في الصورة، تقنيّون ينظرون إلى صورة رنين مغناطيسي (MRI) لمقاطع من خلال جسم مريض. إنّ MRI واحد من أكثر أنواع التصوير الطبي قوة، ويعتمد على مبادئ الفيزياء، ويُستخدم من قبل الأطباء لتشخيص الأمراض.

نفتتح هذا الفصل بالموضوعات الفيزيائية الأساسية والمهمة التي تشمل التفاعلات النووية، والانشطار النوويّ، والاندماج النوويّ، وكيفية الحصول على الطاقة النووية. ومن ثمَّ سنختبر الموضوعات الصحية المرتبطة بالإشعاع كقياس الجرعة الإشعاعية، والزرع الإشعاعيّ، والتصوير بواسطة MRI، و PET، و SPET.

الفصل 31

الطاقة النوويَّة: تأثيرات الإشعاع واستخداماته

سنكمل دراستنا للفيزياء النووية بهذا الفصل، حيث نبدأ بمناقشة التفاعلات النووية، ثم اختبار الطاقة الكبيرة والمهمة الناتجة من الانشطار والاندماج النوويين. أما باقي الفصل، فسيركز على تأثيرات الإشعاعات النووية عندما تمرّ في المواد وبشكل جزئي في المواد البيولوجية، ثم كيفية استخدام الإشعاع طبيًّا في التشخيص والعلاج، وكذلك التطورات الحديثة لتقنيات التصوير.

1-31 التفاعلات النووية وتحوّلات العناصر

عندما تطلق نواة جُسيمات α أو β، فإنّ النواة الناتجة (الوليدة) تختلف عن النواة الأصلية (الأم) في عملية تدعى التحوّل (**transmutation**). وتظهر هذه العملية أيضًا في التفاعلات النووية. يظهر التفاعل النووي عندما تصطدم نواة معينة بنواة أخرى، أو بجسيم بسيط كأشعة γ، أو بنيوترون بحيث يحدث تفاعل بينهما. يعدّ إيرنست رذرفورد أول من كتب تقريرًا عن التفاعلات النووية، حيث لاحظ في عام 1919 أنّ بعض جُسيمات ألفا تُمتَص، وتُنتِج بروتونات عندما تخترق غاز النيتروجين، واستنتج من هذا أنّ أنوية النيتروجين تتحول إلى أنوية أكسجين من خلال التفاعل

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{17}_{8}\mathrm{O} + {}^{1}_{1}\mathrm{H}$$

حيث $^{4}_{2}\mathrm{He}$ جسي α، و$^{1}_{1}\mathrm{H}$ هو البروتون.

لقدِ اكْتُشِفَ عددٌ كبيرٌ جدًّا من التفاعلات النووية حتى الآن. وفي الواقع فإنّ كثيرًا من النظائر المشعة المستخدمة في المختبرات تصنع بواسطة التفاعلات النووية التي يمكن إنتاجها في المختبرات، ولكنّها موجودة في الطبيعة أيضًا. وقد رأينا في (الفصل 30) مثالا على ذلك: ${}^{14}_{6}\mathrm{C}$ يصنع بشكل مستمر في الغلاف الجوي من خلال التفاعل* $\mathrm{n} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + \mathrm{p}$.

ويمكن كتابة هذه التفاعلات بشكل مختصر $\mathrm{n} + {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} \rightarrow ? + \gamma$

التمرين أ: حدد الذرة الناتجة في التفاعل $\mathrm{n} + {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} \rightarrow ? + \gamma$.

في أي تفاعل نووي، يتم حفظ الشحنة وكتل الأنوية. وعادة تكون قوانين الحفظ هذه مفيدة كما يبين المثال التالي.

المثال المفاهيمي 31-1 تفاعل الديتيريوم

الديتيريوم

عند اصطدام النيوترون بنواة ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$، ينتج الديتيريوم (أو الديوترون) من هذا التفاعل (الديوترون أو الديتيريوم هو أحد نظائر الهيدروجين، ويحتوي بروتونًا واحدًا ونيوترونًا واحدًا ${}^{2}_{1}\mathrm{H}$، و يشار إليه في بعض الأحيان بالرمز d أو D).

ما هي النواة التي تنتج من هذا التفاعل؟

الإجابة: لدينا التفاعل $\mathrm{n} + {}^{16}_{8}\mathrm{O} \rightarrow ? + {}^{2}_{1}\mathrm{H}$. العدد الكلي في البداية للنيوكليونات $16 + 1 = 17$. والشحنة الكلية $8 + 0 = 8$. وهذه الأرقام يجب أن تكون نفسها في النواتج، والنواة الناتجة يجب أن يكون لها $Z = 7$، و $A = 15$. ومن الجدول الدوري، نجد أنها نواة نيتروجين، ${}^{15}_{7}\mathrm{N}$.

إنّ الطاقة وكمية الحركة (الزخم) يجب أن يكونا محفوظين أيضًا في التفاعلات النووية. ويمكن استعمالهما لتحديد إمكانية حصول التفاعل أو عدم حصوله. فعلى سبيل المثال، إذا كانت الكتلة الكلية في النواتج أقلّ من الكتلة الكلية للمتفاعلات، فهذا النقصان في الكتلة (تذكر أنّ $\Delta E = \Delta m\, c^2$) يتحول إلى طاقة حركية للجُسيمات الناتجة، أما إذا كانت كتلة النواتج أكبر من كتلة المتفاعلات، فإنّ هذا التفاعل لا يمكن أن يحدث إلا إذا امتلكت الجُسيمات المقذوفة طاقة حركية كافية. ويمكن تمثيل التفاعل النووي بشكل عام بالصورة الآتية:

$$\mathrm{a} + \mathrm{X} \rightarrow \mathrm{Y} + \mathrm{b}$$

حيث a هو الجسيم المقذوف (ويمكن أن يكون نواة صغيرة) الذي يصطدم بالنواة X لإنتاج النواة Y والجُسيم b (في العادة $\mathrm{p}, \mathrm{n}, \alpha, \gamma$).

نُعرّف طاقة التفاعل أو القيمة Q ($Q - value$) بدلالة الكتل المعطاة كما يلي:

القيمة (Q)

$$Q = (M_\mathrm{a} + M_\mathrm{X} - M_\mathrm{b} - M_\mathrm{Y})c^2 \qquad \textbf{(1-31)}$$

وهذه جميعها كتل ساكنة ولأشعة γ تكون $M = 0$. وبسبب أنّ الطاقة محفوظة، فإنّ Q تساوي التغير في الطاقة الحركية (النهائية ناقص الابتدائية):

حفظ الطاقة

$$Q = \mathrm{KE_b} + \mathrm{KE_Y} - \mathrm{KE_a} - \mathrm{KE_X} \qquad \textbf{(2-31)}$$

في كثير من التفاعلات، $\mathrm{KE_X} = 0$ حيث تكون الذرة الهدف X ساكنة قبل أن يصطدم بها الجسيم a.

