترابط

تكون الكتلة الكلية للنواة المستقرة دائمًا أقلّ من مجموع كتل نيوكلوناتها منفصلة، كما يبين المثال التالي:

المثال 30-3 **كتلة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ مقارنة مع مكوناتها**

قارن كتلة ذرة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ مع الكتلة الكلية للجُسيمات المكونة لها.

النّهج: تحتوي نواة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ على بروتونين ونيوترونين. تقدم الجداول عادة كتل الذرات المتعادلة – أي أنّ النواة زائد كتلة Z إلكترون – لأنّ الكتل تقاس هكذا. لذلك يجب التأكد من موازنة الإلكترونات عند مقارنة الكتل. إذن، سنستعمل كتلة $^{1}_{1}\mathrm{H}$ عوضًا عن كتلة البروتون لوحده. ومن الفهرس B، نجد كتلة ذرة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ (بما فيها كتلة إلكترونين) بالإضافة إلى كتلة النيوترونين وكتلة ذرتي الهيدروجين (= بروتونين + إلكترونين).

الحلّ: إنّ كتلة ذرة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ المتعادلة تساوي 4.002603 u كما وردت في الفهرس B. وكتلة النيوترونين وذرتي الهيدروجين H (بروتونان و إلكترونان) تساوي

$$2m_{\mathrm{n}} = 2(1.008665\,\mathrm{u}) = 2.017330\,\mathrm{u}$$
$$2m(^{1}_{1}\mathrm{H}) = 2(1.007825\,\mathrm{u}) = \underline{2.015650\,\mathrm{u}}$$
$$\mathrm{sum} = 4.032980\,\mathrm{u}$$

حل المسألة.
تتبع كتل الإلكترونات

وهكذا، فإنّ كتلة ^4_2He المقيسة تكون $4.032980\ \text{u} - 4.002603\ \text{u} = 0.030377\ \text{u}$ أقلّ من كتلة مكوناتها. أين ذهب هذا الفرق في الكتلة؟ في الحقيقة، لقد تحوّل هذا الفرق في الكتلة إلى طاقة من نوع آخر (مثل إشعاعية أو طاقة حركية على سبيل المثال). الفرق في الكتلة (أو الطاقة) في حالة ذرة بوحدة الطاقة يساوي $(0.030377\ \text{u})(931.5\ \text{MeV/u}) = 28.30\ \text{MeV}$ يسمّى هذا الفرقُ **طاقةَ الترابط الكلية** للنواة. تمثل طاقة الترابط الكلية مقدار الطاقة الذي يجب أن تزوَّد به النواة لكي تنفصل إلى مكوناتها. إذا كانت كتلة النواة، مثلاً ^4_2He، مساوية تمامًا لكتلة نيوترونين زائد بروتونين، فإنّ النواة يمكن أن تنفصل دون أن تمنح طاقة. تكون النواة مستقرة إذا كانت كتلتها أقل من كتلة النيوكلونات المكونة لها، أي أنها تحتاج إلى طاقة حتى تتفكك. لاحظ أنّ طاقة الترابط ليست شيئًا تملكه النواة؛ إنّها الطاقة التي تنقصها بالنسبة إلى مجموع كتلة مكوناتها منفصلة.

طاقة الربط

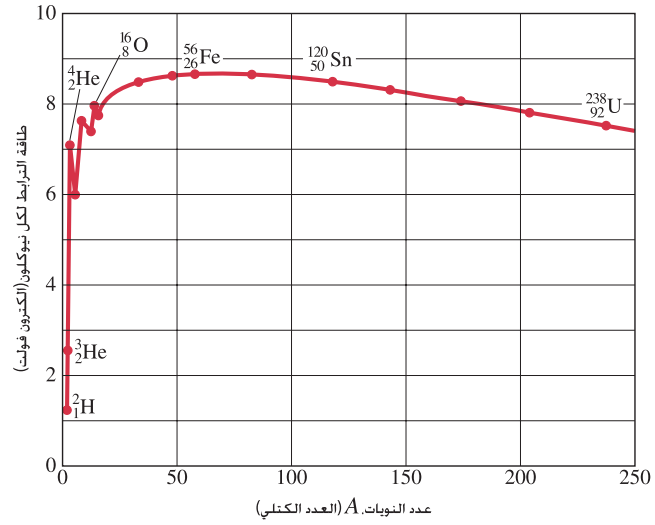
[رأينا في الفصل 27 أنّ طاقة الترابط للإلكترون الواحد في ذرة الهيدروجين تساوي 13.6 eV. وعليه، فإنّ كتلة ذرة ^1_1H أقلّ من تلك التي لبروتون واحد زائد إلكترون واحد بحوالي $13.6\ \text{eV}/c^2$ أي أنّها صغيرة إلى حدٍّ كبير مقارنة مع الكتلة الكلية للذرة $(939\ \text{MeV}/c^2)$؛ جزء واحد من 10^8. كما أنّ طاقات الترابط للأنوية في حدود MeV. وعليه، فإنّ طاقات الترابط للإلكترونات يمكن أن تهمل لأنّها صغيرة جدًّا في حدود 1 eV.

التمرين (أ) : حدّد بكم تقلّ كتلة نواة ^7_3Li عن كتلة مكوناته.

تعرف **طاقة الترابط للنيوكلون** الواحد على أنّها طاقة الترابط الكلية للنواة مقسومة على العدد الكلي للنيوكليونات A. وجدنا فيما ورد أعلاه أنّ طاقة الترابط لنواة ^4_2He تساوي 28.3 MeV. وعليه، فإنّ طاقة الترابط للنيوكلون الواحد فيها تساوي $28.3\ \text{MeV}/4 = 7.1\ \text{MeV}$. يبين (الشكل 30-1) طاقة الترابط للنيوكلون الواحد كدالة في A للأنوية المستقرة. يزداد المنحنى بزيادة A، ثم يستقر نسبيًّا عند حوالي 8.7 MeV لكلّ نيوكلون للأنوية التي عددها الكتلي A أكبر من ≈ 40. أما الأنوية التي عددها الكتلي A أكبر من ≈ 80، فإنّ المنحنى ينخفض قليلا، وهذا يشير إلى أنّ الأنوية الثقيلة أقل تماسكًا بقليل من تلك التي تقع في منتصف الجدول الدوري. وسوف نرى لاحقًا أنّ هذه الصفات هي التي تؤدي إلى انطلاق طاقة نووية في عمليات الانشطار والاندماج.

طاقة الترابط للنيوكلون

الشكل 30-1 طاقة الترابط للنيوكلون الواحد للأنوية الأكثر استقرارًا كدالة في العدد الكتلي A.



المثال 30-4 طاقة الترابط للحديد

احسب طاقة الترابط الكلية وطاقة الترابط لكلّ نيوكلون لِـ $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ = النظير الأكثر استقرارًا للحديد.

النّهج: نطرح كتلة ذرة الحديد $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ من الكتلة الكلية لـ 26 ذرة هيدروجين و 30 نيوترونا. الكتل جميعها موجودة في الفهرس B. ثم نحول وحدات الكتلة إلى وحدات الطاقة. وأخيرًا نقسم على $A = 56$ العدد الكلي للنيوكلونات.

الحلّ: يحتوي الحديد $^{56}_{26}\mathrm{Fe}$ على 26 بروتونا و 30 نيوترونا وكتلتها المنفصلة تساوي (بما فيها 26 إلكترونا)

(تضم 26 إلكترون)	$26m(^1_1\mathrm{H}) = (26)(1.007825\ \mathrm{u})$	$= 26.20345\ \mathrm{u}$
	$30m_\mathrm{n} = (30)(1.008665\ \mathrm{u})$	$= 30.25995\ \mathrm{u}$
	sum	$= 56.46340\ \mathrm{u}.$
(ملحق ب)	$^{56}_{26}\mathrm{Fe}$: طرح الكتلة	$= -55.93494\ \mathrm{u}$
	Δm	$= 0.52846\ \mathrm{u}.$

وهكذا، فإنّ طاقة الترابط الكلية تساوي

$$(0.52846\ \mathrm{u})(931.5\ \mathrm{MeV/u}) = 492.26\ \mathrm{MeV}$$

وطاقة الترابط لكلّ نيوكلون تساوي

$$\frac{492.26\ \mathrm{MeV}}{56\ \text{نيوكلون}} = 8.79\ \mathrm{MeV}$$

ملحوظة: أعلى قيمة لمنحنى طاقة الترابط لكلّ نيوكلون (الشكل 30-1) هي للحديد. ولذلك، فإنّ نواة الحديد (والأنوية المجاورة لها) هي أكثر الأنوية استقرارا.

التمرين (ب): جد طاقة الترابط لكلّ نيوكلون لِـ $^{16}_{8}\mathrm{O}$

المثال 30-5 طاقة الترابط للنيوترون الأخير

ما طاقة الترابط للنيوترون الأخير في $^{13}_{6}\mathrm{C}$؟

النّهج: نطرح كتلة $^{13}_{6}\mathrm{C}$ من كتلة الذرة منقوصة نيوترونا واحدا، $^{12}_{6}\mathrm{C}$ ونيوترونا حرا.

الحلّ: نحصل على الكتل من الفهرس B، فيكون لدينا

كتلة $^{12}_{6}\mathrm{C}$	$= 12.000000\ \mathrm{u}$
كتلة $^{1}_{0}\mathrm{n}$	$= 1.008665\ \mathrm{u}$
المجموع	$= 13.008665\ \mathrm{u}$
اطرح كتلة $^{13}_{6}\mathrm{C}$:	$-13.003355\ \mathrm{u}$
Δm	$= 0.005310\ \mathrm{u}$

وهذا بوحدة الطاقة يساوي $(931.5\ \mathrm{MeV/u})(0.005310\ \mathrm{u}) = 4.95\ \mathrm{MeV}$ أي أنّها تحتاج إلى طاقة مقدارها 4.95 MeV لنزع نيوترون من $^{13}_{6}\mathrm{C}$.

القوى النووية

يمكن تحليل الأنوية من وجهة نظر القوى التي تجعل هذه الأنوية متماسكة، وليس من وجهة نظر الطاقة فقط. وعلينا ألا نتوقع أن يكون تجمع البروتونات والنيوترونات مع بعضها تلقائيًّا؛ لأنّ البروتونات جميعها موجبة الشحنة. ولهذا، فإنها تؤثر في بعضها بعضًا بقوى تنافر كهربائية. والسؤال المطروح هو: كيف تبقى النواة مجتمعة كوحدة واحدة عند وجود قوى كهربائية بين البروتونات تحاول تفكيكها. وبما أنّ الأنوية المستقرة تبقى متماسكة، فمن الواضح أنه يجب أن تكون هناك قوة أخرى مؤثرة. وبما أنّ هذه القوة الجديدة أكثر شدة من القوة الكهربائية (كما أنّها أكثر شدة من قوة الجاذبية على المستوى النووي)، فإنها تُسَمّى **"القوة النووية القوية"** التي هي قوة تجاذب تؤثر بين النيوكلونات جميعها – البروتونات والنيوترونات على حدّ سواء. وهكذا، فإنّ البروتونات تجذب بعضها بعضًا بواسطة القوة النووية القوية هذه وتتنافر مع بعضها من خلال القوة الكهربائية. أما النيوترونات (المتعادلة كهربائيًّا) فإنها تجذب النيوترونات الأخرى أو البروتونات من خلال القوة النووية القوية.

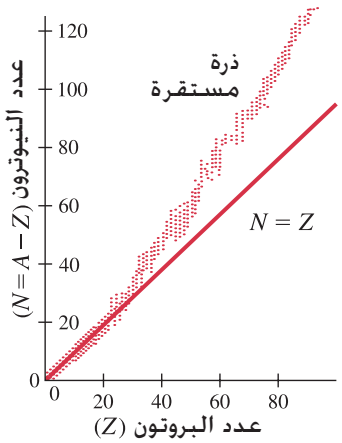
قوة نووية قوية

لقد تبيّن أنّ القوة النووية القوية أكثر تعقيدًا من قوى الجاذبية والكهرومغناطيسية. إنّ أحد أهمّ ميزات القوة النووية القوية هي أنّها **قوى قصيرة المدى**؛ أيْ أنها تؤثر ضمن مسافة قصيرة جدًّا، فتكون شديدة جدًّا بين نيوكلونين البعد بينهما أقلّ من حوالي $10^{-15}\,\mathrm{m}$، ولكنّها تنعدم إذا زادت المسافة بينهما على ذلك. قارن هذه القوى مع قوى الجاذبية والكهربائية التي تتناقص بزيادة المسافة $1/r^2$، ولكن تأثيرها يدوم على أي مسافة والتي تُسَمّى **القوى طويلة المدى**.

للقوة النووية القوية بعض الخصائص الغريبة. فعلى سبيل المثال، إذا كانت نواة ما تحتوي على عدد كثير أو قليل من النيوترونات بالنسبة إلى عدد البروتونات، فإنّ ترابط النيوكلونات يقلّ. وفي هذا المجال، فإنّ الأنوية غير المتوازنة لاتكون مستقرة. وكما هو مبين في (الشكل 30-2)، تحاول الأنوية المستقرة امتلاك عدد البروتونات نفسه الذي للنيوترونات ($N = Z$) لغاية $A = 30$ أو 40. وبعد هذا الرقم تحتوي الأنوية المستقرة على نيوترونات أكثر من البروتونات. وهذا معقول؛ لأنّه بزيادة Z تزداد قوة التنافر الكهربائية. لذا، تحتاج النواة إلى وجود عدد أكبر من النيوترونات – التي تؤثر فقط بقوة تجاذب نووية – لتحافظ على استقرارها. إذا كان Z كبيرا جدًّا، فإنّ أيّ عدد من النيوترونات لا يستطيع التغلّب على قوة التنافر الكهربائية المتزايدة. في الحقيقة، لا توجد أنوية مستقرة تمامًا بعد $Z = 82$.

نقصد بالنواة المستقرة تلك التي تبقى مكوناتها مع بعضها بعضًا لفترة غير محددة. أمّا النواة غير المستقرة، فهي التي تنفصل مكوناتها منتجة التفكك الإشعاعي. وقبل مناقشة الموضوع المهم للنشاط الإشعاعيّ(البند التالي)، نذكر هنا أنّ هناك نوعًا آخر من القوى النووية أضعف بكثير من القوة النووية القوية يدعى **القوة النووية الضعيفة** التي ندرك وجودها؛ لأنها تظهر في بعض أنواع التفكك الإشعاعي. تشكل هاتان القوتان النوويتان بالإضافة إلى قوة الجاذبية، والقوة الكهرومغناطيسية الأنواع الأربعة للقوى المعروفة في الطبيعة.

قوى قصيره المدى وقوى طويله المدى



الشكل 30-2 عدد النيوترونات مقابل عدد البروتونات للأنوية المستقرة، التي تمثل بالنقاط. الخط المستقيم $N = Z$

قوة ضعيفة

3-30 النّشاط الإشعاعي

اكتشاف النشاط الإشعاعي.

لقد كانت بداية علم الفيزياء النووية في سنة 1896. ففي هذه السنة، اكتشف هنري بيكريل (1852-1908) ظاهرة مهمة. وجد في أثناء دراسته للخاصية الفلورية أنّ معدنًا معينًا (يحتوي عادة على اليورانيوم) يجعل لوحًا فوتوغرافيًّا ما أسود حتى عندما يكون اللوح ملفوفًا كي لا يتعرض للضوء. لقد كان واضحًا أنّ المعدن يبعث نوعًا جديدًا من الإشعاعات التي لا تشبه الأشعة السينية، وتحدث دون محفز خارجي. وقد سُمّيت هذه الظاهرةُ أخيرًا **النّشاطَ الإشعاعيَّ**.

بعد اكتشاف بيكريل بفترة قصيرة، قامت ماري كوري (1867-1934) وزوجها بيير كوري (1859-1906) بعزل عنصرين لم يكونا من العناصر المعروفة سابقًا. وقد اسميا هذين العنصرين الراديوم والبولونيوم، ولهما خاصية النّشاط الإشعاعيّ كتلك التي لليورانيوم.

الشكل 30-3 ماري وبيير كوري في المختبر (سنة 1906) حيث اكتشف عنصر الراديوم.

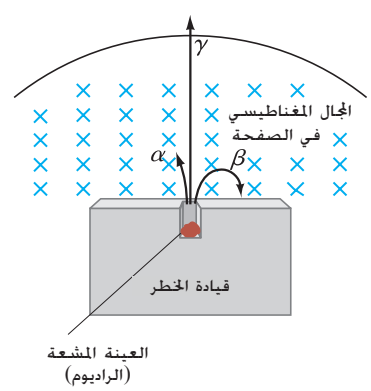
وبعد ذلك بقليل اكتشفت عناصر مشعة أخرى. لقد وجد أنّ الشدة الإشعاعية في كلّ حالة لا تتأثر بالمعالجات الفيزيائية والكيميائية الشديدة، بما في ذلك التسخين الشديد، أو التبريد، والكواشف الكيميائية الشديدة. لقد كان واضحًا أنّ مصدر الشدة الإشعاعية أو الإشعاع لهذه العناصر يجب أن يكون في العمق داخل الذرة، أيْ يجب أن ينبعث من النواة. وهكذا، فقد أصبح واضحًا أنّ النّشاط الإشعاعيّ هو نتيجة تفكك نواة غير مستقرة أو اضمحلالها. إنّ بعض النظائر غير مستقرة وتضمحل مصدرة إشعاعات معينة.

هناك العديد من النظائر غير المستقرة الموجودة في الطبيعة. وفي هذه الحالة، تُسَمّى ظاهرة النّشاط الإشعاعيّ "النّشاط الإشعاعيّ الطبيعي". كما أنّ هناك نظائر أخرى غير مستقرة يمكن إنتاجها صناعيًّا في المختبر عن طريق تفاعلات نووية (البند 31-1). وفي هذه الحالة، تكون ظاهرة النّشاط الإشعاعيّ صناعية.