إذا كانت $Q > 0$، فإنّ التفاعل يكون طاردًا للطاقة (*exothermic or exoergic*) وتنتج طاقة من التفاعل، حيث تكون الطاقة الحركية للنواتج أكبر منها للمتفاعلات، إما إذا كانت Q سالبة أي $(Q < 0)$، فإنّ التفاعل يكون ماصًّا للطاقة (*endothermic or endoergic*) وفي هذه الحالة تكون الطاقة الحركية النهائية أقلّ من الطاقة الحركية الابتدائية. لذا، نحتاج إلى طاقة كي يحدث التفاعل. تأتي الطاقة الداخلة من الطاقة الحركية للجُسيمات المتصادمة (X و a).

المثال 2-31 تفاعل النيوترون البطيء: التفاعل النوويّ

$$\mathrm{n} + {}^{10}_{5}\mathrm{B} \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

يلاحظ حدوثه حتى لو كان النيوترون بطيئًا جدّا عند اصطدامه بذرة البورون $(M_\mathrm{n} = 1.0087\ \mathrm{u})$. في هذا التفاعل، إذا اعتبرنا أنّ $\mathrm{KE_n} \approx 0$، وكتلة نوة الهيليوم الناتجة $M_\mathrm{He} = 4.0026\ \mathrm{u}$، وتمتلك سرعة مقدارها $9.30 \times 10^6\ \mathrm{m/s}$. احسب ما يلي: (أ) الطاقة الحركية لنواة الليثيوم $(M_\mathrm{Li} = 7.0160\ \mathrm{u})$. (ب) القيمة Q لهذا التفاعل.

* تكتب التفاعلات النووية أحيانًا باختصار على النحو: $\mathrm{n} + {}^{14}_{7}\mathrm{N} \rightarrow {}^{14}_{6}\mathrm{C} + \mathrm{p}$

وتكتب:

$${}^{14}_{7}\mathrm{N}\ (\mathrm{n}, \mathrm{p})\ {}^{14}_{6}\mathrm{C}$$

الرموز خارج القوسين إلى اليسار واليمين تمثل القوى الداخلة والخارجة من التفاعل بالتركيب، والرموز داخل القوسين تمثل الجسيم المقذوف (الأول) والجسيم المنطلق (الثاني).

النّهج: حيث إنّ كلاًّ من البروتون والنيوترون ساكن، فإنّ كمية الحركة قبل التفاعل تساوي صفرًا، وحيث إنّ كمية الحركة محفوظة، فيجب أن تساوي صفرًا أيضًا بعد التفاعل. لذا، يكون

$$M_{\text{Li}}\, v_{\text{Li}} = M_{\text{He}}\, v_{\text{He}}$$

ونجد قيمة v_{Li} ونعوضها في معادلة الطاقة الحركية.

الحلّ: (أ) نستطيع استخدام المعادلة الكلاسيكية للطاقة الحركية بخطأ قليل بدلًا من الصيغة النسبيّة؛ لأنّ $v_{\text{He}} = 9.30 \times 10^6\ \text{m/s}$ ليست قريبة من سرعة الضوء c، وستكون v_{Li} أقلّ؛ لأنّ $M_{\text{Li}} > M_{\text{He}}$. إذن، يمكن أن نكتب

$$\text{KE}_{\text{Li}} = \frac{1}{2} M_{\text{Li}} v_{\text{Li}}^2 = \frac{1}{2} M_{\text{Li}} \left(\frac{M_{\text{He}} v_{\text{He}}}{M_{\text{Li}}} \right)^2 = \frac{M_{\text{He}}^2 v_{\text{He}}^2}{2M_{\text{Li}}}$$

وبالتعويض بالأرقام مع وضع الكتلة بوحدة kg بدلا من u، وتذكُّر أنّ $1.60 \times 10^{-13}\ \text{J} = 1\ \text{MeV}$ فإننا نحصل على

$$\text{KE}_{\text{Li}} = \frac{(4.0026\ \text{u})^2 (1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg/u})^2 (9.30 \times 10^6\ \text{m/s})^2}{2(7.0160\ \text{u})(1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg/u})}$$

$$= 1.64 \times 10^{-13}\ \text{J} = 1.02\ \text{MeV}$$

(ب) لدينا $\text{KE}_{\text{a}} = \text{KE}_{\text{X}} = 0$، وبالتعويض في (المعادلة 31 - 2) سنحصل على $Q = \text{KE}_{\text{Li}} + \text{KE}_{\text{He}}$ حيث

$$\text{KE}_{\text{He}} = \tfrac{1}{2} M_{\text{He}} v_{\text{He}}^2 = \tfrac{1}{2} (4.0026\ \text{u})(1.66 \times 10^{-27}\ \text{kg/u})(9.30 \times 10^6\ \text{m/s})^2$$

$$= 2.87 \times 10^{-13}\ \text{J} = 1.80\ \text{MeV}$$

وبالتالي تكون $Q = 1.02\ \text{MeV} + 1.80\ \text{MeV} = 2.82\ \text{MeV}$.

المثال 3-31 هل يمكن حدوث التفاعل؟

هل يمكن للتفاعل $\text{p} + {}^{13}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{13}_{7}\text{N} + \text{n}$ أن يحدث إذا قذفت نواة الكربون ${}^{13}_{6}\text{C}$ ببروتون طاقته 2.0-MeV؟

النّهج: (أ) سوف يحدث التفاعل إذا كان طاردًا للحرارة ($Q > 0$). وحتى لو كانت $Q < 0$ فيمكن أن يحدث هذا التفاعل إذا كانت كمية الحركة والطاقة الحركية الداخلة كافية. في البداية، سنحسب Q من الفرق بين الكتل الابتدائية والنهائية، باستخدام (المعادلة 13 - 1)، وبتعويض قيم الكتل من الملحق B:

الحل: مجموع الكتل قبل وبعد التفاعل هي كما يلي:

قبل التفاعل		بعد التفاعل	
$M({}^{13}_{6}\text{C})$	13.003355	$M({}^{13}_{7}\text{N})$	13.005739
$M({}^{1}_{1}\text{H})$	1.007825	$M(\text{n})$	1.008665
	14.011180		14.014404

(يجب أن نستخدم كتلة ${}^{1}_{1}\text{H}$ بدلا من كتلة البروتون المجردة؛ لأنّ الكتل ${}^{13}_{6}\text{C}$ و ${}^{13}_{7}\text{N}$ تحتوي على إلكترونات. لذا، يجب أن يكون لدينا عدد متساوٍ من كتل الإلكترونات في طرفي المعادلة بحيث لا يكون هنالك فناء أو استحداث لها). وتزداد كتلة الناتج بمقدار

$$(14.014404 - 14.011180)\text{u} = 0.003224\ \text{u} \times 931.5\ \text{MeV/u} = 3.00\ \text{MeV}$$

وتكون $Q = -3.00\ \text{MeV}$، والتفاعل ماصّ للطاقة. وهذا التفاعل يحتاج إلى طاقة، والبروتونات التي طاقتها 2.0 MeV ليست كافيةً لحدوث التفاعل.

طاقة العتبة

ملحوظة: يجب أن يمتلك البروتون في (المثال 31 – 3) طاقة حركية أكبر نوعًا ما من 3.00 MeV لجعل هذا التفاعل يحدث. إنّ الطاقة 3.00 MeV ستكون كافية لحفظ الطاقة، ولكن البروتون في هذه الطاقة سوف ينتج ${}^{13}_{7}\text{N}$ ونيوترون (n) دون طاقة حركية ولا كمية تحرك. وحيث إنّ البروتون الذي طاقته 3.0-MeV له كمية حركة، فإنّ قانون حفظ كمية التحرك سوف ينتهك. توضّح لنا الحسابات باستخدام قانوني حفظ الطاقة وكمية التحرك (الزخم) كما في (المثال 30 – 7 و 31 – 2) أنّ أقلّ طاقة للبروتون والتي تُسَمّى طاقة العتبة (**threshold energy**) تساوي 3.23 MeV في حالتنا هذه.

لقد كان للتحولات الصناعية للعناصر قفزات كبيرة إلى الأمام في ثلاثينيات القرن الماضي، عندما قام إنريكو فيرمي بالتحقق من أنّ النيوترونات هي أكثر قذيفة فاعلة لإحداث التفاعلات النووية وبشكل جزئي لإنتاج عناصر جديدة؛ لأنّ النيوترونات غير مشحونة، ولا تتنافر مع الأنوية موجبة الشحنة كما يحدث في حالة البروتونات أو جُسيمات ألفا، وهنا تكون احتمالية وصول النيوترون إلى النواة،* وعمل تفاعل نووي أكبر من الجُسيمات المشحونة وبشكل جزئي عند الطاقات المنخفضة. بين عامي 1934 و 1936، قام فيرمي مع زملائه بإنتاج الكثير من النظائر التي لم تكن معروفة قبل ذلك بقذف عناصر عديدة بالنيوترونات. تحقق فيرمي بأنه لو قذف أثقل عنصر معروف آنذاك وهو اليورانيوم بالنيوترونات، فمن المتوقع إنتاج عناصر جديدة لها عدد كتلي أكبر من العدد الكتلي لليورانيوم. وبعد عدة سنوات من العمل الجاد، تمّ إنتاج عنصرين من العناصر المتوقع وجودها، هما النيبتونيوم ($Z = 93$) والبلاتونيوم ($Z = 94$). ولكن التأكد التام من أنّ هذه العناصر المتحولة يمكن إنتاجها لم يتحقق إلا بعد عدّة سنوات في جامعة كاليفورنيا، بيركلي. التفاعلات موضحة في (الشكل 31 – 1).

وبعد زمن قليل، تبيّن أنّ ما شاهده فيرمي حقيقة عند قذف اليورانيوم كان عملية غريبة، تلك العملية التي اتجهت للعب قواعد استثنائية في العالم وعلى نطاق واسع. وسنناقش هذا في (البند 31 – 2).

31-2 الانشطار النووي؛ المفاعلات النووية

في عام 1938، قام العالمان الألمانيان أوتوهان وفريتزستراشمان باكتشاف رائع. وبتتبع عمل فيرمي، وجدا أنّ اليورانيوم عند قذفه بالنيوترونات فإنه ينتج أحيانًا أنوية أصغر، وذات حجم يساوي نصف حجم ذرة اليورانيوم الأصلية تقريبًا. قام كلّ من ليز ميتنر وأوتو فريش وهما لاجئان من ألمانيا النازية يعملان في إسكندنافيا بالتحقق مما حدث: تنشطر نواة اليورانيوم بعد امتصاصها للنيوترون إلى جزأين متساويين تقريبًا، وقد كان هذا مفاجئًا في الوقت الذي كانت فيه التفاعلات النووية المعروفة تستلزم خروج شظايا صغيرة (مثل n، أو p، أو α) من النواة.

الانشطار النووي والتفاعل المتسلسل

سُمِّيَتْ هذه الظاهرة الجديدة بالانشطار النووي **(nuclear fission)**؛ بسبب تشابهها مع الانشطار البيولوجي (انشطار الخلية). ويظهر الانشطار النووي بسهولة أكثر في $^{235}_{92}U$ منه في نواة اليورانيوم المعروفة $^{238}_{92}U$. العملية يمكن تخيلها بتشبيه نواة اليورانيوم بقطرة السائل. حسب نموذج قطرة السائل هذا، فإنّ النيوترون الممتص من نواة $^{235}_{92}U$ يعطي النواة طاقة داخلية إضافية (مثل تسخين قطرة الماء). هذه الحالة المتوسطة، أو النواة المركبة، هي $^{236}_{92}U$ (وذلك بسبب امتصاصها النيوترون) تظهر الطاقة الإضافية لهذه النواة التي تكون في حالة مستثارة على شكل حركة في النيوكليونات المنفصلة، والتي تجعل النواة تأخذ شكلًا مستطيلًا غير عادي، (الشكل 31 – 2). وعندما تستطيل النواة (في هذا النموذج) إلى الصورة الموضحة في (الشكل 31 – 2 جـ)، فإنّ جذب الطرفين من خلال القوة النووية قصيرة المدى يضعف كثيرًا بسبب زيادة المسافة الفاصلة، وتصبح قوة التنافر الكهربائية مسيطرة وتنشطر النواة إلى جزأين (الشكل 31 – 2د). النواتان الناتجتان X_1 و X_2 تسميان النواتين المتولدتين من الانشطار **(fission fragments)**. وفي هذه العملية ينتج عدد من النيوترونات (في العادة 2 أو 3). ويمكن كتابة هذا التفاعل كما يلي:

$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{236}_{92}U \rightarrow X_1 + X_2 + \text{نيوترونات} \qquad \textbf{(3-31)}$$

تظهر النواة الناتجة $^{236}_{92}U$ لفترة زمنية أقلّ من 10^{-12} s. وبالتالي تظهر العملية بسرعة كبيرة. تكون نسبة كتلتي النواتين المتولدتين من الانشطار مقارنة بنواة اليورانيوم الأصلية 40%، و 60% وليست مناصفة تمامًا. والشكل النموذجي للانشطار النووي هو

$$n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{141}_{56}Ba + {}^{92}_{36}Kr + 3n \qquad \textbf{(4-31)}$$

وقد ظهرت أيضًا عدة أشكال أخرى لهذه التفاعلات.