بدأ رذرفورد وآخرون بدراسة طبيعة الأشعة التي تصدر عن النّشاط الإشعاعيّ في عام 1898 تقريبا. وقد وجدوا أنّ الأشعة الصادرة يمكن أن تقسم إلى ثلاثة أنواع مميزة حسب قدرتها على النفاذية؛ أحد أنواع الإشعاع يستطيع بالكاد النفاذ من خلال قطعة ورق. في حين يستطيع النوع الثاني النفاذ من لوح ألمنيوم سمكه 3 mm. أما النوع الثالث، فهو أكثر قدرة على النفاذية حيث يمكنه النفاذ من عدة سنتيمترات من لوح رصاص، ومازال يمكن كشفه من الجانب الآخر للوح. وقد سميت هذه الأنواع الثلاثة للإشعاع بـ: ـ"ألفا" (α)، و"بيتا" (β)، و "جاما" (γ) على الترتيب، نسبة إلى الأحرف الثلاثة الأولى في الهجائية اليونانية.

لقد وجد أنّ كلّ نوع من الأشعة له شحنة مختلفة. وبالتالي، فإنّها تنحرف بشكل مختلف في المجال المغناطيسي، (الشكل 30-4): أشعة α موجبة الشحنة، و أشعة β سالبة الشحنة، أمّا أشعة γ فهي متعادلة. وسرعان ما تبين أنّ الأنواع الثلاثة للإشعاع تتكون من أنواع مألوفة من الجُسيمات. أشعة جاما عبارة عن فوتونات ذات طاقة عالية جدًّا، لدرجة أنّها أعلى من الطاقة التي للأشعة السينية. أمّا أشعة بيتا فهي إلكترونات، تماثل تلك التي تدور حول النواة، ولكنها تخلق داخل النواة. في حين أنّ أشعة ألفا (أو جُسيمات α) هي ببساطة أنوية ذرات الهيليوم ^4_2He ؛ أي أنّ أشعة ألفا تتكون من بروتونين ونيوترونين محصورين مع بعضهما.

وسنناقش الآن كلّ نوع من الأنواع الثلاثة للنشاط الإشعاعيّ أو الاضمحلال بالتفصيل.



الشكل 30-4 أشعتا ألفا وبيتا تنحرفان باتجاهين متعاكسين بواسطة مجال مغناطيسي، في حين أنّ أشعة جاما لا تنحرف أبدًا.

4-30 باعثات ألفا

إنّ النواة التي تبعث جُسيمات α (^4_2He) تفقد بروتونين ونيوترونين؛ أي أنّ النواة المتبقية بعد انبعاث α تختلف عن النواة الأصلية. فالراديوم $(^{226}_{88}\text{Ra})$ 226 على سبيل المثال باعث لجُسيم α، حيث يضمحل إلى نواة عددها الذري $Z = 88 - 2 = 86$، وعددها الكتلي $A = 226 - 4 = 222$. النواة التي لها $Z = 86$ هي الرادون (Rn) – انظر إلى الفهرس B أو الجدول الدوري. وهكذا يضمحل الراديوم إلى رادون مع انبعاث جُسيم ألفا. ويعبّر عن ذلك كما يلي:

$$^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$$

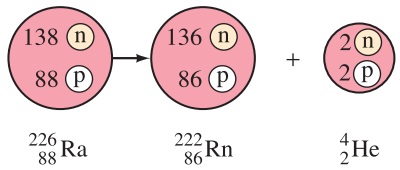
انظر إلى (الشكل 30-5)

من الواضح أنّه عندما يحدث اضمحلال α يتشكل عنصر جديد. **النواة الوليدة** (في هذه الحالة $^{222}_{86}\text{Rn}$) تختلف عن **النواة الأم** (في هذه الحالة $^{226}_{88}\text{Ra}$). ويُسَمّى تغيّر أحد العناصر إلى عنصر آخر "تحوّل العنصر"

يكتب اضمحلال ألفا كما يلي:

$$^A_Z\text{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{N}' + {}^4_2\text{He} \qquad [\alpha \text{ اضمحلال }]$$

حيث N هي النواة الأم، في حين تمثّل N' النواة الوليدة، أمّا Z و A فهما العددان الذريّ والكتليّ، على التوالي للنواة الأم.



الشكل 30-5 اضمحلال الراديوم المشع إلى رادون مع انبعاث جُسيمات ألفا.

النواة الوليدة
النواة الأم
تحول العنصر

لماذا لا تستطيع القوة النووية القوية إبقاء النواة متماسكة مع بعضها؟

يحدث اضمحلال ألفا لأنّ القوة النووية القوية غير قادرة على جعل الأنوية الثقيلة متماسكة مع بعضها. وبما أنّ القوة النووية هي قوة مدى ذات تأثير قصير، فإنها تؤثر فقط في النيوكلونات المتجاورة. أمّا القوة الكهربائية فتؤثر في جميع أرجاء النواة الثقيلة. وللأنوية الثقيلة كلّها، كلّما كان العدد الذري Z كبيرًا، فإنّ قوة التنافر الكهربائية تصبح كبيرة جدًّا (قانون كولوم) بحيث إنّ القوة النووية القوية تكون غير قادرة على جعل النواة متماسكة مع بعضها.

يمكننا التعبير عن عدم الاستقرار بدلالة الطاقة (أو الكتلة): كتلة النواة الأم أكبر من كتلة النواة الوليدة زائد كتلة جُسيم α. ويظهر الفرق في الكتلة على شكل طاقة حركية يحملها جُسيم α والنواة الوليدة المرتدة. تُسَمّى الطاقةُ الكلية الصادرة **"طاقةَ التفكك" Q**، أو **قيمة Q** للاضمحلال. ومن حفظ الطاقة، نجد أنّ

$$M_P c^2 = M_D c^2 + m_\alpha c^2 + Q$$

حيث $Q = \text{KE}$، وتمثّل M_P، و M_D و m_α كتل النواة الأم، والنواة الوليدة، وجُسيم α على الترتيب. وهكذا فإنّ

قيمة - Q

$$Q = M_P c^2 - (M_D + m_\alpha)c^2 \qquad \textbf{(2 - 30)}$$

إذا كانت كتلة النواة الأم أقلّ من كتلة النواة الوليدة زائد جُسيم ألفا (أي أنّ $Q < 0$)، فإنّ الاضمحلال قد لا يحدث تلقائيًّا؛ لأنّ قانون حفظ الطاقة لا يتحقق.

المثال 6-30 الطاقة الناتجة من اضمحلال اليورانيوم

احسب طاقة التفكك عند اضمحلال $^{232}_{92}\text{U}$ (كتلته = 232.037146 u) إلى $^{228}_{90}\text{Th}$ (228.028731 u) مع انبعاث جُسيم α. (كما هو الحال دائمًا، فإنّ الكتل للذرات المتعادلة).

النّهج: نستعمل حفظ الطاقة كما عبرنا عنه في (المعادلة 30-2). $^{232}_{92}\text{U}$ النواة الأم، و $^{228}_{90}\text{Th}$ النواة الوليدة.

الحلّ: بما أنّ كتلة ^4_2He تساوي 4.002603 u (فهرس B)، فإنّ الكتلة الكلية في المرحلة النهائية تساوي

$$228.028731\ \text{u} + 4.002603\ \text{u} = 232.031334\ \text{u}$$

الكتلة المفقودة عندما يضمحل $^{232}_{92}\text{U}$ تساوي

$$232.037146\ \text{u} - 232.031334\ \text{u} = 0.005812\ \text{u}$$

بما أنّ $1\ \text{u} = 931.5\ \text{MeV}$، فإنّ الطاقة Q المنبعثة تساوي

$$Q = (0.005812\ \text{u})(931.5\ \text{MeV/u})$$

$$\approx 5.4\ \text{MeV}$$

وتظهر هذه الطاقة على شكل طاقة حركية لجُسيم ألفا وللنواة الوليدة.

ملحوظة: باستعمال قانون حفظ كمية التحرك، يمكن إثبات أنّ الطاقة الحركية لجُسيم ألفا المنبعث من نواة $^{232}_{92}\text{U}$ ساكنة تساوي 5.3 MeV. وهكذا، فإنّ الطاقة الحركية للنواة الوليدة –التي ترتد بالاتجاه المعاكس لجُسيم α المنبعث– تكون 0.1 MeV تقريبا. انظر إلى المثال التالي و / أو (مسألة 65).

مثال إضافي

المثال 7-30 الطاقة الحركية KE لجُسيم α في اضمحلال $^{232}_{92}U$

بالعودة إلى اضمحلال $^{232}_{92}U$ في (المثال 6-30)، كم كمية الطاقة التي سيحملها جُسيم α من طاقة التفكك البالغة 5.4 MeV؟

النّهج: في أيّ تفاعل، يجب أن تكون كميّة التحرك محافظة بالإضافة إلى الطاقة.

الحلّ: قبل التفكك، يمكن الافتراض بأنّ النواة ساكنة؛ أي أنّ كميةَ التحرك الكلية صفرٌ. وبعد التفكك، يجب أن يكون متجه كمية التحرك الكلية أيضًا صفرًا، وأنّ مقدار كمية التحرك لجُسيم α يجب أن يساوي مقدار كمية التحرك للنواة الوليدة. (الشكل 6-30):

$$m_\alpha v_\alpha = m_D v_D$$

وهكذا، فإنّ $v_\alpha = m_D v_D / m_\alpha$ وتكون الطاقة الحركية لجُسيم α

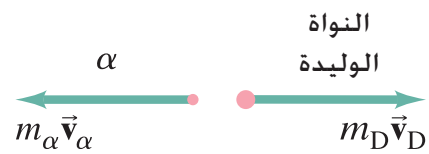
$$KE_\alpha = \tfrac{1}{2} m_\alpha v_\alpha^2 = \tfrac{1}{2} m_\alpha \left(\frac{m_D v_D}{m_\alpha}\right)^2 = \tfrac{1}{2} m_D v_D^2 \left(\frac{m_D}{m_\alpha}\right) = \left(\frac{m_D}{m_\alpha}\right) KE_D$$

$$= \left(\frac{228.028731\ u}{4.002603\ u}\right) KE_D = 57 KE_D$$

طاقة التفكك الكلية هي $Q = KE_\alpha + KE_D = 57KE_D + KE_D = 58KE_D$

وبالتالي فإنّ $KE_\alpha = \frac{57}{58} Q = 5.3\ MeV$

أي أنّ جُسيم α يحمل تقريبًا (57/58)، أو 98 % من الطاقة الحركية الكلية KE.



الشكل 6-30 حفظ كمية التحرك في (مثال 7-30)

لماذا جُسيم α؟

قد تستغرب لماذا تصدر الأنوية هذه المجموعة المكونة من أربعة نيوكلونات، تُسَمّى جُسيم α. لماذا لا تصدر أربعة نيوكلونات منفصلة فقط، أو نيوكلونا واحدًا؟ الإجابة، هي أنّ جُسيم α مقيد بشكل قوي. لذا، فإنّ كتلته أقلّ بشكل ملحوظ من كتلة أربعة نيوكلونات منفصلة. كما رأينا في (المثال 3-30)، فإنّ الكتلة الكلية لبروتونين ونيوترونين بشكل منفصل تساوي 4.032980 u تقريبا(بما في ذلك الإلكترونات).

إنّ الكتلة الكلية لِـ $^{228}_{90}Th$ زائد أربعة نيوكلونات منفصلة تساوي 232.061711 u، وهي أكبر من كتلة النواة الأم (232.037146). مثل هذا الاضمحلال لا يمكن أن يحدث لأنّه ينتهك قانون حفظ الطاقة. وتقريبًا، فإنّ انبعاث نيوكلون واحد غير محتمل من وجهة نظر تتعلق بالطاقة، صحيح دائمًا.

تطبيق- الكواشف الدخانية

تطبيق الفيزياء
كاشف الدخان

يُعدّ كاشف الدخان المألوف أحد التطبيقات واسعة الانتشار للفيزياء النووية والموجودة في كلّ منزل تقريبًا. يحتوي النوع الأكثر شيوعًا منه على حوالي 0.2 mg من نظير الامريشيوم $^{241}_{95}Am$ بصورة AmO_2. تعمل الإشعاعات بشكل متواصل على تأين جزيئات الأكسجين والنيتروجين الموجودة في الهواء بين لوحين متقابلين ومشحونين. وتسبب الموصلية الناتجة من ذلك حدوث تيار مستمر صغير. إذا دخل الدخان إلى الكاشف، فإنّ الإشعاعات تمتص بواسطة جُسيمات الدخان بدلًا من جزيئات الهواء ممّا يتسبب بانخفاض التيار. يكتشف هبوط التيار عن طريق الدارة الإلكترونية الموجودة في الجهاز والتي تصدر صوتًا منبها. إنّ الإشعاعات التي تفلت من كاشف الدخان السليم أقلّ بكثير من خلفية الإشعاع الطبيعي. لذا، فإنّها لاتعدّ ضارة نسبيًّا. ولهذا، فإنّ الكواشف الدخانية تحمي الأرواح، وتقلّل من تلف الممتلكات.

5-30 اضمحلال بيتا

اضمحلال β^-

يحدث تحويل العناصر أيضًا عندما تتفكك نواة بواسطة اضمحلال β؛ أي مع انبعاث إلكترون أو جُسيم β^-. على سبيل المثال، تصدر نواة $^{14}_{6}\mathrm{C}$ إلكترونا عند اضمحلالها:

$$^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \mathrm{e}^- + \text{نيوترينو}$$

حيث يشير الرمز e^- إلى الإلكترون. (يستخدم أحيانًا الرمز $^{0}_{-1}\mathrm{e}$ للإلكترون الذي شحنته $Z = -1$، وبما أنّه ليس نيوكلونا، وكتلته صغيرة جدًّا فإنّ $A = 0$.) إنّ الجُسيم المسمى نيوترينو، وشحنته $q = 0$، وكتلة سكونه صغيرة جدًّا أو صفر، لم يكتشف في البداية، وافترض وجوده أخيرًا فقط كما سنرى لاحقًا في هذا البند. لا يفقد أيّ من النيوكلونات عندما ينبعث إلكترون، ويبقى العدد الكلي للنيوكلونات A في النواة الوليدة كما هو في النواة الأم. ولكن، بما أنّ الإلكترون صدر من النواة نفسها، فإنّ الشحنة على النواة الوليدة أكبر بواحد من تلك التي على النواة الأم. لاحظ أنّ العدد الذري للنواة الأم في التفكك المبين في المعادلة أعلاه هو $Z = +6$. لذا، وبالرجوع إلى قانون حفظ الشحنة يجب أن تكون شحنة النواة الناتجة $+7e$. وعليه، يكون العدد الذري للنواة الوليدة $Z = 7$، وهو عنصر النيتروجين.

يجب ملاحظة أنّ الإلكترون الذي ينبعث في أثناء اضمحلال β ليس إلكترونًا مداريًّا، ولكنّه يخلق داخل النواة نفسها. أمّا الذي يحدث حقيقة، فهو أنّ أحد النيوترونات يتحول إلى بروتون، وخلال هذه العملية (لحفظ الشحنة) ينبعث إلكترون. وبالفعل، لقد وجد أنّ النيوترونات الحرة تتحلل في الحقيقة كما يلي:

$$\mathrm{n} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{e}^- + \text{نيوترينو}$$

وبما أنّ الإلكترونات التي تنبعث في أثناء اضمحلال β تنشأ داخل النواة، فإنّها تُسَمّى جُسيمات β بدلا من إلكترونات، كي نتذكر منشأها فقط. وبالرغم من ذلك فهي لا تختلف عن الإلكترونات المدارية.

⚠ تنويه:
يصدر الإلكترون من النواة في أثناء اضمحلال β
(ولكنه ليس إلكترونًا مداريًا)

المثال 30-8 الطاقة الناتجة من اضمحلال $^{14}_{6}\mathrm{C}$.

كم الطاقة التي تنبعث عند اضمحلال $^{14}_{6}\mathrm{C}$ إلى $^{14}_{7}\mathrm{N}$ بواسطة انبعاث جُسيم β؟

النّهج: نجد الفرق في الكتلة Δm قبل الاضمحلال وبعده. الطاقة المنبعثة هي $E = (\Delta m)c^2$. الكتل المعروضة في الفهرس B هي للذرات المتعادلة. لذا، يجب تعقب الإلكترونات التي تشتمل عليها. إذا افترضت بأنّ 6 إلكترونات تدور حول النواة الأم، فستكون متعادلة، وتكون كتلتها 14.003242 u. النواة الوليدة في هذا الاضمحلال $^{14}_{7}\mathrm{N}$ ليست متعادلة؛ لأنها تمتلك 6 إلكترونات مدارية تدور حولها، ولكن شحنة النواة $+7e$. على أيّ حال، إنّ كتلة هذه النواة الوليدة مع ستة إلكترونات زائد كتلة الإلكترون المنبعث (سبعة إلكترونات) تساوي تمامًا كتلة ذرة النيتروجين المتعادلة.

⚠ تنويه:
يجب أخذ الحذر بالنسبة للكتل الذرية والإلكترونات في أثناء اضمحلال β

الحلّ: الكتلة الكلية في المرحلة النهائية تساوي

(كتلة نواة $^{14}_{7}\mathrm{N}$ + 6 إلكترونات) + (كتلة إلكترون واحد) وهذا يساوي

كتلة $^{14}_{7}\mathrm{N}$ المتعادلة (بما في ذلك 7 إلكترونات)

ومن(الفهرس ب) ، نجد أنّ هذه الكتلة تساوي 14.003074 u. ولهذا، فإنّ الفرق في الكتلة

$$14.003242\ \mathrm{u} - 14.003074\ \mathrm{u} = 0.000168\ \mathrm{u}$$

وهذا يكافىء طاقة مقدارها

$$\Delta m\, c^2 = (0.000168\ \mathrm{u})(931.5\ \mathrm{MeV/u}) = 0.156\ \mathrm{MeV}$$

أو ما يعادل 156 keV

ملحوظة: لا يساهم النيوترينو في اتزان الكتلة أو الشحنة؛ لأنّ $q = 0$، و $m \approx 0$

الشكل 30-7 ساهم إنريكو فيرمي بفاعلية في الفيزياء النظرية والتجريبية، وقام بأعمال فذة قلّ نظيرها في العصر الحديث.