* وهذه دقائق مشحونة بشحنة موجبة. ونادرًا ما تحدث الإلكترونات تفاعلات نووية لأنّها لا تستطيع اختراق القوى النووية القوية.

(أ) $n + {}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{92}U$

الحصول على النيوترون بواسطة $^{238}_{92}U$

(ب) $^{239}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{93}Np + e^- + \bar{\nu}$

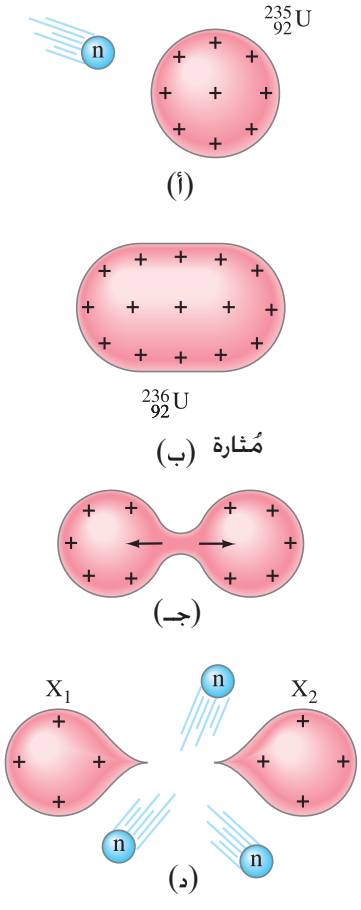
$^{239}_{92}U$ يضمحل عن طريق β لإنتاج النبتونيوم-239

(جـ) $^{239}_{93}Np \rightarrow {}^{239}_{94}Pu + e^- + \bar{\nu}$

يضمحل $^{239}_{93}Np$ نفسه عن طريق إشعاع β لإنتاج البلوتونيوم– 239

الشكل 31 – 1

إنتاج النبتونيوم والبلوتونيوم في سلسلة من التفاعلات الناتجة من قذف $^{238}_{92}U$ بالنيوترونات.



الشكل 31 – 2

انشطار نواة $^{235}_{92}U$ بعد اقتناص نيوترون حسب نموذج قطرة السائل.

المثال المفاهيمي 31-4 **إيجاد عدد النيوكليونات**

عُرّف العنصر X في التفاعل الانشطاري التالي: $n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{A}_{Z}X + {}^{93}_{38}Sr + 2n$.

الإجابة: عدد النيوكليونات محفوظ (البند 30 – 7). عدد النيوكليونات 235 في نواة اليورانيوم بالإضافة إلى النيوترون القذيفة يساوي $235 + 1 = 236$، ويجب أن يكون لدينا 236 نيوكليونا بعد التفاعل. نواة Sr تمتلك 93 نيوكليونًا، وبالإضافة للنيوترونين الناتجين، فإنها تمتلك 95 نيوكليونًا. أمّا X فيكون لها $A = 236 - 95 = 141$. كما أنّ الشحنة الكهربائية تكون محفوظة أيضًا، وقبل التفاعل، تكون الشحنة الكلية $92e$. ولكن بعد التفاعل، تكون الشحنة الكلية $(Z + 38)e$ وهذه يجب أن تساوي $92e$. لذلك، يكون $Z = 92 - 38 = 54$. إنّ العنصر الذي له $Z = 54$ (انظر الملحق B أو الجدول الدوري) هو الزينون Xe، ويكون الناتج هو النظير ${}^{141}_{54}Xe$.

التمرين ب: في التفاعل الانشطاري نيوترونات $n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{137}_{53}I + {}^{96}_{39}Y +$ كم عدد النيوترونات الناتجة؟

يرينا (الشكل 31 – 3) توزيع الأجزاء الانشطارية حسب الكتلة. لاحظ أنّه نادرًا (حوالي 1 من 10^4) ما تكون نواتج الانشطار لها كتل متساوية (السهم الصغير في الشكل 31 – 3).

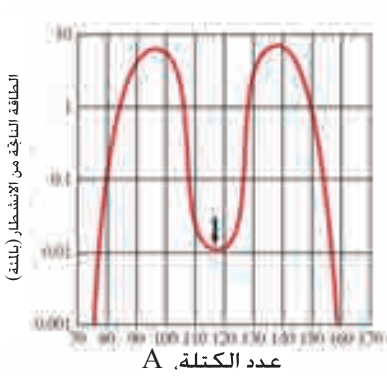
تنتج كمية طاقة هائلة من التفاعل الانشطاري؛ لأنّ كتلة النواة ${}^{235}_{92}U$ أكبر من الكتلة الكلية للأجزاء الناتجة من الانشطار بالإضافة إلى كتلة النيوترونات الناتجة، ويمكن أن نرى هذا من منحنى طاقة الربط لكلّ نيوكليون الموضح في (الشكل 30 – 1). طاقة الربط لكلّ نيوكليون لليورانيوم تساوي 7.6 MeV/nucleon تقريبًا. ولكن للأجزاء الناتجة التي يكون لها كتل متوسطة (في المقطع المركزي للرسم، $A \approx 100$) فإنّ معدل طاقة الربط لكلّ نيوكليون تساوي 8.5 MeV/nucleon تقريبًا، حيث تكون الأنوية الناتجة مترابطة أكثر، ويكون لها كتل أقلّ.