نسبة إلى (المثال *30-8*)، نتوقع أن يمتلك الألكترون المنطلق طاقه حركيه مقدارها *156 keV*. (وبما أن كتلة النوتة الابنة (الجديدة) أكبر أقلّ بكثيرٍ من كتلة الإلكترون، فإنّها ترتدُّ بسرعةٍ قليلةٍ جدًّا، وتحصل على مقدار ضئيل من الطاقة الحركية). وفي الحقيقة، فإنّ القياسات الدقيقة تشير إلى أنّ الطاقة الحركية لعدد قليل من جُسيمات β المنبعثة تكون قريبة من القيمة التي حسبناها. إلا أنّ طاقة الغالبية العظمى من الإلكترونات المنبعثة أقلّ من ذلك نوعًا ما. وفي الواقع، فإنّ طاقة الإلكترون المنبعث يمكن أن تأخذ أيّ قيمة بين صفر وحتى قيمة قصوى كما تم حسابها أعلاه. لقد وجد أنّ مجال الطاقة الحركية هذا يصاحب أيّ اضمحلال لجُسيمات β، كما لو أنّه حدث انتهاك لقانون حفظ الطاقة. وبالفعل، فإنّ العالِمَ بور أخذ هذه الاحتمالية بالحسبان. كما تشير نتائج التجارب الدقيقة إلى أنّ حفظ كمية التحرك الخطية وكمية التحرك الزاوية لم يتحققا، ممّا أدّى إلى قلق الفيزيائيّين من احتمالية التخلي عن هذه القوانين، والتي طبقت بشكل جيد في الحالات السابقة كلها. وفي عام 1930، اقترح العالِمُ ولفجانغ باولي حلاًّ بديلا يتمثّل في احتمالية انبعاث جُسيم جديد مع الإلكترون في أثناء اضمحلال β، ولكن من الصعب الكشف عنه. يحمل هذا الجُسيم الافتراضي الطاقة وكمية التحرك الخطية، والزاوية اللازمة للمحافظة على قوانين الحفظ التي ذكرناها سابقًا. هذا الجُسيم الجديد المسمى **نيوترينو** – أي، جُسيم صغير متعادل – اقترح من قبل الفيزيائي الإيطالي العظيم إنريكو فيرمي (1901-1954، الشكل 30-7) الذي وضع نظرية اضمحلال بيتا بالتفصيل. (افترض فيرمي في هذه النظرية وجود قوة رابعة في الطبيعة تدعى القوةَ النوويةَ الضعيفةَ) شحنة النيوترينو صفر ومغزليته $\frac{1}{2}\hbar$، وكان يعتقد لفترة طويلة أنّ كتلة السكون له صفر، على الرغم من أنّه في الوقت الحاضر يبدو أنّ هناك احتمالية أن تكون كتلة السكون له صغيرة جدًّا ($< 0.6\ \mathrm{eV}/c^2$). وإذا كانت كتلة السكون له صفرًا، فإنه يشبه إلى حد كبير الفوتون من حيث إنه متعادل ويسير بسرعة الضوء، ولكن الكشف عن النيوترينو يعدّ أكثر صعوبة. وفي عام 1956، قدمت التجارب المعقدة التي أجريت على النيوترينو دليلًا إضافيًّا على وجوده، ولكن في ذلك الوقت، كان أكثر الفيزيائيين قد قبل بوجوده.

اضمحلال β^-

إنّ الرمز الذي يستخدم للدلالة على النيوترينو هو الحرف اللاتيني نيو (ν). وهكذا، فإنّ الطريقة الصحيحة لكتابة اضمحلال $^{14}_{6}\mathrm{C}$ تصبح كما يلي:

$$^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}$$

تدل الإشارة ($^-$) التي فوق الرمز ν على ضديد النيوترينو (النيوترينو الضدّ). (لماذا يُسَمّى هذا ضديد النيوترينو بدلًا من النيوترينو؟ هذا ما سوف نناقشة في الفصل 32، فلا داعي للاهتمام بهذا الآن)

اضمحلال β^+

يحدث اضمحلال العديد من النظائر عن طريق انبعاث إلكترون.

تحتوي مثل هذه النظائر دائمًا على عدد كبير من النيوترونات مقارنة مع عدد البروتونات. أي أنّ هذه النظائر تقع بعد النظائر المستقرة التي تم رسمها في (الشكل 30-2). ولكن ماذا عن النظائر غير المستقرة التي تحتوي على عدد قليل من النيوترونات مقارنة مع عدد البروتونات؛ أي التي تقع أسفل النظائر المستقرة الواردة في (الشكل 30-2)؟ لقد تبين أنها تضمحل بإصدار بوزترون بدلا من إلكترون. إنّ كتلة **البوزترون** (يُسَمّى أحيانًا جُسيم β^+ أو e^+) هي كتلة الإلكترون نفسها، ولكن شحنته موجبة $+1e$. وبما أنّه يشبه الإلكترون إلى حدّ كبير باستثناء شحنته، فإنّه يُسَمّى **جُسيمًا ضديدًا** للإلكترون*. كمثال على اضمحلال β^+ هو $^{19}_{10}\mathrm{Ne}$ كما يلي:

اضمحلال البوزترون β^+

$$^{19}_{10}\mathrm{Ne} \rightarrow {}^{19}_{9}\mathrm{F} + \mathrm{e}^+ + \nu$$

حيث يدل الرمز e^+ (أو $^0_1\mathrm{e}$) على البوزترون. لاحظ أنّ ν المنبعث هنا هو النيوترينو، في حين أنّ ذاك المنبعث في اضمحلال β^- هو ضديد النيوترينو. وهكذا ينبعث ضديد إلكترون (بوزترون) مع النيوترينو، في حين ينبعث ضديد النيوترينو مع إلكترون، وهو ما يضمّن اتزانًا معينًا كما سيناقش في (الفصل 32).

* جرت مناقشته في (الفصل 32). باختصار، كتلة ضديد الجُسيم هي كتلة الجُسيم المقابل نفسها، ولكن الشحنة معاكسة.

بصورةٍ عامة، يمكننا كتابة اضمحلال β^- و β^+ كما يلي:

$$^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{N}' + \mathrm{e}^- + \bar{\nu} \qquad [\text{اضمحلال } \beta^-]$$

$$^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{N}' + \mathrm{e}^+ + \nu \qquad [\text{اضمحلال } \beta^+]$$

حيث N النواة الأم و N′ النواة الوليدة.

الأسر الإلكتروني

إضافة إلى انبعاث جُسيمات β^- و β^+، هناك عملية أخرى تحدث عندما تمتصّ النواة أحد إلكتروناتها المدارية. تُسَمّى هذه العمليةُ **الأسرَ الإلكترونيّ** (تكتب اختصارا EC كما في الفهرس B). وكمثال على ذلك $^{7}_{4}\mathrm{Be}$ الذي يصبح نتيجة لأسر إلكترون. تكتب $^{7}_{3}\mathrm{Li}$ هذه العملية كما يلي:

الأسْر الإلكترونيّ

$$^{7}_{4}\mathrm{Be} + \mathrm{e}^- \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + \nu$$

أو بشكل عام

$$^{A}_{Z}\mathrm{N} + \mathrm{e}^- \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{N}' + \nu \qquad \text{(التقاط الالكترون)}$$

يتمّ أسر الإلكترون غالبًا من الإلكترونات المدارية القريبة من النواة، أي من المدار K، ويُسَمّى في هذه الحالة "الأسر K". يختفي الإلكترون في هذه العملية، ويتحول بروتون داخل النواة إلى نيوترون، ومن ثمَّ ينبعث نيوترينو نتيجة لذلك. وقد استدل على هذه العملية تجريبيًّا بكشف أشعة X المنبعثة (نتيجة لقفز إلكترونات أخرى لملء الفراغ في المدار الذي أُسر منه الإلكترون) ذات الطاقة المحددة.

أسْر K-

في اضمحلال β، تؤدّي القوة النووية الضعيفة دورًا مهمًّا، حيث يتفاعل النيوترينو مع المادة فقط من خلال هذه القوة، وهو ما يفسّر صعوبة الكشف عنه.

6-30 اضمحلال جاما

إشعاعات جاما هي عبارة عن فوتونات طاقتها عالية جدًّا. تنشأ هذه الإشعاعات من اضمحلال نواة عنصر ما، تمامًا كانبعاث الفوتونات من ذرة متهيجة. وكالذرة تمامًا، قد تكون النواة في حالة تهيج. وعندما تنتقل إلى حالة أقلّ طاقة (أقلّ تهيّجًا) أو إلى الحالة الأرضية، فإنها تبعث فوتونًا نسميه أشعة γ.

إنّ مستويات الطاقة المتاحة للنواة بعيدة عن بعضها كثيرًا مقارنة مع تلك التي للذرة؛ فهي من رتبة keV، أو MeV مقارنة مع عدة eV بالنسبة للإلكترونات في الذرة. وهكذا، فإنّ الفوتونات المنبعثة تمتلك طاقات تتراوح بين بعض keV إلى عدة MeV. وبالنسبة إلى اضمحلال ما، فإنّ أشعة جاما لها دائمًا الطاقة نفسها. وبما أنّ أشعة γ لا تحمل شحنة، فإنه لا يحدث تغير في العنصر نتيجة لانبعاث أشعة جاما.

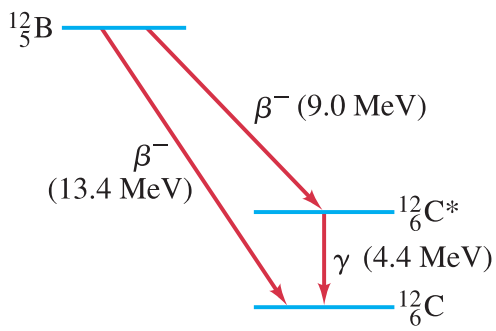
كيف تصبح النواة في حالة تهيّج؟ قد يحدث ذلك بسبب تصادم قويّ مع جُسيم آخر. أمّا السبب الأكثر شيوعًا فهو بقاء النواة بعد اضمحلال مشع سابق في حالة تهيج، كما هو موضح في مخطط مستوى الطاقة المبين في (الشكل 30-8). يمكن أن تضمحل نواة العنصر $^{12}_{5}\mathrm{B}$ مباشرة إلى الحالة الأرضية للعنصر $^{12}_{6}\mathrm{C}$ عن طريق انبعاث جُسيم β، أو يمكن أن تنتقل إلى حالة التهيج للعنصر $^{12}_{6}\mathrm{C}$ بانبعاث جُسيم β ثم تضمحل إلى الحالة الأرضية عن طريق انبعاث أشعة γ طاقتها 4.4 MeV

يمكن كتابة انبعاث أشعة جاما كما يلي:

$$^{A}_{Z}\mathrm{N}^* \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{N} + \gamma \qquad [\text{انبعاث } \gamma]$$

حيث تعنى علامة النجمة "حالة التهيج" لتلك النواة.

الشكل 30-8 يبين مخطط مستوى الطاقة كيفية اضمحلال نواة العنصر $^{12}_{5}\mathrm{B}$ إلى الحالة الأرضية للعنصر $^{12}_{6}\mathrm{C}$ عن طريق انبعاث جُسيم β (الطاقة الكلية المتحررة = 13.4 MeV) أو يمكن أن يؤدي انبعاث جُسيم β إلى حالة التهيج لنواة العنصر $^{12}_{6}\mathrm{C}$ (يشار إليها بالنجمة) والتي بدورها تضمحل إلى حالتها الأرضية بانبعاث أشعة جاما طاقتها 4.4 MeV.



*الأيسومر؛ التحول الداخلي

قد تبقى النواة أحيانًا في حالة التهيج لبعض الوقت قبل أن تبعث أشعة γ. عندئذ، يقال للنواة بأنها في **حالة شبه مستقرة** وتُسَمّى حينها **الأيسومر**. وأحيانًا، قد تعود النواة المهيجة إلى الحالة الأرضية بواسطة عملية أخرى تعرف بـ**"التحول الداخلي"** دون أن تبعث أشعة γ. تتفاعل النواة المتهيجة في هذه العملية مع أحد الإلكترونات المدارية، وتقذف به خارج الذرة بالطاقة الحركية نفسها (ناقص طاقة الترابط للإلكترون) التي كان يمكن أن تنبعث بها أشعة γ.

التحول الداخلي

ما الفرق بين كلّ من أشعة γ وX؟ كلتاهما إشعاعات كهرومغناطيسية (فوتونات). ومع أنّ إشعاعات γ تمتلك عادةً طاقة أعلى من تلك التي لإشعاعات X، إلا أنّ مدى الطاقات متداخل نوعًا ما. والفرق هنا ليس جوهريًّا، حيث نستعمل مصطلح أشعة X إذا نتج الفوتون من تفاعل إلكترون مع الذرة، أمّا إذا نتج الفوتون من عملية نووية، فنستعمل مصطلح أشعة γ.

7-30 حفظ عدد النيوكلون وقوانين حفظ أخرى

في الأنواع الثلاثة للاضمحلال الإشعاعي، تبقى قوانين الحفظ التقليدية صحيحة. الطاقة، كمية التحرك الخطية، وكمية التحرك الزاوية، والشحنة الكهربائية جميعها محافظة. هذه الكميات تبقى قبل الاضمحلال وبعده كما هي. ولكن هناك قانون آخر للحفظ هو **قانون حفظ عدد النيوكلونات**. بناءً على هذا القانون، فإنّ عدد النيوكلونات (A) يبقى ثابتًا في أيّ عملية، بالرغم من أنّ أحد النوعين قد يتغير إلى النوع الآخر (بروتونات إلى نيوترونات أو العكس). ويجب أنّ يتحقق هذا القانون في الأنواع الثلاثة للاضمحلال. يعرض (الجدول 30-2) ملخصًا لباعثات α، و β، و γ.

الجدول 30-2 الأنواع الثلاثة للاضمحلال الإشعاعي

اضمحلال α:

$$^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{N}' + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

اضمحلال β:

$$^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}\mathrm{N}' + e^{-} + \bar{\nu}$$

$$^{A}_{Z}\mathrm{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{N}' + e^{+} + \nu$$

$$^{A}_{Z}\mathrm{N} + e^{-} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}\mathrm{N}' + \nu\ [\mathrm{EC}]^{*}$$

اضمحلال γ:

$$^{A}_{Z}\mathrm{N}^{**} \rightarrow {}^{A}_{Z}\mathrm{N} + \gamma$$

* الأسر الإلكترونيّ
** تشير إلى حالة التهيج للنواة

8-30 عمر النصف ومعدل الاضمحلال

تحتوي العينة الجاهزة لأيّ نظير مشع على عدد كبير من الأنوية المشعة. وهذه الأنوية لا تضمحل في وقت واحد، وإنما على مدى فترة زمنية. وتُعدّ هذه عملية عشوائية؛ لإنّنا لا نستطيع التنبؤ بالنواة التي سوف تضمحل بصورة مؤكّدة. لكنّنا نستطيع التحديد تقريبًا - على أساس احتمالي- عدد الأنوية التي سوف تضمحل في عينة ما على مدى فترة زمنية معينة، بافتراض أنّ كلّ نواة لها احتمالية الاضمحلال نفسها في كلّ ثانية توجد فيها في العينة.

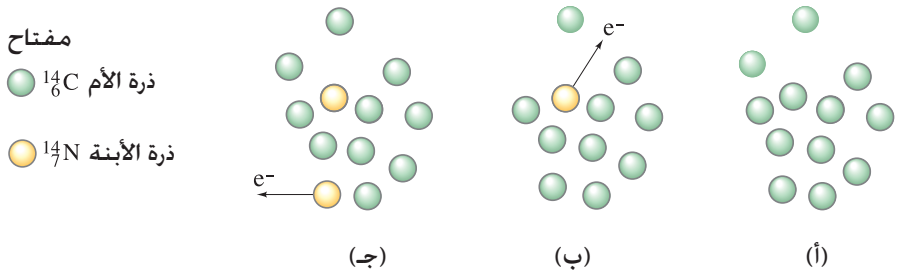
يتناسب عدد الاضمحلالات ΔN الذي يحدث خلال فترة زمنية Δt قصيرة جدًّا مع Δt، وكذلك مع العدد الكلي N للأنوية المشعة الموجودة في العينة:

$$\Delta N = -\lambda N\, \Delta t \qquad \text{(أ 3-30)}$$

حيث تعني الإشارة السالبة أنّ عدد الأنوية N يقل مع الزمن. سنعيد الآن كتابة هذه المعادلة لنحصل على معدل الاضمحلال ونهمل إشارة السالب.

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \qquad \text{(ب3-30)}$$

في هاتين المعادلتين، يمثل الرمز λ ثابت تناسب يُسَمّى **ثابت الاضمحلال**. وهو يختلف من نظير إلى آخر. كلّما زادت قيمة λ، كان معدل الاضمحلال $(\Delta N/\Delta t)$ أكبر، وتزداد بذلك الشدة الإشعاعية لذاك النظير. ويُرمز إلى عدد الاضمحلال الذي يحدث خلال فترة زمنية Δt قصيرة بالرمز ΔN لأنّ كلّ اضمحلال يحدث يؤدي إلى نقصان عدد الأنوية N الموجودة بمقدار واحد صحيح. أي أنّ الاضمحلال الإشعاعيّ عملية ذات محاولة واحدة، (الشكل 30-9). أي أنه حالما تضمحل النواة الأم إلى النواة الوليدة فإنّها لا تستطيع القيام بذلك مرّةً أخرى.



الشكل 30-9 تضمحل الأنوية المشعة واحدة تلو الأخرى. وهكذا يقل عدد الأنوية الأم الموجودة في العينة بشكل مستمر. عندما تبعث نواة $^{14}_{6}\mathrm{C}$ إلكترونا، فإنها تصبح نواة $^{14}_{7}\mathrm{N}$.

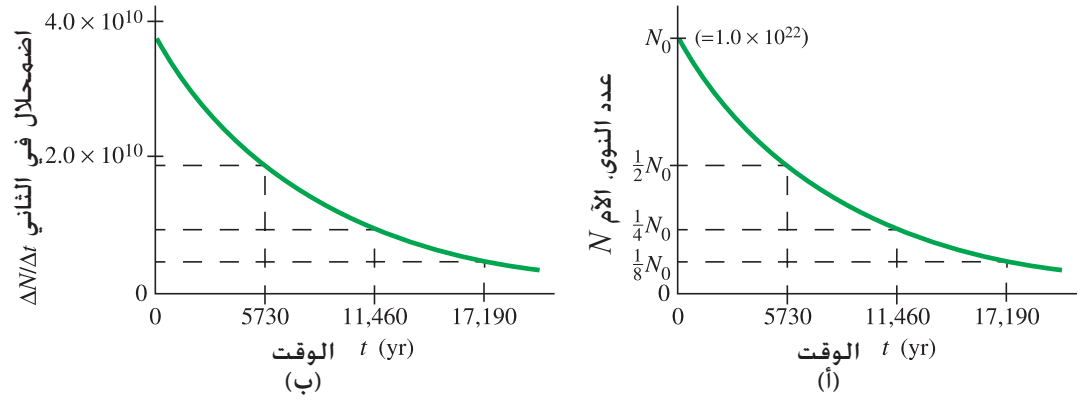
الاضمحلال الأسّيّ

يمكن حلّ (المعادلة 30-3 (أ) أو (ب)) بالنسبة إلى N (باستعمال حساب التفاضل والتكامل) لنحصل على النتيجة التالية:

قانون الاضمحلال الإشعاعيّ

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \textbf{(4-30)}$$

حيث N_0 عدد الأنوية المجودة في العينة عند اللحظة $t = 0$. أمّا N فيشير إلى عدد الأنوية المتبقية في العينة بعد مرور زمن معين t. يمثل الرمز e الأساس الطبيعي (مرّ معنا في البندين 19-6 و 21-11) وقيمته $e = 2.718\cdots$. وهكذا فإنّ عدد الأنوية الأم الموجود في العينة يتناقص أسّيًّا مع الزمن كما هو مبين في (الشكل 30-10أ) بالنسبة لاضمحلال $^{14}_{6}\mathrm{C}$. تُسَمّى (المعادلة 30-4) قانون الاضمحلال الإشعاعيّ.



الشكل 30-10 (أ) يتناقص عدد الأنوية الأم N في عينة $^{14}_{6}\mathrm{C}$ أسّيًّا مع الزمن. (ب) يتناقص أيضًا عدد الاضمحلالات لكلّ ثانية أسّيًّا مع الزمن. عمر النصف لـِ $^{14}_{6}\mathrm{C}$ يساوي 5730 سنة، وهذا يعني أنّ عدد الأنوية الأم N ومعدّل الاضمحلال $\Delta N/\Delta t$ يتناقص كلّ منهما بمقدار النصف كلّ5730 سنة.

يُسَمّى عددُ الاضمحلالات لكلّ ثانية الشّدّةَ الإشعاعيةَ للعينة (أو معدل الاضمحلالات).
وبما إنّ $\Delta N/\Delta t$ يتناسب مع N (انظر إلى المعادلة 30-3 ب) فإنّه يتناقص أسّيًّا أيضًا بالمقدار نفسه مع مرور الزمن. (الشكل 30-10 ب). تُعطى الشدة الإشعاعية عند اللحظة t بالعلاقة التالية:

الشّدّة الإشعاعية

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t} \qquad \textbf{(5-30)}$$

حيث تمثل $(\Delta N/\Delta t)_0$ الشدة الإشعاعية عند اللحظة $t = 0$.

عمر النصف

يحدد معدل الاضمحلال لأيّ نظير بدلالة عمر النصف للنظير بدلًا من ثابت الاضمحلال λ غالبًا. يعرف **عمر النصف للنظير** على أنّه الزمن الذي تستغرقه نصف أنويته الأم حتى تضمحل. فعلى سبيل المثال، عمر النصف لـِ $^{14}_{6}\mathrm{C}$ حوالي 5730 سنة. فإذا كان عدد الأنوية الموجودة في قطعة خشب متحجرة في لحظة ما يساوي مثلًا 1.00×10^{22} نواة للنظير $^{14}_{6}\mathrm{C}$، فإنّها سوف تحتوي على 0.50×10^{22} من هذه الأنوية بعد مرور 5730 سنة. وبعد مرور 5730 سنة أخرى سوف تحتوي على 0.25×10^{22} من هذه الأنوية، وهكذا. وهذا موضح في (الشكل 30-10 أ). وبما أنّ معدل الاضمحلال $\Delta N/\Delta t$ يتناسب مع N، فإنه يتناقص أيضًا بعامل 2 كلّ عمر نصف (الشكل 30-10 ب).
تتراوح أعمار النصف للنظائر المشعة المعروفة من 10^{-22} s إلى حوالي 10^{28} s (حوالي 10^{21} سنة). أعمار النصف للعديد من النظائر معطاة في الفهرس B. ويجب أن يكون واضحًا بأنّ عمر النصف (الذي يرمز إليه $T_{\frac{1}{2}}$) يرتبط بعلاقة عكسية مع ثابت الاضمحلال.
وكلّما كان عمر النصف للنظير أطول (كبير) قلّ اضمحلاله. وبالتالي، فإنّ λ صغير. وبالعكس، فإنّ عمر النصف للنظائر النشطة (λ كبير) قصير جدًّا. وتكتب العلاقة التي تربط بين عمر النصف وثابت الاضمحلال كما يلي:

عمر النصف

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad \textbf{(6-30)}$$

وقد قمنا باشتقاق هذه العلاقة في الدرس الاختياري اللاحق.

* اشتقاق الصيغة الرياضية لعمر النصف، متوسط العمر

يمكننا اشتقاق (المعادلة 30-6) بالبدء من (المعادلة 30-4). وتعويض $N = N_0/2$ عندما $t = T_{\frac{1}{2}}$ وبالتالي

إذن
$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}} = 2$$

بأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة ($\ln$ و e عمليات عكسيّة. أي إنّ $\ln(e^x) = x$) نجد أنّ:

$$\ln\left(e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}}\right) = \ln 2$$

وهكذا فإنّ:

$$\lambda T_{\frac{1}{2}} = \ln 2 = 0.693$$

و
$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

وهذه هي (المعادلة 30-6).

يمكننا أيضًا إيجاد متوسط العمر للنظير المشع. يُعرّف متوسط العمر على أنه $\tau = 1/\lambda$، بحيث تكتب (المعادلة 30-4) كما يلي: $N = N_0 e^{-t/\tau}$ تمامًا كما هو الحال بالنسبة لدارات RC، و LR (الفصلان 19 و 21) حيث يُسَمّى τ ثابت الزمن. وعليه، فإنّ متوسط العمر (انظر أيضًا المعادلة 30-6).

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{\frac{1}{2}}}{0.693}$$

تختلف القيمة العددية لعمر النصف عن تلك التي لمتوسط العمر، أي أنّ الخلط بينهما يمكن أن يتسبب بخطأ فادح.

9-30 حسابات تشتمل على معدلات الاضمحلال وعمر النصف

دعنا الآن نفترض بعض الأمثلة، وما الذي يمكن أن نحدّده بالنسبة لعيّنةِ مادةٍ مشعّةٍ إذا عرفنا عمر النصف.

المثال 9-30 الشّدّة الإشعاعية للعينة

يبلغ عمر النصف للنظير $^{14}_{6}C$ 5730 سنة. إذا كان عدد أنوية الكربون 14- الموجودة في عينة في لحظة ما يساوي 1.00×10^{22}، فما الشّدّة الإشعاعية للعينة.

النّهج: نستعمل أولاً عمر النصف لإيجاد ثابت الاضمحلال (المعادلة 30-6). ثم نستعمله لإيجاد الشّدّة الإشعاعية من (المعادلة 30-3 ب). عدد الثواني في السنة الواحدة يساوي

$$(60)(60)(24)\left(365\tfrac{1}{4}\right) = 3.156 \times 10^7\ \text{s}$$

الحلّ: من (المعادلة 30-6)، نجد ثابت الاضمحلال λ

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}} = \frac{0.693}{(5730\ \text{yr})(3.156 \times 10^7\ \text{s/yr})} = 3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1}$$

ومن (المعادلة 30-3ب)، نجد أنّ مقدار الشّدّة الإشعاعية أو معدل الاضمحلال يساوي

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = (3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1})(1.00 \times 10^{22})$$
$$= 3.83 \times 10^{10}\ \text{decays/s}.$$

لاحظ أنّ الرسم البياني الذي في (الشكل 30-10 ب) يبدأ من هذه القيمة مقابل القيمة الأصلية البالغة $N = 1.0 \times 10^{22}$ نواة في (الشكل 30 - 10 أ).

ملحوظة: تُكتب الوحدة اضمحلال/ ثانية (decays/s) غالبًا بشكل أبسط هكذا s^{-1}؛ لأنّها ليست وحدة قياس، ولكنها تشير فقط إلى عدد. تُسَمّى هذه الوحدة البسيطة للشدة الإشعاعية بـ "بيكريل": 1 Bq = 1 اضمحلال/ ثانية، كما جرت مناقشته في (الفصل 31).

التمرين جـ: حدّد ثابت الاضمحلال للراديوم $(T_{\frac{1}{2}} = 1600\ \text{yr})$

المثال المفاهيمي 30-10 **السلامة: الشّدّة الإشعاعية مقابل عمر النصف**

قد يُعتقد أنّ المادة التي عمرها النصفي قصير أكثر أمانًا من المادة التي عمرها النصفي طويل لأنّها لا تدوم طويلًا. هل هذا تمثيل دقيق لهذه الحالة؟

الإجابة: لا؛ لأنّ العمر النصفي القصير يعني أنّ الشّدّة الإشعاعية عالية. لذا، تزداد الخطورة. ومن جهة أخرى، فإنّ العمر النصفي القصير يعني أنّ المادة كلّها سوف تضمحل بمستوى منخفض. ولحجم العينة N نفسها، فإنّ المادة التي عمرها النصفي قصير تعني أنّ الشدة الإشعاعية أكثر، ولكن لفترة زمنية قصيرة.

التمرين د: يبلغ عمر النصف للنظير $^{60}_{27}\text{Co}$ الذي يستخدم في المستشفيات للعلاج الإشعاعيّ 5.3 سنة. إذا اشترت إحدى المستشفيات عيّنة $^{60}_{27}\text{Co}$، فهل ستتلاشى هذه العيّنة خلال 10.6 سنة (ضعف عمر النصف)؟

مثال إضافي

المثال 30-11 **عينة مشعة من $^{13}_{7}\text{N}$.**

يحتوي مختبر على $1.49\ \mu\text{g}$ من $^{13}_{7}\text{N}$ النقي، والذي يبلغ عمر النصف له $10.0\ \text{min}\ (600\ \text{s})$. (أ) كم عدد الأنوية الموجودة بداية في هذه العينة؟ (ب) ما الشدة الإشعاعية الابتدائية للعينة؟ (جـ) ما الشدة الإشعاعية للعينة بعد $1.00\ \text{h}$؟ (د) على نحو تقريبيّ، ما الزمن اللازم لانخفاض الشدة الإشعاعية للعينة إلى أقل من واحد لكل ثانية $(1\ \text{s}^{-1})$؟.

النّهج: نستخدم تعريف المول وعدد أفوجادرو (البندان 13-7 و 9-13) لإيجاد عدد الأنوية في(أ). أمّا بالنسبة إلى الفرع (ب) فنحصل على λ من عمر النصف الوارد في المثال، ونستخدم(المعادلة 30-3 ب) لإيجاد الشدة الإشعاعية. ولحلّ الفرعين (ج) و(د)؛ نستعمل (المعادلة 30-5) و/ أو عمل جدول للزمن.

الحلّ: (أ) الكتلة الذرية 13.0. لذا، فإنّ $13.0\ \text{g}$ تحتوي على 6.02×10^{23} نواة (عدد أفوجادرو). وبما أنّ كتلة العينة التي لدينا تساوي $1.49 \times 10^{-6}\ \text{g}$، فإنّ عدد الأنوية N_0 الموجودة بداية في العينة تعطى حسب النسبة الآتية:

$$\frac{N_0}{6.02 \times 10^{23}} = \frac{1.49 \times 10^{-6}\ \text{g}}{13.0\ \text{g}}$$

وعليه، فإنّ $N_0 = 6.90 \times 10^{16}$ نواة.

(ب) من (المعادلة 30-6)، $\lambda = (0.693)/(600\ \text{s}) = 1.16 \times 10^{-3}\ \text{s}^{-1}$.

وهكذا عندما $t = 0$ نجد من (المعادلة 30-3 ب) أنّ

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 = \lambda N_0 = (1.16 \times 10^{-3}\ \text{s}^{-1})(6.90 \times 10^{16}) = 8.00 \times 10^{13}\ \text{decays/s}$$

(جـ) عمر النصف يساوي 10.0 min. لذا، فإنّ معدّلَ الاضمحلال يتناقص بمقدار النصف كلّ 10.0 min. يمكننا عمل جدول للشدة الإشعاعية (كما هو موضح في الهامش) بعد فترات زمنية معينة. وبعد 1.0 h، تصبح الشدة الإشعاعية $1.25 \times 10^{12}\ \text{decays/s}$.

الزمن (دقيقة)	الشّدّة الإشعاعية (اضمحلال/ ثانية)
0	8.00×10^{13}
10	4.00×10^{13}
20	2.00×10^{13}
30	1.00×10^{13}
40	0.500×10^{13}
50	0.250×10^{13}
60	0.125×10^{13}

حلّ بديل سهل (ج): 60 دقيقة تعني 6 أضعاف عمر النصف. لذا، فإنّ الشدة الإشعاعية سوف تنخفض إلى $\frac{1}{64} = \left(\frac{1}{2}\right)^6 = \left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)\left(\frac{1}{2}\right)$ من قيمتها الأصلية، أو $(8.00 \times 10^{13})/(64) = 1.25 \times 10^{12}$ لكلّ ثانية.

حلّ بديل عام (جـ): الطريقة العامة لإيجاد الشدة الإشعاعية التي تطبق حتى عندما لا يكون الزمن من المضاعفات الصحيحة لعمر النصف $T_{\frac{1}{2}}$، هي استعمال (المعادلة 30-5). نضع $t = 60.0\ \text{min} = 3600\ \text{s}$.

فنحصل على $\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t} = (8.00 \times 10^{13}\ \text{s}^{-1})e^{-(1.16\times10^{-3}\ \text{s}^{-1})(3600\ \text{s})} = 1.23 \times 10^{12}\ \text{s}^{-1}$

ملحوظة: إنّ سبب التناقض البسيط في النتائج هو استخدامنا لثلاثة أرقام معنوية.

(د) نريد تحديد الزمن t عندما $\Delta N/\Delta t = 1.00\ \text{s}^{-1}$. ومن (المعادلة 30-5) نجد أنّ

$$e^{-\lambda t} = \frac{(\Delta N/\Delta t)}{(\Delta N/\Delta t)_0} = \frac{1.00\ \text{s}^{-1}}{8.00 \times 10^{13}\ \text{s}^{-1}} = 1.25 \times 10^{-14}$$

نأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة (تذكر أنّ $\ln e^{-\lambda t} = -\lambda t$) ونقسم على λ، لنجد أنّ

$$t = -\frac{\ln (1.25 \times 10^{-14})}{\lambda} = 2.76 \times 10^4\ \text{s} = 7.67\ \text{h}$$

10-30 سلاسل الاضمحلال الإشعاعيّ

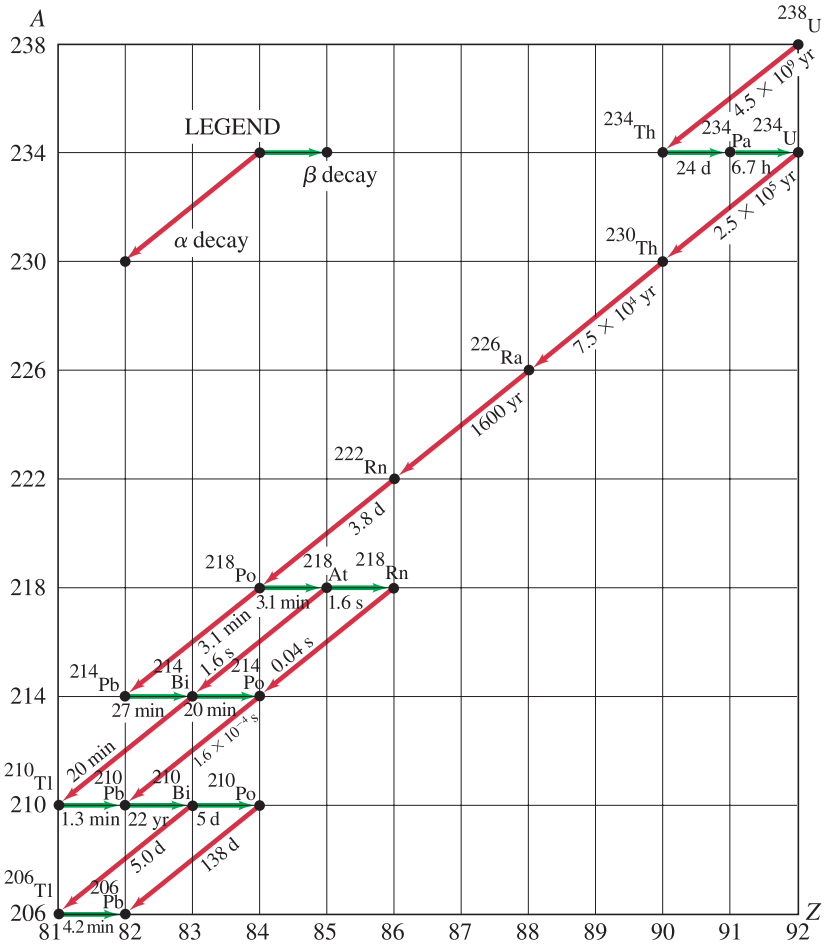
كثيرًا ما يضمحل أحد النظائر المشعة إلى نظير آخر مشع أيضًا. أحيانًا، تضمحل هذه النواة الوليدة أيضًا إلى نظير مشع آخر. ويشكل مثل هذا الاضمحلال المتوالي سلسلة تُسَمّى **سلسلة الاضمحلال**. يوضح (الشكل 30-11) مثالاً مهمًا. فكما نرى، يضمحل $^{238}_{92}\mathrm{U}$ عن طريق انبعاث جُسيمات α إلى $^{234}_{90}\mathrm{Th}$، والذي يضمحل بدوره بواسطة انبعاث جُسيمات β إلى $^{234}_{91}\mathrm{Pa}$. تتوالى هذه السلسلة كما هو مبين مع عدة تفرعات محتملة عند أسفلها، وتنتهي بنظير الرصاص المستقر $^{206}_{82}\mathrm{Pb}$. يمكن أن يكون الاضمحلال الأخير في هذه السلسلة

$$^{206}_{81}\mathrm{Tl} \rightarrow {}^{206}_{82}\mathrm{Pb} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}$$

أو

$$^{210}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\mathrm{Pb} + \alpha$$

وهناك أيضًا سلاسل إشعاعية أخرى.