إنّ الفرق في الكتلة أو الطاقة بين ذرة اليورانيوم الأصلية والأنوية الناتجة من التفاعل يساوي تقريبًا $8.5 - 7.6 = 0.9$ MeV لكلّ نيوكليون. وحيث إنه ينتج 236 نيوكليونا خلال كلّ انشطار، فإنّ الطاقة الكلية الناتجة من كلّ انشطار تساوي

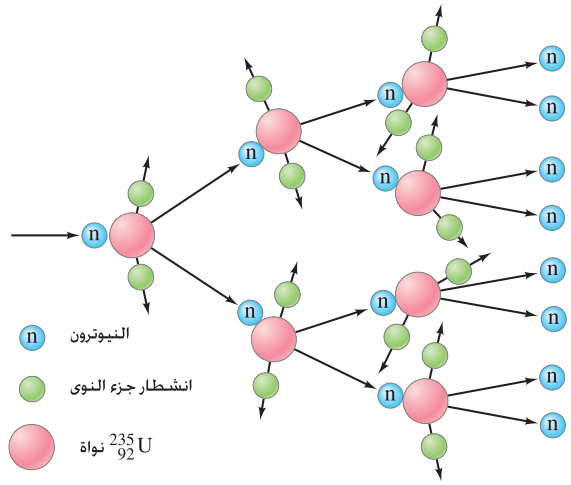
$$(0.9\ \text{MeV/nucleon})(236\ \text{nucleons}) \approx 200\ \text{MeV} \qquad \textbf{(31 – 5)}$$

الطاقة الناتجة من كلّ انشطار.

وهذه كمية طاقة ضخمة لحدث نووي واحد. في المستوى العملي، الطاقة الناتجة من انشطار واحد هي صغيرة جدًا طبعًا ولكن، إذا حدثت انشطارات كثيرة مشابهة في زمن قصير، فيمكن حينها توفير كمية ضخمة من الطاقة في المستوى الجاهري. كثير من الفيزيائيين، بمن فيهم فيرمي، يدركون أنّ النيوترونات الناتجة في كلّ انشطار (المعادلتان 31 - 3 و 31 - 4) تستخدم لإنتاج ما يُسَمّى بالتفاعل المتسلسل. في البداية، يسبب النيوترون انشطارًا واحدًا لنواة اليورانيوم فينتج نيوترونين أو ثلاثة قادرة على إنتاج انشطارت إضافية. وتتكرر هذه العملية كما هو واضح في (الشكل 31 – 4). إنّ التفاعل المتسلسل المدعوم ذاتيًّا وجد أنه ممكن الحدوث من الناحية العملية. ويمكن الحصول على الطاقة الهائلة الناتجة في الانشطار النووي على مستوى أكبر، وذلك بعدما أثبت فيرمي وزملاؤه (في جامعة شيكاغو) إمكانية هذا من خلال بناء أول مفاعل نووي عام 1942 (الشكل 31 – 5).



الشكل 31 – 3 التوزيع الكتلي للأنوية الناتجة من الانشطار ${}^{235}_{92}U + n$. يدل السهم الصغير على الكتل المتساوية للنواتج $\left(\frac{1}{2} \times (236 - 2) = 117\right)$ لاحظ أنّ التدريج العمودي لوغاريتمي



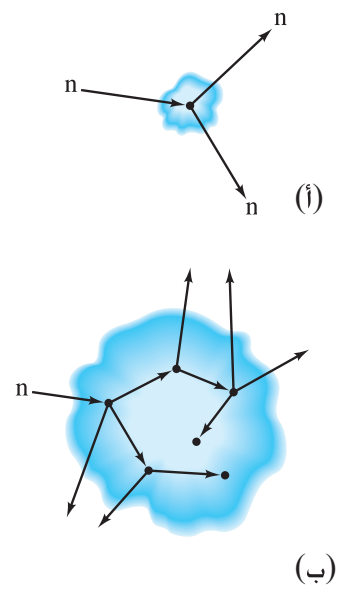
الشكل 31 – 4 التفاعل المتسلسل

الشكل 31 – 5 رسم ملوّن لأول مفاعل نووي بناه فيرمي تحت المدرج المسقوف لحقل ستاج في جامعة شيكاغو (لا توجد صورة للمفاعل لأنه يعدّ سرًّا عسكريا). استخدم اليورانيوم الطبيعي مع الجرافيت كمهدئ. في الثاني من كانون الأول عام 1942 سحب فيرمي قضبان التحكم المكونة من الكادميوم وبدأ المفاعل بالعمل. أول إثبات شخصي للتفاعل المستلسل بُلّغ لواشنطن بالهاتف من قِبَلِ آرثركومبتون الذي شهد الحدث وسجل: (الربان الايطالي هبط الآن في العالم الجديد). جاري شيهان، (ولادة العصر الذري) شيكاجو (الينويز)، 1942.

مبدأ باسكال

الشكل 31 – 6

إذا تجاوزت كمية اليورانيوم الكتلة الحرجة كما في (ب) فإنّ التغذية الذاتية للتفاعل المستلسل تكون ممكنة، أما إذا كانت الكتلة أقلّ من الكتلة الحرجة كما في (أ)، فإنّ غالبية النيوترونات نقلت قبل أن تظهر انشطارات إضافية، ولا تحصل تغذية ذاتية للتفاعل المتسلسل.



الكتلة الحرجة

المفاعلات النووية

هناك عدة مشاكل تواجهنا عند عمل مفاعل الانشطار النووي. أولها، أنّ احتمالية امتصاص نواة $^{235}_{92}U$ للنيوترونات البطيئة تكون كبيرة. ولكن النيوترونات التي تنتج من الانشطار ونحتاج إليها لاستمرارية التفاعل المتسلسل تتحرك بسرعة كبيرة. يجب استخدام مهدئ مادة تُسَمّى المهدئ لتخفيض سرعة النيوترونات. إنّ أكثر مهدئ فاعل يجب أنّ يتكون من ذرات كتلتها قريبة أكثر ما يمكن من كتلة النيوترونات (للتأكد من صحة هذا الكلام؛ ارجع إلى (الفصل 7) الذي يخبرنا بأنّ كرة البلياردو التي تصطدم مع كرة أخرى ساكنة مساوية لها بالكتلة يمكن أن تتوقف باصطدام واحد، ولكن عندما تصدم كرة البلياردو بجسم ثقيل، فإنها ترتد دون تغيير سرعتها تقريبًا). إنّ أفضل مهدئ هو الذي يحتوي ذرات $^{1}_{1}H$. ومن المؤكد أنّ $^{1}_{1}H$ يؤدي إلى امتصاص النيوترونات، ولكن نظير الهيدروجين المسمى الديتيريوم $^{2}_{1}H$ لا يمتص معظم النيوترونات، لذا فإنّه يُعَدّ مهدئًا مثاليًّا. كلّ من $^{1}_{1}H$ أو $^{2}_{1}H$ يستخدم على صورة ماء. وفي الحالة الأخيرة، فإنّه يكون ماءً ثقيلا، وفيه تحلّ ذرات الديتيريوم محلّ ذرات الهيدروجين. وهنالك مهدئ آخر شائع الاستخدام هو الجرافيت الذي يتكون من ذرات $^{12}_{6}C$.

أما المشكلة الثانية، فهي أنّ النيوترونات الناتجة في انشطار واحد تُمتَصُّ وتنتج تفاعلات نووية أخرى مع ذرات أخرى في المفاعل، بالإضافة إلى إنتاج انشطارات أخرى. في مفاعل الماء الخفيف، تمتص أنوية $^{1}_{1}H$ النيوترونات وكذلك أنوية $^{238}_{92}U$ لإنتاج $^{239}_{92}U$ في التفاعل $n + {}^{238}_{92}U \rightarrow {}^{239}_{92}U + \gamma$. يحتوي اليورانيوم الموجود في الطبيعة* على 99.3% من أنوية $^{238}_{92}U$، و 0.7% فقط من أنوية $^{235}_{92}U$ القابل للانشطار. ولزيادة احتمالية انشطار $^{235}_{92}U$؛ يجب إغناء اليورانيوم الطبيعي لزيادة نسبة $^{235}_{92}U$ باستخدام عملية تشبه الانتشار أو الطرد المركزي. إنّ عملية الإغناء هذه غير ضرورية عادةً في المفاعلات التي تستخدم الماء الثقيل كمهدئ؛ لأنّ الماء الثقيل لا يمتص النيوترونات.

في حين تتمثل المشكلة الثالثة في أنّ بعض النيوترونات تفلت خلال سطح المفاعل قبل أن تسبب انشطارات أخرى (شكل 31 – 6). لذا، يجب أن تكون كتلة الوقود كبيرة بما فيه الكفاية لتعمل تغذية ذاتية للتفاعل المتسلسل. تُسَمّى أقلُّ كتلة نحتاج إليها الكتلةَ الحرجةَ، وتعتمد قيمة هذه الكتلة على المهدئ؛ نوع الوقود (يمكن استخدام $^{239}_{94}Pu$ بدلا من $^{235}_{92}U$) وعلى عملية إغناء الوقود. وتكون القيمة النموذجية بحدود بعض الكيلوجرامات (ليست جرامات ولا آلاف الكيلوجرامات).

وحتى يكون لدينا تغذية ذاتية للتفاعل المتسلسل؛ فإنّه، في المتوسط، يجب أن يقوم نيوترون واحد على الأقل في كلّ انشطار بإنتاج انشطار آخر. ويُسَمّى متوسطُ عدد النيوترونات لكلّ انشطار الذي يقوم بعمل انشطارات أخرى معاملَ المضاعفة f.

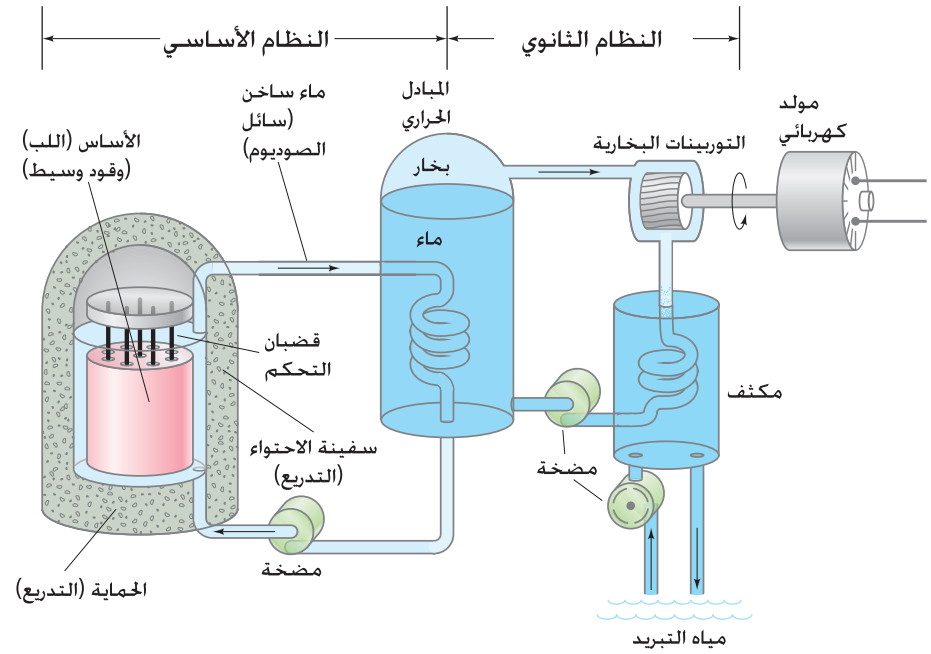
* يمكن أن ينشطر $^{238}_{92}U$ ولكن بوجود نيوترونات سريعة. حيث أن (يورانيوم $^{238}_{92}U$ أكثر استقرارًا من $^{235}_{92}U$. كما أن احتمال امتصاصه لنيترونات سريعة بحدوث الانشطار والمحافظة على تفاعل متسلسل بذاته هو احتمال ضعيف.

للتفاعلات المتسلسلة ذاتية التغذية: يجب أن تكون $f \geq 1$؛ إما إذا كانت $f < 1$؛ فإنّ التفاعل يُسَمّى تحت الحرج (*Supercriticol*) وإذا كانت $f > 1$ يُسَمّى التفاعل عندها فوق الحرج (*Supercriticol*) (ويمكن أن يصبح متفجرًا خطيرًا). تزوّد المفاعلات بقضبان تحكم متحركة (تمتص النيوترونات بشكل جيد مثل الكادميوم أو البورون) ويكون عملها امتصاص النيوترونات لإبقاء المفاعل* عند الحد الحرج $f = 1$ تمامًا.

التفاعل الحرج

تبنى المفاعلات النووية للاستخدام في الأبحاث أو لإنتاج الطاقة الكهربائية. يُنتج الانشطار عدة نيوترونات، وتعدّ المفاعلات البحثية أساسًا مصدر مكثف للنيوترونات. ويمكن استخدام هذه النيوترونات كقذائف في التفاعلات النووية لإنتاج نويّات غير موجودة في الطبيعة، بما فيها النظائر المستخدمة في التصوير والعلاج الإشعاعي. أما مفاعلات القدرة، فتستخدم لإنتاج الطاقة الكهربائية حيث تظهر الطاقة الناتجة من عملية الانشطار على شكل حرارة تستخدم في تسخين ماء لإنتاج بخار يدير توربينات موصولة بمولدات كهربائية (الشكل 31 – 7). يتكون قلب المفاعل النووي من الوقود والمهدئ (الماء في غالبية المفاعلات التجارية الأمريكية). ويكون الوقود غالبًا من اليورانيوم المخصّب بحيث يحتوي 2 إلى 4 في المئة من $^{235}_{92}U$. يسمح بمرور ماء ذي ضغط عالٍ أو سائل آخر (مثل الصوديوم السائل) خلال القلب. في حين تستخدم الطاقة الحرارية المتصة لإنتاج بخار في المبادل الحراري بحيث يعمل الوقود الانشطاري كمصدر حراري للمحرك الحراري (الفصل 15).