الشكل 30-11 تبدأ سلسلة الاضمحلال بـِ $^{238}_{92}\mathrm{U}$. تمثل الأنوية في هذه السلسلة بنقاط تعطي قيم A و Z. تعطى أعمار النصف بالثواني (s)، والدقائق (min) ، والساعات (h)، والأيام (d) والسنوات (yr). لاحظ أنّ السهم الأفقي يمثّل الاضمحلال بانبعاث جُسيم β (A لا تتغير) في حين يمثّل الخطّ القطري الاضمحلال بانبعاث جُسيم α (تتغير A بمقدار 4 و Z بمقدار 2).

توجد بعض العناصر في الطبيعة بسبب مثل سلسلة الاضمحلال هذه، وإلا لما وجدت هذه العناصر. لأنه عندما اكتسب النظام الشمسي شكله الحالي قبل حوالي 5 مليارات سنة، يعتقد بأنّ الأنوية جميعها تقريبًا تشكلت (بواسطة عملية الاندماج، البندان 31-3 و 33-2). إنّ العديد من الأنوية ذات أعمار النصف القصيرة اضمحلت بسرعة، ولم تعد موجودة في الطبيعة في الوقت الحاضر. أما النظائر ذات الأعمار نصف الطويلة، مثل $^{238}_{92}\mathrm{U}$ الذي يبلغ عمره النصفي $4.5 \times 10^9\ \mathrm{yr}$، فما تزال موجودة في الطبيعة حتى يومنا هذا. وبالفعل، فإنّ أكثر من نصف $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ما زال موجودًا في الطبيعة (على فرض أنّ النظام الشمسيّ نشأ قبل $5 \times 10^9\ \mathrm{yr}$). وعلى أيّ حال، من الممكن أن نتوقع كذلك أنّ الراديوم $(^{226}_{88}\mathrm{Ra})$ وعمره النصفي 1600 yr قد اختفى من الأرض. أي بحلول هذا الوقت، فإنّ أنوية $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ جميعها يجب أن تكون قد اضمحلت. ومع هذا، بما أنّ $^{238}_{92}\mathrm{U}$ يضمحل (في عدة مراحل) إلى $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$، فإنّ مصدر $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$ يتجدد باستمرار، وهذا هو سبب وجوده على الأرض حتى الآن. كما أنّ الشيء نفسه ينطبق على العديد من الأنوية المشعة الأخرى.

المثال المفاهيمي 30-12 سلسلة الاضمحلال

تبدأ سلسلة الاضمحلال التي في (الشكل 30-11) بـِ $^{234}_{92}U$. ولها أربع أنوية متعاقبة أعمار النصف لها 1600 yr, 75,000 yr, 250,000 yr والقليل منها أقلّ من 4 أيام. إنّ كلّ اضمحلال في هذه السلسلة يرافقه انبعاث جُسيم ألفا ذي طاقة محددة. لذلك، يمكن مراقبة معدل الاضمحلال الإشعاعيّ لكلّ نواة. أعطيت عينة $^{234}_{92}U$ نقية قبل مليون سنة، أيّ اضمحلال لجُسيم ألفا تتوقع أن تكون شدته الإشعاعية في العينة أكبر ما يمكن؟

الإجابة: من الطبيعي القول إنّ العملية التي عمرها النصفي أقصر ما يمكن، تكون شدّتها الإشعاعية أكبر ما يمكن. وعلى أيّ حال، فإنّ معدلات الاضمحلال في هذه العينة جميعها متساوية. ويعزى السبب في ذلك إلى إنّ اضمحلال النواة الأم في كلّ حالةٍ يمثل عنق الزجاجة لاضمحلال النواة الوليدة. فعلى سبيل المثال، عند مقارنة عمر النصف لـِ $^{226}_{88}Ra$ والبالغ 1600 yr، فإنّ نواته الوليدة $^{222}_{86}Rn$ تضمحل لحظيًّا تقريبًا، ولكنها لا يمكن أن تضمحل إلّا عندما تتشكل. (هذا يشبه تجمع لخط سيارات: فإذا احتاج العامل A إلى 20 دقيقة للقيام بوظيفة ما، والعامل B يحتاج إلى دقيقة واحدة للقيام بالوظيفة التالية، فإنّ العامل B ما زال يحتاج إلى 20 دقيقة للقيام بوظيفته في سيارة واحدة).

11-30 تقدير العمر بواسطة الشّدّة الإشعاعية

هناك العديد من التطبيقات المفيدة للاضمحلال الإشعاعي. تشتمل أحد هذه التطبيقات على تحديد عمر مواد قديمة بواسطة الشدة الإشعاعية.

إنّ عمر أيّ جسم تشكل من مادة حية كالخشب مثلا، يمكن تحديده باستعمال الشدة الإشعاعية الطبيعية للنظير $^{14}_{6}C$. إنّ النباتات الحية جميعها تمتصّ ثاني أكسيد الكربون (CO_2) من الهواء، وتستخدمه في تركيب جزيئات عضوية. إنّ الغالبية العظمى من ذرات الكربون هذه هي للنظير $^{12}_{6}C$، وأنّ جزءًا صغيرًا حوالي 1.3×10^{-12} للنظير المشع $^{14}_{6}C$. إنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ في الغلاف الجوي ثابتة تقريبًا على مدى آلاف السنين بالرغم من أنّ $^{14}_{6}C$ يضمحل بعمر نصفي يبلغ حوالي 5730 yr. والسبب في ذلك هو أنّ الأنوية التي تحمل طاقة في الإشعاعات الكونية (التي تدخل إلى الغلاف الجوي) تصطدم مع أنوية ذرات في الغلاف الجوي فتفكّكها إلى قطع باعثة نيوترونات حرة. ومن الممكن إنّتصادم هذه النيوترونات مع أنوية ذرات النيتروجين في الغلاف الجوي لتنتج التحول النووي التالي: $n + {}^{14}_{7}N \rightarrow {}^{14}_{6}C + p$ أي أنّ النيوترون المهاجم يمتص بواسطة نواة $^{14}_{7}N$، وينتج بروتون من هذه العملية. النواة المتبقية هي $^{14}_{6}C$. هذا الإنتاج المتواصل لـِ $^{14}_{6}C$ في الغلاف الجوي يوازن تقريبًا المفقود من $^{14}_{6}C$ بسبب الاضمحلال الإشعاعي. وطالما أنّ النبتة أو الشجرة حية، فإنّها تستعمل، وبشكل مستمر، الكربون من ثاني أكسيد الكربون الموجود في الهواء لبناء أنسجة جديدة واستبدال القديم منها. كما أنّ الحيوانات بدورها تأكل النباتات، وتحصل على الكربون اللازم لأنسجتها.

إنّ الكائنات الحية لا يمكن أن تميز $^{14}_{6}C^{*}$ من $^{12}_{6}C$، وبما أنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ في الغلاف الجوي تبقى ثابتة تقريبًا، فإنّ نسبة النظيرين أيضًا تبقى ثابتة تقريبًا. وعندما يموت كائن حيّ، فإنه لا يمتص ثاني أكسيد الكربون. وبما أنّ $^{14}_{6}C$ يضمحل إشعاعيًّا، فإنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ فيه تقل مع مرور الزمن. وحيث إنّ عمر النصف للنظير $^{14}_{6}C$ يبلغ حوالي 5730 yr، فإنّ النسبة $^{14}_{6}C/^{12}_{6}C$ في أداة خشبية قديمة هي نصف تلك الموجودة في أشجار ما زالت تعيش، وهذا يعني أنّ تلك الأداة صنعت من شجرة قطعت قبل حوالي 5730 سنة. وفي الحقيقة، يجب تصحيح هذا؛ لأنّ النسبة $^{14}_{6}C/^{12}_{6}C$ في الغلاف الجوي لا تبقى ثابتة بشكل دقيق مع مرور الزمن. ولتحديد هذه النسبة على مدى قرون؛ فإننا نحتاج إلى تقنيات، مثل مقارنة النسبة المتوقعة مع النسبة الحقيقية لأجسام أعمارها معروفة، فالأشجار القديمة جدًّا يمكن حساب حلقاتها السنوية بدقة معقولة.

تطبيقات فيزيائية

التأريخ باستخدام الكربون -14

تكون ^{14}C في الغلاف الجوي

* تعمل الكائنات الحية تقريبًا من خلال التفاعلات الكيماوية التي تشتمل على الإلكترونات المدارية الخارجية للذرة.
أمّا النيوترونات الإضافية في النواة فليس لها أيّ تأثير أساسًا.

مثال إضافي

المثال 30-13 حيوان هالك منذ زمن بعيد

كتلة الكربون في جزء من عظمة حيوان وجدت في موقع أثري تساوي 200 g. إذا سجلت العظمة شدة إشعاعية مقدارها 16 decays/s، فما عمر هذه العظمة؟

النّهج: نحدّد أولا عدد ذرات $^{14}_{6}C$ التي كانت موجودة في العينة البالغة 200 g عندما كان الحيوان حيًّا، على اعتبار أنّ نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ تساوي 1.3×10^{-12}. ثم نستخدم (المعادلة 30 – 3 ب) لإيجاد الشدة الإشعاعية في ذلك الوقت، في حين نستخدم (المعادلة 30 – 5) لإيجاد الزمن t الذي مرّ على تلك الشدة الإشعاعية.

الحل: إنّ الكمية 200 g من الكربون جميعها تقريبًا $^{12}_{6}C$ ؛ كلّ 12.0 g من $^{12}_{6}C$ تحتوي على 6.02×10^{23} من الذرات. لذا، فإنّ 200 g تحتوي على

$$\left(\frac{6.02 \times 10^{23}\ \text{atoms}}{12\ \text{g}}\right)(200\ \text{g}) = 1.00 \times 10^{25}\ \text{atoms}$$

عندما كان الحيوان حيّا، كانت نسبة $^{14}_{6}C$ إلى $^{12}_{6}C$ في العظمة تساوي 1.3×10^{-12}. لذا، فإنّ عدد أنوية $^{14}_{6}C$ في ذلك الوقت يساوي

$$N_0 = (1.00 \times 10^{25}\ \text{atoms})(1.3 \times 10^{-12}) = 1.3 \times 10^{13}\ \text{atoms}$$

ومن (المعادلة 30 – 3ب)، نجد أنّ مقدار الشدة الإشعاعية عندما كان الحيوان حيّا ($t = 0$) يساوي

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 = \lambda N_0$$

حيث $\lambda = 3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1}$ كما تمّ حسابها في (المثال 30 – 9). لذلك، فإنّ الشدة الإشعاعية الأصلية كانت

$$\left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 = \lambda N_0 = (3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1})(1.3 \times 10^{13}) = 50\ \text{s}^{-1}$$

ومن (المعادلة 30 – 5)، نجد أنّ

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t}$$

حيث $\Delta N/\Delta t$ أعطيت في المثال على أنّها تساوي $16\ \text{s}^{-1}$. أي أنّ

$$16\ \text{s}^{-1} = (50\ \text{s}^{-1})e^{-\lambda t}$$

أو

$$e^{\lambda t} = \frac{50}{16}$$

وبأخذ اللوغاريتم الطبيعي لطرفي المعادلة، سنحصل على

$$t = \frac{1}{\lambda}\ln\left(\frac{50}{16}\right) = \frac{1}{3.83 \times 10^{-12}\ \text{s}^{-1}}\ln\left(\frac{50}{16}\right)$$
$$= 2.98 \times 10^{11}\ \text{s} = 9400\ \text{yr}$$

وهذا هو الزمن الذي مرّ على موت هذا الحيوان.

تطبيق الفيزياء
تحديد عمر الآثار

مقياس الزمن الجيولوجي لتحديد العمر

إنّ تحديد العمر بواسطة الكربون مفيد فقط بالنسبة إلى الأجسام التي عمرها أقلّ من 60,000 سنة تقريبا؛ لأنّ الكمية المتبقية من $^{14}_{6}C$ في الأجسام الأقدم من ذلك تكون عادة صغيرة جدًّا، ولا يمكن قياسها بدقة. ومع هذا، فإنّ التقنيات الحديثة تسمح بالكشف حتى عن كميات صغيرة جدًّا من $^{14}_{6}C$، وهو ما أدى إلى جعل الإطار الزمني أبعد من 60,000 سنة. ومن جهة أخرى، فإنّ النظائر المشعة التي أعمارها النصفية طويلة يمكن أن تستخدم في ظروف معينة لتحديد أعمار أجسام أقدم من ذلك. على سبيل المثال، يعدّ عنصر $^{238}_{92}U$ مفيدا في تحديد أعمار الصخور على مقياس الزمن الجيولوجي بسبب عمره النصفي الطويل الذي يبلغ حوالي 4.5×10^{9} سنة. عندما تصلبت مادة منصهرة على سطح الأرض منذ زمن بعيد وتحولت إلى صخرة بانخفاض درجة حرارتها، فإنّ مركبات مختلفة تتصلب حسب درجات انصهارها، وهذه المركبات المختلفة تنفصل عن بعضها نوعًا ما.

تطبيق الفيزياء
التأريخ الجيولوجي

وبناء على ذلك، فإنّ اليورانيوم الموجود في مادة ما يصبح ثابتًا في مكانه، وكذلك الأنوية الوليدة التي تنتج من اضمحلال اليورانيوم تبقى أيضًا ثابتة في ذلك الموضع. وبقياس كمية $^{238}_{92}\mathrm{U}$ المتبقية في المادة بالنسبة إلى كمية الأنوية الوليدة، يمكن تحديد الزمن عندما تصلبت الصخرة.

أثبتت طرق تحديد العمر بواسطة الشدة الإشعاعية باستعمال $^{238}_{92}\mathrm{U}$ ونظائر أخرى أنّ عمر أقدم صخور الأرض يبلغ حوالي $4 \times 10^9\ \mathrm{y}$. يشير عمر الصخور التي تحتوي على أقدم الكائنات الحية المتحجرة إلى أنّ الحياة بدأت قبل أكثر من 3.5 مليار سنة. أمّا بقايا أقدم الثدييات المتحجرة فقد وجدت في صخور عمرها 200 مليون سنة. وأنّ أول المخلوقات التي تشبه الجنس البشري يبدو أنّها ظهرت قبل حوالي مليوني سنة. وهكذا، فإنّ تحديد العمر بواسطة النّشاط الإشعاعيّ أساسيّ في إعادة بناء تاريخ الأرض.

تطبيق الفيزياء
أقدم صخور الأرض

* 12-30 الاستقرار وتأثير النفق

رأينا سابقًا أنّ الاضمحلال الإشعاعيّ يحدث فقط عندما تكون كتلة النواة الأم أكبر من مجموع كتل النواة الوليدة والجُسيمات المنبعثة جميعها. على سبيل المثال، يمكن أن تضمحل نواة $^{238}_{92}\mathrm{U}$ إلى $^{234}_{90}\mathrm{Th}$ لأنّ كتلة $^{238}_{92}\mathrm{U}$ أكبر من كتلة $^{234}_{90}\mathrm{Th}$ زائد كتلة جُسيم ألفا. وبما أنّ الأنظمة تميل إلى الذهاب في الاتجاه الذي يؤدي إلى خفض طاقتها الداخلية أو طاقة الوضع (تتدحرج الكرة إلى أسفل التلة، تتحرك الشحنة الموجبة نحو الشحنة السالبة) فإنك قد تستغرب عدم تفكّك النواة غير المستقرة فورًا. وبكلمات أخرى، لماذا أنوية $^{238}_{92}\mathrm{U}$ $\left(T_{\frac{1}{2}} = 4.5 \times 10^9\ \mathrm{yr}\right)$ والنظائر الأخرى أعمارها النصفية طويلة؟ لماذا لا تضمحل الأنوية الأم جميعها فورًا؟

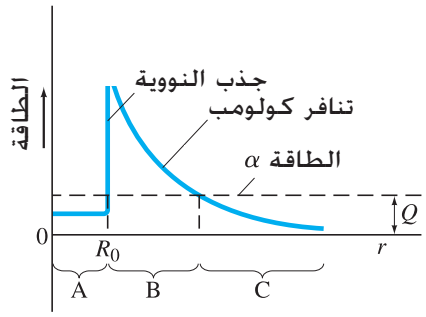
إنّ الإجابة لها علاقة بالنظرية الكمية وطبيعة القوى الموجودة. يمكن دراسة هذه الحالة بمساعدة مخطط طاقة الوضع كما في (الشكل 30 – 12).