أنواع المفاعلات النووية



(الشكل 31 - 7) مفاعل نووي. الحرارة الناتجة من عملية الانشطار

في قضبان الوقود تحمل بواسطة الماء الحار أو الصوديوم السائل، ثم تستخدم لتسخين الماء وتحويله إلى بخار في المبادل الحراري، ويقوم البخار بتشغيل توربين لتوليد الكهرباء وبعد ذلك يبرد بواسطة مكثف.

هنالك مشكلات مرتبطة بمولدات الطاقة النووية، إضافة إلى المشاكل الحرارية المعتادة المرافقة لأيّ آلة حرارية (البند 15 – 12). وهناك مشاكل فعلية من البقايا المشعة الناتجة في المفاعل بالإضافة إلى النويات الناتجة من تفاعل النيوترونات مع الأجزاء المكونة للمفاعل. إنّ الشظايا الناتجة من الانشطار مثلها مثل النويات الأم من اليورانيوم أو البلاتينيوم من حيث امتلاكها نيوترونات بنسبة 50% أكبر من البروتونات. تكون الأنوية التي لها عدد كتلي في المدى النوذجي لشظايا الانشطار ($Z \approx 30 - 60$) مستقرة إشعاعيًّا عندما يكون عدد النيوترونات فيها مساويًا لعدد البروتونات تقريبًا (انظر الشكل 30 – 2)، أمّا نواتج الانشطار التي يكون فيها عدد النيوترونات كبيرًا، فتكون غير مستقرة، وتنحلّ إشعاعيًّا. ومن الجدير بالذكر أنّ شظايا الانشطار التي تنتقل بالصدفة إلى الجوّ تشكل تهديدًا خطيرًا لصحة الإنسان بسبب التسرب المحتمل للنُّفايات الإشعاعية عند التخلص منها (البند 31 – 4).

* يحدث انطلاق النيوترونات والانشطارات اللاحقة بسرعة كبيرة جدًّا بحيث لا يمكن معها استخدام قضبان التحكم للحفاظ على المقدار $f = 1$ إذا لم تكن بنسبة ضئيلة تساوي ($\approx 1\%$) من ما يُسَمّى النيوترونات المتأخرة. وهي ناتجة من اضمحلال النيوترون – انشطار الشظايا المخصبة؛ مما يجعل الأعمار الزمنية بحدود الثواني. وهي بذلك تكون كافية لتوفير زمن تفاعل كافٍ لتشغيل قضبان التحكم والمحافظة على المقدار $f = 1$.

نيوترونات أقل طاقة

الشكل 31 – 8
الدمار الناتج حول تشيرنوبل في روسيا بعد كارثة المفاعل النووي عام 1986.

تُعدّ الحوادثُ في جزيرة ثري مايل التابعة لبنسلفانيا (1979) و تشيرنويل في روسيا (1986) مثالاً على بعض هذه الأخطار، وبينت أنّ المولدات النووية يجب أن تكون مصممة ومحمية، وتعمل بعناية ودقة شديدتين (الشكل 31-8). أخيرًا، فإنّ عمر مولدات القدرة النووية محدودة بثلاثين سنة تقريبًا بسبب التراكمات الإشعاعية، وحقيقة أنّ مكونات البناء نفسها تضعف مع الظروف الشديدة في الداخل. تأخذ إعادة تأهيل مفاعلات القدرة عدة أشكال، ولكن كلفة أي طريقة لإعادة التأهيل عالية جدًّا.

استعملت المفاعلات المسماة بمفاعلات التغذية (*breeder reactors*) كحلّ لمشكلة محدودية مصادر اليورانيوم القابل للانشطار. إنّ مفاعل التغذية هو أحد المفاعلات الذي فيه النيوترونات الناتجة من انشطار $^{235}_{92}\mathrm{U}$ تمتص من $^{238}_{92}\mathrm{U}$ و $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ الناتجة من مجموعة التفاعلات الموضحة في (الشكل 31 – 1). إنّ $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ قابل للانشطار بواسطة النيوترونات البطيئة، ويمكن استخدامه وقودًا نوويًّا في المفاعلات النووية بعد فصله. وبالتالي، فإنّ مفاعلات التغذية تمدّنا بوقود جديد* $(^{239}_{94}\mathrm{Pu})$ بالإضافة إلى $^{238}_{92}\mathrm{U}$ غير المفيد. يحتوي اليورانيوم الطبيعي على 99.3 في المئة من $^{238}_{92}\mathrm{U}$، وهذا يعني أنّ الإمداد بالوقود الانشطاري يمكن أن يزيد على المعامل 100. إلا أنّ مفاعلات التغذية لها مشاكل المفاعلات الأخرى نفسها بالإضافة إلى مشاكل أخرى فعلية. لا يُعدّ البلوتونيوم خطرًا على الصحة بنفسه فقط (يشع بعمر نصف مقداره 24,000 سنة)، ولكن البلوتونيوم الناتج من المفاعل يمكن استخدامه في القنابل مما يزيد من خطر امتلاك الوقود النووي وسرقته من الإرهابيين لإنتاج القنابل.

إنّ الطاقة النووية ذات خطورة ممكنة، ولكن الطرق الأخرى المستخدمة بشكل واسع لإنتاج الطاقة كالنفط المعروف أو الفحم لها أيضًا أخطار بيئية ناقشنا بعضها في (البند 15 – 12) بما فيها تلوث الهواء والبقع النفطية. كما أنّ إطلاق غاز CO_2 يمكن أن يعمل كمصائد للحرارة كما في البيوت الزجاجية مما يزيد من حرارة الأرض. إنّ الحلول لحاجات العالم إلى الطاقة ليست تقنية فقط، ولكنّها اقتصادية وسياسية أيضًا. والعامل الأهم هنا هو حفظها، وعدم إضاعتها، واستخدامها في أضيق الحدود (تقليل، إعادة استخدام، إعادة تدوير).

المثال 31-5 كمية وقود اليورانيوم

احسب أقلّ كمية من $^{235}_{92}\mathrm{U}$ نحتاج إليها لعمل انشطار لتشغيل مفاعل قدرته 1000-MW لكلّ سنة بشكل متواصل. افرض أنّ الكفاءة (الفصل 15) حوالي 33%.