دعنا نفترض حالة معينة للاضمحلال $^{238}_{92}\mathrm{U} \rightarrow {}^{234}_{90}\mathrm{Th} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$. يمثل الخط الأزرق طاقة الوضع بما فيها كتلة السكون، حيث تَخَيَّلْنا جُسيم α على أنّه كينونة مستقلة داخل نواة $^{238}_{92}\mathrm{U}$. تمثل المنطقة المشار إليها بالحرف A، طاقة الوضع لجُسيم α عندما يكون محتجزًا داخل اليورانيوم بواسطة القوة النووية (R_0 نصف قطر النواة). تمثل المنطقة C طاقة الوضع عندما يكون جُسيم α غير مرتبط مع النواة. أما الجزء المتجه نحو الأسفل من منحى طاقة الوضع (يتناسب مع $1/r$) فيمثل التنافر الكهربائي (قانون كولوم) بين جُسيم α المشحون بشحنة موجبة ونواة $^{234}_{90}\mathrm{Th}$.

وللوصول إلى المنطقة C؛ فإنّ جُسيم α يجب أن يجتاز حاجز كولوم المبين في الشكل. وبما أنّ طاقة الوضع تمامًا ما بعد $r = R_0$ (المنطقة B) أكبر من طاقة جُسيم ألفا (الخط المقطع)، فإنّ جُسيم α لا يستطيع أن يفلت من النواة إذا كان محكومًا بالفيزياء الكلاسيكية. ولكن إذا منح طاقة مساوية لارتفاع الحاجز، فعندها يستطيع الانفلات. وعلى أيّ حال، فإنّ الأنوية تضمحل تلقائيًّا دون أن تُمنح أيّ طاقة. كيف يمكن لجُسيم α أن ينتقل من المنطقة A إلى C؟ في الحقيقة، إنه يمر خلال الحاجز في عملية تُسَمّى **تأثير النفق**. أمّا من وجهة نظر كلاسيكية فإنّ هذا لا يمكن أن يحدث؛ لأنّ جُسيم α في المنطقة B (داخل الحاجز) ينتهك مبدأ حفظ الطاقة*. ومع هذا، يشير مبدأ عدم التحديد إلى أنّ حفظ الطاقة يمكن أن ينتهك بالمقدار ΔE خلال الفترة الزمنية Δt كما في العلاقة

$$(\Delta E)(\Delta t) \approx \frac{h}{2\pi}$$

رأينا في (البند 28 – 3) أنّ هذه العلاقة نتيجة لازدواجية جُسيم – موجة. وهكذا، فإنّ الميكانيكا الكمية تسمح بانتهاك قانون حفظ الطاقة لفترات قصيرة قد تكون طويلة بما فيه الكفاية بالنسبة إلى جُسيم α لعبور الحاجز. تمثل ΔE الفرق في الطاقة بين متوسط ارتفاع الحاجز وطاقة الجُسيم، في حين يمثّل Δt الزمن اللازم للمرور خلال الحاجز. كلما زاد ارتفاع الحاجز وعرضه قلّ الزمن Δt المتاح لجُسيم α للإفلات، ومن غير المرجح أن يقوم بذلك. وهكذا، فإنّ ارتفاع هذا الحاجز وعرضه يتحكمان في معدل الاضمحلال وعمر النصف للنظير.



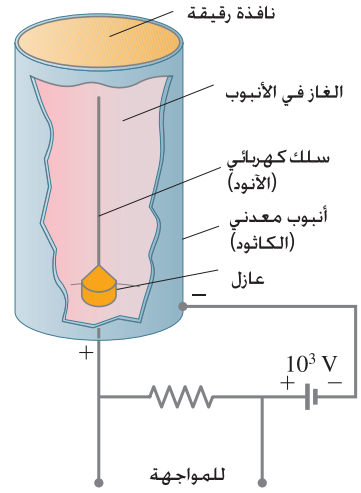
الشكل 30 – 12 طاقة الوضع لجُسيم α والنواة، مبينًا حاجز كولوم الذي يجب أن يمر خلاله جُسيم α لكي يفلت من النواة. قيمة Q لهذا التفاعل موضحة أيضًا على الشكل.

النفق

* الطاقة الكلية E (الخط المقطع في الشكل 30 – 12) ستكون أقل من طاقة الوضع PE؛ لأنّ الطاقة الحركية $\mathrm{KE} = \frac{1}{2}mv^2 > 0$ موجبة، لذا، لا يمكن أن تكون $E = \mathrm{KE} + \mathrm{PE}$ أقلّ من PE من وجهة نظر كلاسيكية.

13-30 الكشف عن الإشعاعات

لا يمكن الكشف عن الجُسيمات المنفردة مثل الإلكترونات، والبروتونات، وجُسيمات α، والنيوترونات، وأشعة γ مباشرة بواسطة حواسنا. ولهذا، فقد تمّ تطوير أجهزة مختلفة للكشف عنها. إنّ أحد أكثر هذه الأجهزة شيوعًا هو **عداد غايغر** الذي يتكون، كما هو مبين في (الشكل 30 – 13)، من أنبوب فلزي أسطواني الشكل مليء بنوع معين من الغاز. يتصل سلك طويل ينطبق تمامًا على محور الأسطوانة مع جهد موجب مرتفع ($\approx 10^3$ V) بالنسبة للأسطوانة الخارجية. وهذا الجهد أقلّ قليلا من ذاك اللازم لتأيين ذرات الغاز. عندما يدخل جُسيم مشحون خلال نافذة رقيقة عند إحدى نهايتي الأنبوب، فإنه يؤيّن عددًا قليلًا من ذرات الغاز. تنجذب الإلكترونات المتحررة نحو السلك الموجب، وبما أنّها تتسارع، فإنها تهاجم ذرات إضافية وتؤيّنها. يحدث انهيار سريع للإلكترونات (أي ينتج عدد كبير من الإلكترونات) وعندما تصل إلى سلك المصعد تُنتج نبضة كهربائية. يتمّ تمرير النبضة بعد تضخيمها إلى عداد إلكتروني يحسب عدد الجُسيمات التي تمّ كشفها. كما يمكن إرسال النبضات إلى مكبر صوت، وكلّما يكشف عن جُسيم يُسْمعُ صوتُ طقطقة. إنّ أيّ كاشف يكتشف جزءًا فقط من الإشعاعات المنبعثة مع عينة ما.



شكل 30 – 13 رسم توضيحي لعداد غايغر

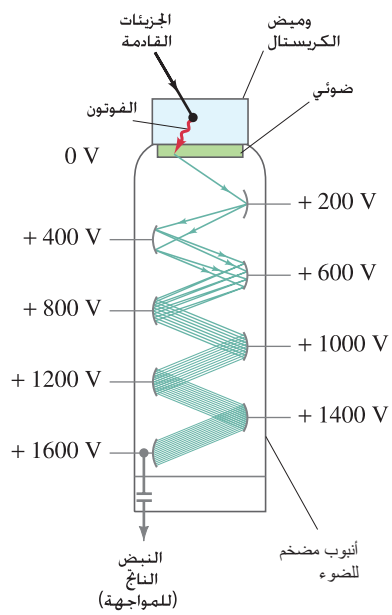
مواد وصيفية

يستخدم في العداد الوميضي مادة تعرف بالمادة الوميضية أو الفسفور، وهي إما أن تكون صلبة، أوسائلة، أو غازية. تتهيج ذرات المادة الوميضية بسهولة عندما تهاجم بواسطة جُسيم يسقط عليها، وتبعث ضوءًا مرئيًّا عندما تعود إلى حالاتها الأرضية. المواد الوميضية عبارة عن بلورات NaI ولدائن معينة. يلتصق أحد وجهي المادة الوميضية الصلبة مع أنبوب التضاعف الفوتوني، وتلف جميعها بمادة معتمة، أو توضع داخل حافظة محكمة الإغلاق لمنع وصول الضوء إليها. يقوم أنبوب التضاعف الفوتوني بتحويل طاقة الفوتون المنبعث من المادة الوميضية إلى نبضة كهربائية.

أنبوب التضاعف الفوتوني *PM*

إنّ أنبوب التضاعف الفوتوني عبارة عن أنبوب مفرغ من الهواء يحتوي على العديد من الأقطاب (8 إلى 14) تعرف بالدينودات، موصولة مع جهود تتزايد بشكل متوالٍ كما هو مبين في (الشكل 30 – 14). وعند سطحه العلوي، يوجد سطح كهروضوئي يُسَمّى الكاثود الضوئي الذي دالة شغله (البند 27 - 3) صغيرة إلى الحدّ الذي يسمح لإلكترون أن ينطلق بسهولة عندما يُهاجم بواسطة فوتون من المادة الوميضية. يتسارع مثل هذا الإلكترون نحو الدينود الأول. وعندما يضرب الدينود الأول، يكتسب هذا الإلكترون طاقة حركية كافية تجعله يُخرج إلكترونين إلى خمسة إلكترونات إضافية. وهذه الإلكترونات تتسارع بدورها نحو الدينود الثاني، وتبدأ عملية التضاعف لعدد الإلكترونات. وقد يصل عدد الإلكترونات التي تهاجم الدينود الأخير إلى 10^6 أو أكثر.

وهكذا، فإنّ مرور جُسيم خلال المادة الوميضية يؤدي إلى نبضة كهربائية عند مخرج أنبوب التضاعف الفوتوني، وترسل إلى عداد إلكتروني تمامًا كما هو الحال في أنبوب غايغر.



(الشكل 30 – 14) عداد وميضي مع أنبوب التضاعف الفوتوني

المِسعر

تعدّ المواد الوميضية الصلبة أكثر كثافة من الغاز الموجود في عداد غايغر. والكواشف الوميضية أكثر كفاءة في الكشف عن الإشعاعات. وخصوصًا إشعاعات جاما التي تفاعلها مع المادة أقلّ من تفاعل إشعاعات β. تستعمل المواد الوميضية التي يمكنها قياس الطاقة الكلية التي تودع فيها كثيرًا هذه الأيام. وتُسَمّى **مساعر**.

غالبًا ما تستخدم **المواد الوميضية السائلة** في تقفي الأثر (البند 31 – 7). عينات مشعة تؤخذ عند فترات زمنية مختلفة من أجزاء مختلفة من الكائن الحي. وتوضع مباشرة في عبوات زجاجية صغيرة تحتوي على مادة وميضية سائلة. وهذا مناسب بشكل خاص للكشف عن إشعاعات β ذات الطاقات المنخفضة جدًّا المنبعثة من $^{3}_{1}\mathrm{H}$ و $^{14}_{6}\mathrm{C}$. وتمر بصعوبة خلال الغطاء الخارجي لبلورة المادة الوميضية أو أنبوب غايغر. ويبقى أنبوب التضاعف الفوتوني PM يستعمل لتوليد النبضة الكهربائية.

مكشاف شبه موصل (ثنائي الوصلة)

يتكون **المكشاف شبه الموصل** من دايود ثنائي الوصلة منحازا عكسيًّا (البند 29 – 8). يمر جُسيم خلال الوصلة. يستطيع تهييج الإلكترونات في الحزمة الموصلة تاركًا ثقوبا في حزمة التكافؤ. تنتج الشحنات المتحررة نبضة كهربائية قصيرة يمكن عدها تمامًا كما في عدادات غايغر والوميضية. تحفر على سطح رقاقة سيلكون شبه موصلة خلايا صغيرة جدًّا لتعطى معلومات تفصيلية عن موضع الجسم.

يحمل عمال المستشفيات ومن يعمل في مجال الإشعاع أيضًا شارات فيلمية تكشف عن الإشعاعات المتراكمة. يُستبدل الشريط الذي في الداخل بشكل دوري ثم يُظهر. والبقع السوداء التي تظهر عليه ترتبط مع التعرض الكلي (انظر إلى البند 31 – 5).

المستحلب

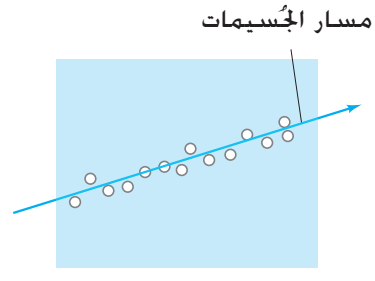
إنّ الأجهزة التي قمنا بدراستها حتى الآن تحسب عدد الجُسيمات (أو عدد الاضمحلال للنظير المشع). وهناك أجهزة أخرى تسمح بتقفي أثر الجُسيمات المشحونة لترى بشكل واضح. إنّ أبسط هذه الأجهزة هو **مستحلب التصوير**. وهو جهاز صغير قابل للحمل ويستخدم الآن بشكل خاص لدراسة الأشعة الكونية بواسطة البالونات. يمر الجُسيم المشحون خلال طبقة من مستحلب التصوير. ويؤيّن ذراته على طول المسار الذي يسلكه. يحدث لهذه النقاط تغيّر كيماوي. وعندما يُظهر المستحلب يظهر مسار الجُسيم. (أحد أنواع النيوترينو τ كان قد اكتشف بطريقة غير مباشرة بواسطة مستحلب في مختبر فيرمي: انظر الفصل 32).

الغرفة السحابية

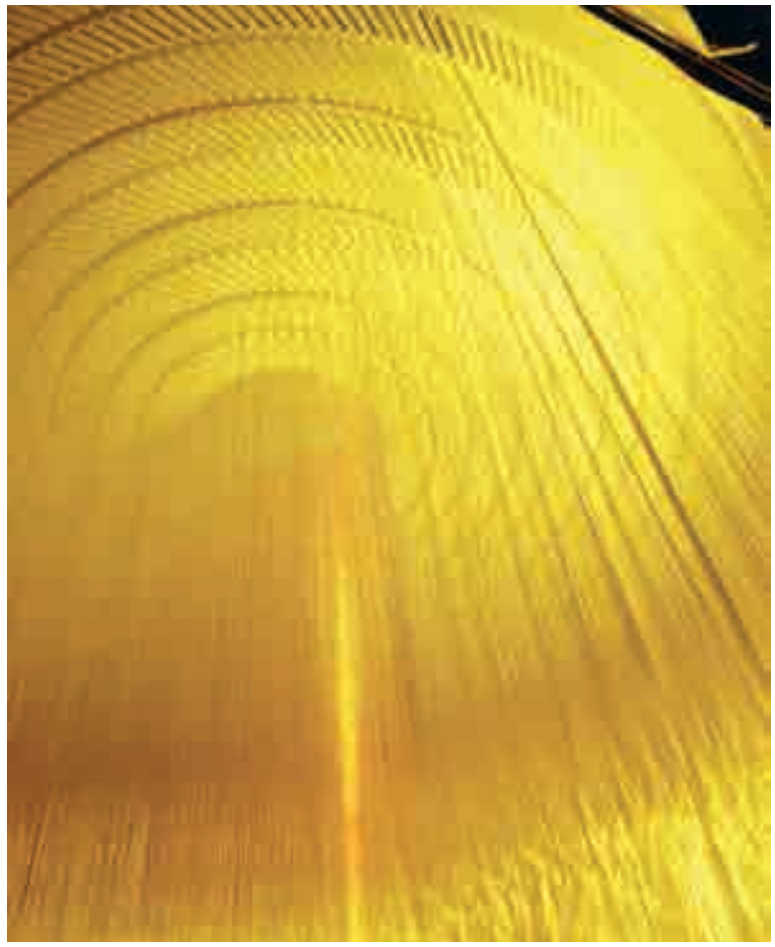
في **الغرفة السحابية**، يُبرد غاز ما إلى درجة حرارة أقل قليلًا من نقطة التكاثف الاعتيادية (فائق التبريد). وتتكاثف جزيئات الغاز على الجزيئات المؤينة الموجودة. تنتج الأيونات عندما يمرّ جُسيم مشحون خلال الغاز. ويعمل كمركز تتشكل عليه قطرات دقيقة جدًّا (الشكل 30 – 15). يتشتت الضوء من هذه القطرات أكثر من قطرات الغاز (الخلفية الأرضية للغاز). وهكذا. فإنّ صورة الغرفة السحابية في اللحظة المناسبة تبين مسار الجُسيم المشحون. لقد استخدم هذا الجهاز المهم كثيرا في بداية دراسة الفيزياء النووية. أمّا في الوقت الحاضر فهو قليل الاستعمال.

الغرفة الفقاعية

تستخدم **الغرفةُ الفقاعية** التي اكتشفها غلاسر (1926-) عام 1952 سائلًا فائق التسخين. يحفظ قريبًا من نقطة غليانه الطبيعية. يتشكل حول الفقاعات الناتجة من الغليان أيونات ناتجة من مرور جُسيم مشحون. تظهر صورة ما داخل الغرفة مسارات الجُسيمات المشحونة التي مرت خلالها حديثًا. وبما أنّ الغرفة الفقاعية تستخدم مادة سائلة- في أغلب الأحيان الهيدروجين السائل- فإنها جهاز أكثر كفاءة من الغرفة السحابية من حيث مشاهدة أثر الجُسيمات المشحونة وتفاعلاتها مع أنوية السائل. وعلى الأغلب. يطبق مجال مغناطيسي بين طرفي الغرفة لتحديد كمية التحرك للجُسيمات المتحركة من نصف قطر انحناء مساراتها.



الشكل 30 – 15 في الغرفة السحابية أو الفقاعية، تتشكل قطرات أو فقاعات حول الأيونات الناتجة من مرور جُسيم مشحون.



الشكل 30 – 16 غرفة الانسياق نحو السلك داخل كاشف التصادم في مختبر فيرمي (CDF).
التقطت الصورة التي في افتتاحية (الفصل 32 - صفحة 889) بواسطة هذا الكاشف.

غرفة الانسياق نحو السلك

تتكوّن **غرفة الانسياق** نحو السلك من مجموعة أسلاك دقيقة قريبة جدًّا من بعضها ومغمورة في غاز ما (الشكل 30 – 16). يتمّ وصل العديد من هذه الأسلاك مع الأرض. أمّا الأسلاك الأخرى التي بينها، فتوصل مع مصدر جهد مرتفع. عندما يمر جُسيم مشحون خلال الغاز ينتج منه أيونات وتنساق الإلكترونات المتحررة نحو أقرب أسلاك الجهد المرتفع، مما يولد انهيارًا إلكترونيًّا تنتج منه نبضة كهربائية على ذلك السلك. تحدد مواضع الجُسيمات إلكترونيًّا بواسطة موضع السلك والزمن الذي تستغرقه النبضات للوصول إلى جهاز قراءتها الإلكتروني الموجود عند أطراف الأسلاك. ويعاد بناء مسارات هذه الجُسيمات إلكترونيًّا بواسطة الحاسوب الذي يمكنه رسم صورة للمسارات، كما هو موضح في الصورة الافتتاحية (للفصل 32).

ملخص

الفيزياء النووية عبارة عن دراسة للأنوية الذرية. تحتوي الأنوية على **بروتونات ونيوترونات**، وتعرف مجتمعة **بالنيوكلونات**. يمثل المجموعُ الكلي للنيوكلونات A **العددَ الكتلي** الذري للنواة. أما عدد البروتونات Z فيُسَمّى **العدد الذري**. عدد النيوترونات يساوي $A - Z$. **النظائر** عبارة عن أنوية لها العدد الذري نفسه، ولكن عدد النيوترونات فيها مختلف. بالنسبة إلى عنصر ما مثل X، فإنّ هذا النظير يمثّل كما يلي:

$$^{A}_{Z}\mathrm{X}.$$

يتناسب نصف القطر النووي تقريبًا مع $A^{\frac{1}{3}}$، مما يدل على أنّ الأنوية جميعها لها الكثافة نفسها تقريبًا. تعين الكتل النووية **بوحدات الكتلة الذرية الموحدة** (u)، حيث تعرف كتلة $^{12}_{6}\mathrm{C}$ (بما فيها إلكتروناتها الستة) بدقة على أنها تساوي 12.000000 u، أو بدلالة ما يكافؤها بوحدات الطاقة (لأنّ $E = mc^2$).

حيث

$$1\ \mathrm{u} = 931.5\ \mathrm{MeV}/c^2 = 1.66 \times 10^{-27}\ \mathrm{kg}$$

إنّ كتلة النواة المستقرة أقل من مجموع كتل النيوكلونات التي تكونها. والفرق في الكتلة (مضروبًا في c^2) يساوي **مجموع طاقة الترابط**. وهي عبارة عن الطاقة التي تحتاج إليها النواة حتى تتفكك إلى مكوناتها من النيوكلونات. يبلغ مقدار **متوسط طاقة الترابط لكلّ نيوكلون** حوالي 8 MeV . وتقل بالنسبة للكتلة الصغيرة والأنوية ذات الكتل الكبيرة.
يحدث للأنوية غير المستقرة **اضمحلال إشعاعي**، حيث تتحول إلى أنوية أخرى مع انبعاث جُسيمات α, β أو γ.

جُسيم α عبارة عن نواة $^4_2\mathrm{He}$، أمّا جُسيم β فهو إلكترون أو بوزترون؛ في حين أنّ أشعة γ عبارة عن فوتون ذي طاقة عالية. يصاحب اضمحلال β انبعاث **النيوترينو**. يُسَمّى تغير النواة الأم إلى نواة وليدة **بالتحوُّل الكيماوي للعناصر**. يحدث الاضمحلال الإشعاعيّ تلقائيًّا عندما تكون كتلة السكون لنواتجه أقل من كتلة النواة الأم فقط. تظهر الكتلة المفقودة على شكل طاقة حركية لنواتج الاضمحلال.

تتماسك الأنوية مع بعضها بواسطة **القوّة النووية القوية**. أمّا **القوة النووية الضعيفة** فتظهر في أثناء اضمحلال β. هاتان القوتان بالإضافة إلى قوة الجاذبية والقوة الكهرومغناطيسية تمثل أربعة أنواع معروفة من القوى.

الشحنة الكهربائية، كميّة التحرك الخطية والزاوية، الكتلة – الطاقة، **وعدد النيوكلون** يجب أن تكون جميعها **محافظة** في كلّ اضمحلال.

الاضمحلال الإشعاعيّ عبارة عن عملية إحصائية. يتناسب عدد الأنوية التي تضمحل (ΔN) خلال الفترة الزمنية Δt مع عدد الأنوية الأم الموجودة في النواة المشعة:

$$\Delta N = -\lambda N\,\Delta t \qquad \textbf{(30 -13)}$$

تعني إشارة الناقص أنّ N تقلّ مع مرور الزمن. وتُسَمّى λ بِـ **ثابت الاضمحلال**، وهو ميزة للنواة المعطاة.

يتناقص عدد الأنوية N المتبقية أسّيًّا بعد مرور الزمن t

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \qquad \textbf{(4 – 30)}$$

تمامًا كما هو الحال بالنسبة إلى **الشدة الإشعاعيّة** $\Delta N/\Delta t$:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \left(\frac{\Delta N}{\Delta t}\right)_0 e^{-\lambda t} \qquad \textbf{(5 – 30)}$$

يعرف عمر النصف $T_{\frac{1}{2}}$ على أنّه الزمن اللازم لاضمحلال نصف الأنوية الموجودة في عينة مشعة، كما في العلاقة

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} \qquad \textbf{(6 – 30)}$$

يمكن استخدام الاضمحلال الإشعاعيّ في تحديد أعمار أجسام معينة.

[*يحدث اضمحلال ألفا بواسطة عملية تصفها الميكانيكا الكمية وتُسَمّى **تأثير النفق**].

[تشمل **كواشف** الجُسيمات **عدادات غايغر**، **ومواد وميضية** تتصل مع **أنابيب التضاعف الفوتونية**، **وكواشف أشباه الموصلات**. تشتمل الكواشف التي تُظهر أثر الجُسيم على: **مستحلب التصوير**، **والغرفة الفقاعية**، وحاليًّا تستخدم **غرف الانسياق نحو السلك**].

أسئلة

1. ما الشيء المشترك بين النظائر المختلفة لعنصر ما؟ كيف تختلف عن بعضها؟

2. ما العناصر التي تُمثَّل بالرمز X في كلّ مما يلي: (أ) $^{232}_{92}\mathrm{X}$؟ (ب) $^{18}_{7}\mathrm{X}$؟ (جـ) $^{1}_{1}\mathrm{X}$؟ (د) $^{82}_{38}\mathrm{X}$؟ (هـ) $^{247}_{97}\mathrm{X}$؟

3. كم عدد كلّ من البروتونات والنيوترونات التي يمتلكها كلّ نظير في السؤال الثاني.

4. حدد النظير الذي يمتلك 88 نيوكلونا و 50 نيوترونا.

5. لماذا الكتل الذرية للعديد من العناصر (انظر إلى الجدول الدوري) ليست قريبة من الأعداد الصحيحة؟

6. كيف نعرف أنّ هناك شيئًا ما يُسَمّى القوة النووية القوية؟

7. ما وجه التشابه والاختلاف بين القوة النووية القوية والقوة الكهربائية؟

8. ما الدليل التجريبي الذي يؤيد النّشاط الإشعاعيّ على أنه عملية نووية؟

9. يعدّ النظير $^{64}_{29}\mathrm{Cu}$ غير عادي من حيث إمكانية اضمحلاله بانبعاث β^-، γ أو β^+. ما هي النواة الناتجة من كلّ حالة؟

10. كم عدد النيوترونات التي تحتويها النواة الناتجة من اضمحلال نواة $^{238}_{92}\mathrm{U}$؟

11. بقدر استطاعتك، صف بطرق عديدة الاختلاف بين إشعاعات α، و β، و γ.

12. ما العنصر الذي يتشكّل نتيجة للاضمحلال الإشعاعيّ لكلّ من: (أ) $^{24}_{11}\mathrm{Na}\,(\beta^-)$؟ (ب) $^{22}_{11}\mathrm{Na}\,(\beta^+)$؟ (جـ) $^{210}_{84}\mathrm{Po}\,(\alpha)$؟ [مساعدة: انظر إلى الملحق B].

13. ما العنصر الذي يتشكل نتيجة لاضمحلال كلّ من: (أ) $^{32}_{15}\mathrm{P}\,(\beta^-)$؟ (ب) $^{35}_{16}\mathrm{S}\,(\beta^-)$؟ (جـ) $^{211}_{83}\mathrm{Bi}\,(\alpha)$؟ [مساعدة: انظر إلى الملحق B].

14. املأ الفراغ بالجُسيم أو النواة المفقودة

(أ) $^{45}_{20}\mathrm{Ca} \rightarrow ? + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}$

(ب) $^{58}_{29}\mathrm{Cu} \rightarrow ? + \gamma$

(جـ) $^{46}_{24}\mathrm{Cr} \rightarrow ^{46}_{23}\mathrm{V} + ?$

(د) $^{234}_{94}\mathrm{Pu} \rightarrow ? + \alpha$

(هـ) $^{239}_{93}\mathrm{Np} \rightarrow ^{239}_{94}\mathrm{Pu} + ?$

15. تبقى نواة الثوريوم الوليدة تمتلك 92 إلكترونًا تدور حولها مباشرة بعد اضمحلال نواة $^{238}_{92}\mathrm{U}$ إلى $^{234}_{90}\mathrm{Th} + ^4_2\mathrm{He}$. بما أنّ الثوريوم يحتفظ عادة بـ 90 إلكترونا فقط، ما الذي تفترض حدوثه بالنسبة للإلكترونين الإضافيين؟

16. عندما يحدث اضمحلال لنواة ما بانبعاث β^- أو β^+، ما الذي يحدث لمستويات الطاقة للإلكترونات الذرية؟ ما الذي يحدث لهذه الإلكترونات بعد الاضمحلال على الأرجح ؟

17. بشكل عام، تمتلك جُسيمات ألفا المنبعثة من نواة ما أحاديّة الطاقة جميعها الطاقة الحركية نفسها. في حين تمتلك جُسيمات بيتا المنبعثة من نواة ما طيفًا من الطاقات. اشرح الفرق بين هاتين الحالتين.

18. بشكل عام، هل تقع النظائر التي يحدث فيها الأسر الإلكتروني فوق خط الاستقرار المبين في (الشكل 30 – 2) أم تحته؟

19. هل يمكن أن يبعث الهيدروجين أو الديتيريوم جُسيم α؟ فسّر.

20. العديد من النظائر المشعة المصنّعة نادرة الوجود في الطبيعة، لماذا؟

21. إذا علمت أنّ عمر النصف لنظير ما شهر، فهل العينة المعطاة من هذا النظير تضمحل بالكامل بعد شهرين؟ إذا كانت الإجابة لا، فكم يبقى منها؟

22. ما سبب عدم استقرار أيّ من العناصر التي عددها الذري $Z > 92$؟

23. يضرب بروتون نواة $^6_3\mathrm{Li}$، ينبعث نتيجة لذلك جُسيم α وجُسيم آخر. ما هو الجُسيم الآخر؟

24. هل يمكن استخدام $^{14}_{6}\mathrm{C}$ لتحديد عمر جدران حجرية وألواح من حضارات قديمة؟ فسّر.

25. ينبعث إلكترون في كلّ من التحول الداخلي واضمحلال β. كيف يمكنك تحديد أيّ العمليتين قد حدثت؟

مسائل

30 – 1 الخصائص النووية

1. (I) إذا كانت كتلة جُسيم باي ميزون $139\ \text{MeV}/c^2$. فكم تساوي بوحدات الكتلة الذرية؟

2. (I) كم نصف القطر التقريبي لجُسيم ألفا (^4_2He)؟

3. (II) كم كتلة السكون بوحدة MeV/c^2 لجُسيم α ظاهر للعيان؟

4. (II) (أ) كم نصف القطر التقريبي لنواة $^{64}_{29}\text{Cu}$؟
(ب)تقريبًا. ما قيمة A للنواة التي نصف قطرها $3.9 \times 10^{-15}\ \text{m}$.

5. (II) (أ) بين أنّ كثافة المادة النووية هي في الأساس نفسها للأنوية جميعها. (ب) كم سيكون نصف قطر الأرض إذا كان لها نفس كتلتها الحقيقية، ولكن كثافتها مثل تلك التي للأنوية؟ (جـ) كم سيكون نصف قطر نواة $^{238}_{92}\text{U}$ إذا كانت كثافتها هي كثافة الأرض نفسها؟

6. (II) (أ) ما الجزء من كتلة ذرة الهيدروجين الذي يقع في نواتها؟ (ب) ما الجزء من حجم ذرة الهيدروجين الذي تحتله نواتها؟

7. (II) تقريبًا، كم عدد النيوكلونات الموجودة في جسم كتلته 1.0 kg؟ ما تأثير المادة التي يتكون منها الجسم؟ اذكر السبب في حال كان الحلّ بالإيجاب أو النفي.

8. (III) كم كمية الطاقة التي يجب أن يمتلكها جُسيم α حتى يلامس سطح نواة $^{238}_{92}\text{U}$ فقط؟

30 - 2 طاقة الترابط

9. (I) قدر طاقة الترابط الكلية لِـ $^{40}_{20}\text{Ca}$ مستعينًا (بالشكل 30 – 1).

10. (I) استعن (بالشكل 30 – 1) لتقدير طاقة الترابط الكلية لكلّ مما يلي: (أ) $^{238}_{92}\text{U}$. (ب) $^{84}_{36}\text{Kr}$.

11. (II) استعمل الملحق B لحساب طاقة الترابط للديتيريوم ^2_1H.

12. (II) احسب طاقة الترابط لكلّ نيوكلون لنواة $^{14}_{7}\text{N}$.

13. (II) حدد طاقة الترابط للنيوترون الأخير في نواة $^{40}_{19}\text{K}$.

14. (II) احسب طاقة الترابط الكلية وطاقة الترابط لكلّ نيوكلون فيما يلي: (أ) ^6_3Li . (ب) $^{208}_{82}\text{Pb}$. استعمل الملحق B.

15. (II) قارن متوسّط طاقة الترابط لنيوكلون في نواة $^{23}_{11}\text{Na}$ مع تلك التي لنيوكلون في نواة $^{24}_{11}\text{Na}$.

16. (III) ما كمية الطاقة اللازمة لنزع: (أ) بروتون؟ (ب) نيوترون من $^{16}_{8}\text{O}$؟ وضح الفرق في الإجابتين.

17. (III) (أ) بين أنّ النواة ^8_4Be (كتلتها = 8.005305 u) غير مستقرة وتضمحل إلى جُسيمي α. (ب) هل $^{12}_{6}\text{C}$ مستقرٌّ بالنسبة للاضمحلال إلى ثلاثة جُسيمات α؟ وضح جوابك إنّ كان بالنفي أو الإيجاب.

30 – 3 إلى 30 – 7 الاضمحلال الإشعاعي

18. (I) كم كمية الطاقة التي تتحرر عندما يضمحل التريتيوم ^3_1H بانبعاث جُسيم β^-؟

19. (I) ما الطاقة الحركية القصوى للإلكترون المنبعث في اضمحلال β لنيوترون حرّ؟

20. (I) أثبت أنّ الاضمحلال $^{11}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{10}_{5}\text{B} + \text{p}$ غير ممكن الحدوث؛ لأنّ الطاقة لن تكون محفوظة.

21. (II) إنّ عنصر $^{22}_{11}\text{Na}$ مشع.(أ) هل هو باعث لجُسيم β^- أم β^+؟ (ب) اكتب تفاعل الاضمحلال، وقدر الطاقة الحركية القصوى لجُسيم β المنبعث.

22. (II) اعط النتيجة الحسابية التي تبين أنّ كلّ اضمحلال فيما يلي ممكن الحدوث أم لا:

(أ) $^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{235}_{92}\text{U} + \text{n}$

(ب) $^{16}_{8}\text{O} \rightarrow {}^{15}_{8}\text{O} + \text{n}$

(جـ) $^{23}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{22}_{11}\text{Na} + \text{n}$

23. (II) تُصدر نواة $^{238}_{92}\text{U}$ جُسيم α ذا الطاقة الحركية التي تساوي 4.20 MeV. (أ) ما النواة الوليدة؟ (ب) ما الكتلة الذرية التقريبية (بوحدة u) لذرة النواة الوليدة؟ أهمل ارتداد النواة الوليدة.

24. (II) ما الطاقة الحركية القصوى للإلكترون المنبعث من اضمحلال $^{23}_{10}\text{Ne}$ (كتلته = 22.9945 u) إلى $^{23}_{11}\text{Na}$ (كتلته = 22.9898 u)؟ ما أقل قيمة لطاقته؟ ما طاقة النيوترينو في كلّ حالة؟ أهمل ارتداد النواة الوليدة.

25. (II) نواة كتلتها 238 u، بداية ساكنة، تصدر جُسيم α طاقته الحركية 5.0 MeV. ما الطاقة الحركية للنواة الوليدة المرتدة؟

26. (II) ما الطاقة الحركية القصوى لجُسيم β المنبعث خلال اضمحلال $^{60}_{27}\text{Co}$؟

27. (II) تضمحل نواة $^{32}_{15}\text{P}$ بانبعاث إلكترون طاقته الحركية القصوى يمكن أن تكون في حدود 1.71 MeV. (أ) ما النواة الوليدة؟ (ب) احسب الكتلة الذرية للنواة الوليدة (بوحدة u).

28. (II) يمكن للنظير $^{218}_{84}\text{Po}$ أن يضمحلّ بانبعاث جُسيم α أو جُسيم β^- ، كم كمية الطاقة التي تتحرر في كلّ حالة؟ كتلة $^{218}_{84}\text{Po}$ تساوي 218.008965 u.

29. (II) كم كمية الطاقة المتحررة عند أسر إلكترون بواسطة نواة البريليوم: $^7_4\text{Be} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^7_3\text{Li} + \nu$

30. (II) خرج فوتون طوله الموجي $1.00 \times 10^{-13}\ \text{m}$ من ذرة. احسب طاقته ووضح سبب القول إنّه أشعة جاما من النواة أو فوتون من الذرة.

31. (II) حدد الطاقة الحركية القصوى لجُسيم β^+ الذي ينبعث عندما يضمحل $^{11}_{6}\text{C}$ إلى $^{11}_{5}\text{B}$. ما الطاقة القصوى التي يمكن أن يمتلكها النيوترينو؟ وما أقل طاقة له؟

32. (II) كم طاقة الارتداد التي تحصل عليها نواة $^{40}_{19}\text{K}$ عندما تُصدر أشعة جاما طاقتها 1.46 MeV؟

33. (III) ما طاقة جُسيم α الذي ينبعث خلال الاضمحلال $^{210}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{206}_{82}\text{Pb} + \alpha$؟ خذ بالحسبان ارتداد النواة الوليدة.

34. (III) ينبعث جُسيم α عند اضمحلال $^{238}_{92}\text{U}$، بطاقة حركية تساوي 4.20 MeV. احسب الطاقة الحركية التي ترتد بها النواة الوليدة وقيمة Q- للاضمحلال.

35. (III) بين أنّه عند اضمحلال نواة بانبعاث جُسيم β^+، فإنّ الطاقة الكلية المتحررة تساوي

$$(M_\text{P} - M_\text{D} - 2m_\text{e})c^2$$

حيث M_P و M_D كتلتا الذرات (متعادلة) الأم والوليدة على الترتيب؛ و m_e كتلة إلكترون أو بوزيترون.

30 – 8 إلى 30 – 11 عمر النصف، معدلات الاضمحلال، سلاسل الاضمحلال، تقدير العمر.

36. (I) ينتج من مادة مشعة 1280 اضمحلالاً لكلّ دقيقة في وقت واحد. وبعد 4.6 h ينتج منها 320 اضمحلالاً لكلّ دقيقة. ما عمر النصف لهذه المادة؟

37. (I) (أ) ما ثابت الاضمحلال لنواة $^{238}_{92}U$ علمًا أنّ عمر النصف لها يساوي $4.5 \times 10^9\,yr$؟ (ب) ما عمر النصف لنواة ثابت اضمحلالها $8.2 \times 10^{-5}\,s^{-1}$؟

38. (I) ما الشدة الإشعاعية لعينة من $^{14}_{6}C$ تحتوي على 3.1×10^{20} نواة؟

39. (I) ما الجزء المتبقي من عينة $^{68}_{32}Ge$، عمرها النصفي حوالي 9 أشهر، بعد ثلاث سنوات؟

40. (I) بالضبط، ما الجزء المتبقي من عينة بعد ستة أضعاف عمر النصف؟

41. (II) كم عدد أنوية $^{238}_{92}U$ المتبقية في صخرة سجلت شدتها الإشعاعية 640 اضمحلالا/ ثانية؟

42. (II) في سلسلة اضمحلال تصبح نواة $^{235}_{92}U$ نواة $^{207}_{82}Pb$. كم عدد جُسيمات α و β^- التي تنبعث في هذه السلسلة؟

43. (II) يستعمل نظير اليود $^{131}_{53}I$ في المستشفيات لتشخيص عمل الغدّة الدرقية. إذا تناول مريضٌ مقدارَ $682\,\mu g$ فحدد الشدة الإشعاعية: (أ) مباشرة بعد تناول الجرعة. (ب) بعد ساعة من فحص الغدة الدرقية. (جـ) بعد ستة أشهر من تناول الجرعة. استعمل الملحق B.

44. (II) يبلغ عمر النصف لنواة $^{124}_{55}Cs$ 30.8 s.(أ) إذا كان لدينا بداية $8.8\,\mu g$، فكم عدد أنوية Cs الموجودة؟ (ب) كم عدد الأنوية الموجودة بعد ثانيتين؟ (جـ) كم الشدة الإشعاعية عند هذه اللحظة؟ بعد مضي كم من الوقت تنخفض الشدة الإشعاعية إلى أقل من حوالي 1 لكلّ ثانية؟

45. (II) احسب كتلة عينة نقية من $^{40}_{19}K$ بمعدل اضمحلال ابتدائي مقداره $2.0 \times 10^5\,s^{-1}$. علمًا بأنّ عمر النصف لنواة $^{40}_{19}K$ يساوي $1.28 \times 10^9\,yr$.

46. (II) احسب الشدة الإشعاعية لعينة نقية من $^{32}_{15}P$ كتلتها $7.9\,\mu g$ $(T_{\frac{1}{2}} = 1.23 \times 10^6\,s)$.

47. (II) الشدة الإشعاعية لعينة من $^{35}_{16}S$ $(T_{\frac{1}{2}} = 7.55 \times 10^6\,s)$ تساوي 2.65×10^5 اضمحلال لكلّ ثانية. ما كتلة هذه العينة؟

48. (II) تحتوي عينة من على $^{233}_{92}U$ $(T_{\frac{1}{2}} = 1.59 \times 10^5\,yr)$ 7.50×10^{19} نوية. (أ) ما ثابت الاضمحلال؟ (ب) كم اضمحلالا يحدث في كلّ دقيقة تقريبًا؟

49. (II) تنخفض الشدة الإشعاعية لعينة ما بعامل 10 في 8.6 دقيقة. ما عمر النصف لهذه العينة؟

50. (II) تحتوي عينة كربون نقية كتلتها 285 g على 1.3×10^{12} ذرة من $^{14}_{6}C$. كم عدد الاضمحلال الذي يحدث لكلّ ثانية؟

51. (II) تضمحل عينة $^{40}_{19}K$ بمعدل $6.70 \times 10^2\,decays/s$ ما كتلة هذه العينة؟

52. (II) يُستخدم نظير الروبيديوم $^{87}_{37}Rb$، وهو باعث لجُسيم β وعمره النصفي $4.75 \times 10^{10}\,yr$، لتحديد عمر الصخور والمتحجرات. تحتوي الصخور على متحجرات حيوانات قديمة تحتوي على نسبة من $^{87}_{38}Sr$ إلى $^{87}_{37}Rb$ تساوي 0.0160. على افتراض أنّ $^{87}_{38}Sr$ لم يكن موجودًا عندما تشكلت الصخور، قدّر عمر هذه المتحجرات [مساعدة: استخدم المعادلة 30 – 3].

53. (II) استخدم (الشكل 30 – 11) لحساب معدلات الاضمحلال النسبية لاضمحلال α في $^{218}_{84}Po$ و $^{214}_{84}Po$.

54. (II) يضمحل $^{7}_{4}Be$ بعمر نصفي مقداره 53 يومًا تقريبًا. ينتج هذا النظير في الطبقات العلوية للغلاف الجوي، ثم يُصفى ويسقط على سطح الأرض. إذا تبين أنّ ورقة نبات تمتلك 450 decays/s من $^{7}_{4}Be$ (أ) كم الزمن الذي يجب أن ننتظره حتى ينخفض معدل الاضمحلال إلى 15 لكلّ ثانية؟ (ب) قدّر كتلة $^{7}_{4}Be$ الأولية الموجودة في ورقة النبات.

55. (II) يحدث الاضمحلال الإشعاعيّ الطبيعي لنواتي $^{232}_{90}Th$ و $^{235}_{92}U$ في سلسلتين متعاقبتين. تعطى أول خمسة اضمحلالات للسلسلة الأولى كما يلي:

$$\alpha, \beta, \beta, \alpha, \alpha$$

والسلسلة الثانية:

$$\alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha$$

حدّد الأنوية الوليدة المتوسطة الناتجة في كلّ حالة.

56. (II) وجدت هراوة خشبيّة قديمة تحتوي على 290 g من الكربون وشدتها الإشعاعية 8.0 اضمحلالات لكلّ ثانية. حدد عمرها على فرض أنّ نسبة ذرات $^{14}C/^{12}C$ في الأشجار الحية تساوي حوالي 1.3×10^{-12}.

57. (III) عند اللحظة $t = 0$، عينة نقية من أنوية مشعة تحتوي على N_0 نوية ثابت اضمحلالها λ. حدد صيغة رياضية لعدد الأنوية الوليدة N_D كدالة في الزمن؛ افرض أنّ النواة الوليدة مستقرّة، وأنّ $N_D = 0$ عند اللحظة $t = 0$.

مسائل عامة

58. أيّ من النظائر المشعة للرصاص ينتج من تفاعل حيث تنخفض الشدة الإشعاعية المقيسة في عينة إلى 1.050% من الشدة الإشعاعية الأصلية في 4.00 h؟

59. وجدت قطعة خشبيّة قديمة تحتوي على 6.0% فقط من $^{14}_{6}C$ الموجود في عينة حديثة من نوع الخشب نفسه. كم عمر هذه القطعة؟

60. يحتوي نجم نيوتروني على نيوترونات بما يقارب الكثافة النووية. بالنسبة إلى نجم نيوتروني قطره 10 km، قدر: (أ) عدده الكتلي. (ب) كتلته بوحدة kg.(ج) تسارع الجاذبية على سطحه.

61. يُسَمّى نظير الهيدروجين $^{3}_{1}H$ التريتيوم (لأنّه يحتوي على ثلاثة نيوكلونات) ويبلغ عمر النصف له 12.33 yr. يمكن استعمال هذا النظير في قياس عمر أجسام يصل عمرها إلى حوالي 100 yr. ويُنتج في الطبقات العليا للغلاف الجوي بواسطة الإشعاعات الكونية، ويصل إلى سطح الأرض عن طريق المطر. كتطبيق لذلك، حدد، على نحو تقريبي، عمر زجاجة نبيذ فيها إشعاعات $^{3}_{1}H$ تساوي حوالي $\frac{1}{10}$ من تلك الموجودة في النبيذ الجديد.

62. تقترح بعض نظريات الجُسيمات الأولية أنّ البروتون غير مستقر وعمر النصف له $\geq 10^{32}\,yr$. كم الوقت المتوقع الذي يجب أن تنتظره حتى يضمحل بروتون في جسمك (افترض أنّ جسمك كلّه ماء)؟

63. كم يجب أن تنتظر (بدلالة أعمار النصف) حتى تنخفض الشدة الإشعاعية لعينة إلى 100% من شدتها الإشعاعية الأصلية؟

64. إذا كان نظير البوتاسيوم $^{40}_{19}\mathrm{K}$ في لتر حليب يعطي 60 اضمحلالا في الثانية، فقدر كمية $^{40}_{19}\mathrm{K}$ و $^{39}_{19}\mathrm{K}$ الاعتيادي الموجودة في لتر حليب. استعمل الملحق B.

65. (أ) في اضمحلال α لنواة $^{226}_{88}\mathrm{Ra}$، بيّن أنّ النواة تحمل جزءًا من الطاقة المتوافرة للتفاعل يساوي $1/(1+\frac{1}{4}A_D)$، حيث A_D يمثل العدد الكتلي للنواة الوليدة. (مساعدة: استعمل حفظ كمية التحرك بالإضافة إلى حفظ الطاقة). (ب) تقريبًا، كم النسبة المئوية من الطاقة المتوافرة التي يحملها جُسيم α في الحالة المذكورة أعلاه؟

66. ينتج الاسترونشيوم – 90 من الانشطار النووي لليورانيوم في كلّ من المفاعلات والقنابل الذرية. انظر إلى موقعه في الجدول الدوري لتعرف العناصر الأخرى التي قد تشبهه من الناحية الكيميائية، وبيّن خطر تناوله. يحتوي هذا العنصر على العديد من النيوترونات التي تضمحل بعمر نصف يبلغ حوالي 29 yr. ما الزمن اللازم انتظاره حتى تصل كمية $^{90}_{38}\mathrm{Sr}$ الموجودة على سطح الأرض إلى 1% من مستواها الحالي، على فرض عدم تبعثر مواد جديدة على مقربة منه؟ اكتب تفاعل الاضمحلال بما في ذلك النواة الوليدة. النواة الوليدة مشعة، اكتب عملية اضمحلالها.

67. تضمحل نواة $^{191}_{76}\mathrm{Os}$ بانبعاث β^- طاقتها 0.14 MeV مصحوبة بإشعاعات جاما طاقتها 0.042 MeV و 0.129 MeV.
(أ) ما النواة الوليدة؟ (ب) ارسم مخطط مستوى الطاقة مبينًا الحالات الأرضية للنواة الأم، والنواة الوليدة، وحالات التهيج للنواة الوليدة. لأيّ الحالات للنواة الوليدة يحدث اضمحلال $^{191}_{76}\mathrm{Os}$ بانبعاث جُسيم β^-؟

68. حدّد الشدة الإشعاعية لكلّ من: (أ) 1.0 g من $^{131}_{53}\mathrm{I}$ $(T_{\frac{1}{2}} = 8.02\ \mathrm{days})$ (ب) 1.0 g من $^{238}_{92}\mathrm{U}$ $(T_{\frac{1}{2}} = 4.47 \times 10^9\ \mathrm{yr})$.

69. قدّر طاقة الترابط الكلية للنحاس، ثم قدّر الطاقة (بالجول) اللازمة لتفكك قطعة نقدية من النحاس كتلتها 3.0 g إلى النيوكلونات المكونة لها. [مساعدة: استعمل الشكل 30 – 1].

70. تعطي بعض الجداول الكتلة الفائضة، Δ التي تعرف على أنها $\Delta = M - A$، حيث A العدد الذري، و M الكتلة بوحدة u بدلا من الكتل الذرية للأنوية كما في الملحق B. حدد الكتلة الفائضة بوحدتي u وMeV/c^2 لكلّ من: (أ) $^4_2\mathrm{He}$. (ب) $^{12}_6\mathrm{C}$. (ج) $^{107}_{47}\mathrm{Ag}$. (د) $^{235}_{92}\mathrm{U}$. (هـ) عند إلقاء نظرة سريعة على الملحق B، هل يمكنك عمل تعميم حول إشارة Δ كدالة في Z أو A.

71. (أ) تحتوي عينة كربون طبيعية كتلتها 92 غرامًا على الجزء الاعتيادي $^{14}_6\mathrm{C}$. قدر الزمن الذي تحتاج إليه قبل أن تبقى نواة واحدة فقط $^{14}_6\mathrm{C}$. (ب) كيف تتغير الإجابة في (أ) إذا كانت كتلة العينة 280 غراما؟ ماذا يخبرنا هذا بخصوص حدود التأريخ بواسطة الكربون؟

72. إذا كانت كتلة البروتون أقرب قليلا إلى كتلة النيوترون، فإنّ التفاعل التالي قد يكون ممكنًا حتى عند طاقات التصادم المنخفضة:

$$e^- + p \rightarrow n + \nu$$

لِمَ تعدّ هذه الحالة كارثية؟ ما النسبة المئوية التي يجب أن تزداد بها كتلة البروتون ليكون هذا التفاعل ممكنًا؟

73. ما نسبة الطاقة الحركية لجُسيم ألفا إلى تلك التي لجُسيم بيتا إذا عمل كلّ منهما مسارات لها نصف قطر الانحناء نفسه في مجال مغناطيسي يوجه عموديًّا على مسارات الجُسيمات؟

74. عينة سمريوم طبيعية كتلتها 1.00 g تصدر جُسيمات α بمعدل $120\ \mathrm{s}^{-1}$ بسبب وجود $^{147}_{62}\mathrm{Sm}$. فإذا كانت الوفرة الطبيعية لهذا العنصر 15%، فاحسب عمر النصف لعملية الاضمحلال هذه.

75. يتمثل اليورانيوم الطبيعي كلّه تقريبًا في $^{238}_{92}\mathrm{U}$، وعمره النصفي $4.468 \times 10^9\ \mathrm{yr}$. أما الجزء المتبقي فيتمثل أغلبه في $^{235}_{92}\mathrm{U}$، وعمره النصفي $7.038 \times 10^8\ \mathrm{yr}$. تحتوي عينة في الوقت الحاضر على 0.72% من $^{235}_{92}\mathrm{U}$. (أ) كم كانت هذه النسبة المئوية قبل مليار سنة؟ (ب) كم النسبة المئوية من العينة ستكون لِـ $^{235}_{92}\mathrm{U}$ في 100 مليون سنة؟

76. يحتوي الموز العادي على 400 mg من البوتاس، جزء صغير منه هو النظير المشع $^{40}_{19}\mathrm{K}$ (انظر إلى الملحق ب). قدر الشدة الإشعاعية في الموز بسبب $^{40}_{19}\mathrm{K}$.

77. الحدّ العملي للتأريخ بواسطة الكربون حوالي 60,000 سنة. إذا احتوت عظمة على 1.0 kg من الكربون ونفق الحيوان قبل 60,000 سنة، فما الشدة الإشعاعية في الوقت الحاضر؟

78. يمكن تصنيف السلاسل الإشعاعية كتلك التي في (الشكل 30 – 11) إلى أربع عائلات اعتمادًا على الأعداد الكتلية فيما إذا كان شكلها $4n, 4n+1, 4n+2, 4n+3$، حيث n عدد صحيح. برّر صحة هذه العبارة، وأثبت أنّ الأنوية الوليدة جميعها لأيّ نواة في أيّ عائلة، سوف تكون في العائلة نفسها.

إجابات التمارين

أ: 0.0421 u

ب: 7.98 MeV/nucleon.

جـ: $1.37 \times 10^{-11}\ \mathrm{s}^{-1}$

د: لا: $(\frac{1}{2})(\frac{1}{2}) = \frac{1}{4}$ سوف يبقى.