النّهج: على كفاءة 33%، سنحتاج إلى $3 \times 1000\,\mathrm{MW} = 3000 \times 10^6\,\mathrm{J/s}$ من الطاقة المدخلة. وكلّ انشطار ينتج 200 MeV (المعادلة 31 – 5)، ونقسم الطاقة السنوية على 200 MeV للحصول على عدد الانشطارات اللازمة في السنة الواحدة، ومن ثمَّ نضربها في كتلة ذرة اليورانيوم.

الحلّ: لإنتاج 1000 MW، سنحتاج إلى 3000 MW حيث يذهب 2000 MW كحرارة ضائعة، والطاقة الكلية الناتجة في سنة $(3 \times 10^7\,\mathrm{s})$ تساوي

$$(3 \times 10^9\,\mathrm{J/s})(3 \times 10^7\,\mathrm{s}) \approx 10^{17}\,\mathrm{J}$$

ينتج في كلّ انشطار 200 MeV، وعدد الانشطارات يساوي

$$\frac{(10^{17}\,\mathrm{J})}{(2 \times 10^8\,\mathrm{eV/fission})(1.6 \times 10^{-19}\,\mathrm{J/eV})} \approx 3 \times 10^{27}\ \text{fissions}$$

كتلة ذرة اليورانيوم المنفردة حوالي $(235\,\mathrm{u})(1.66 \times 10^{-27}\,\mathrm{kg/u}) \approx 4 \times 10^{-25}\,\mathrm{kg}$، والكمية الكلية التي نحتاج إليها من اليورانيوم هي

$$(4 \times 10^{-25}\,\mathrm{kg/fission})(3 \times 10^{27}\ \text{fissions}) \approx 1000\,\mathrm{kg}$$

أي حوالي الطن.

ملحوظة: حيث إنّ $^{235}_{92}\mathrm{U}$ يُشكّل 0.7% من اليورانيوم الطبيعي، فهذا يعني أننا نحتاج سنويًا إلى مئة طن يورانيوم تقريبًا، وهذه الكمية أقلّ مما نحتاج إليه من الفحم من حيث الكتلة والحجم (الفحم يعطي $2.8 \times 10^7\,\mathrm{J/kg}$).

* مفاعل التوليد لا تنتج وقوداً أكثر من استخدامها

التمرين جـ: تحتاج حاملة طائرات تعمل بالوقود النووي إلى 6000 kW من الطاقة المدخلة. كم عدد انشطارات $^{235}_{92}U$ لكلّ ثانية في هذه الطاقة؟

القنبلة الذّريّة

إنّ أول استخدام للانشطار النووي لم يكن لإنتاج الطاقة الكهربائية، بل لإنتاج قنبلة انشطارية (القنبلة الذرية). في بدايات الأربعينيات من القرن الماضي (بدايات 1940)، عندما كانت أوروبا مشتركة في الحرب العالمية، قام الزعيم الألماني أدولف هتلر بمنع بيع اليورانيوم من المناجم التشيكية التي احتلها حديثًا. لقد كانت الأبحاث التي أجريت على عملية الانشطار سريّة؛ بدأ الفيزيائيون في الولايات المتحدة بقرع جرس الإنذار، حيث قامت مجموعة من هؤلاء العلماء بتشجيع آينشتاين – الرجل الذي كان اسمه معروفًا في العالم كلّه – لإرسال رسالة إلى الرئيس الأمريكي فرانكلين روزفلت تتضمن إمكانية استخدام الانشطار النووي لصناعة قنبلة قوتها أكبر بكثير ممّا هو معروف سابقًا، وأخبروه فيها إنّ ألمانيا بدأت فعلًا بتطوير مثل هذه القنبلة . استجاب روزفلت بإقرار برنامج عرف بمشروع منهاتن لمعرفة إمكانية بناء مثل هذه القنبلة. بدأ العمل في إيرنست بعد أن شرح فيرمي عام 1942 أنّ التفاعل النووي المتسلسل يمكن حدوثه.

طوّر مختبر سرّيّ معزول في منطقة معزولة في نيومكسيكو عرف باسم لوس ألاموس، برئاسة ج. روبرت أوبنهيمر (1904 – 1967، الشكل 31 – 9)، وقد أصبح هذا المختبر موطنًا لكثير من مشاهير العلماء في أوروبا والولايات المتحدة لبناء القنبلة بحيث تكون تحت الحرجة (*Subcritical*) عند نقلها، ومن ثمَّ تكون فوق حرجة (*Supercritical*) (لإنتاج تفاعل متسلسل). في اللحظة المناسبة، تستخدم قطعتان من اليورانيوم لكلّ منهما كتلة أقلّ من الكتلة الحرجة، ولكنهما معًا أكبر من الكتلة الحرجة. وتظلّ الكتلتان منفصلتين حتى لحظة التفجير، حيث تدفعان بقوة باتجاه بعضهما بعضًا بما يشبه البندقية، فيظهر التفاعل المتسلسل الذي يؤدي إلى التفجير.

توضع قنبلة من مادة متفجرة (TNT) حول كرة البلوتونيوم لضغطها بعد التفجير حتى تتضاعف كثافتها ممّا يجعلها فوق حرجة، وهذا هو الذي يسبب الانفجار. لقد اختبرت أول قنبلة انشطارية في صحراء نيومكسيكو في تموز (يوليو) عام 1945، وكانت ناجحة. وفي أوائل آب من ذاك العام، ألقيت قنبلة انشطارية باستخدام اليورانيوم على هيروشيما، أما الثانية التي استخدمت البلوتونيوم فقد ألقيت على ناجازاكي (الشكل 31 – 10) وكلاهما في اليابان، مما أدى إلى استسلام اليابان في الحرب العالمية الثانية، وانتهاء هذه الحرب بعد ذلك بوقت قصير.

وبالإضافة إلى القدرة التدميرية الكبيرة، فإنّ القنبلة الانشطارية تنتج عدة شظايا مشعّة كما في المفاعل النووي، وهذه الشظايا تتسرب إلى الجو عند انفجار القنبلة بما يُسَمّى التوابعَ المشعة (*radioac-tive fallout*).

إنّ اختبار القنابل النووية في الغلاف الجوي بعد الحرب العالمية الثانية كان مدعاة للقلق؛ بسبب حركة الكتل الهوائية التي تنشر التوابع المشعة في أنحاء الكرة الأرضية جميعها. حيث تترسب هذه التوابع المشعة أخيرًا في الأرض خصوصًا عند سقوط الأمطار، فتمتص من النباتات والأعشاب وتدخل إلى السلسلة الغذائية. وتعدّ هذه مشاكل أخرى أكثر خطورة من أثر الأشعة المباشر في أجسامنا؛ لأنّ جُسيمات α و β تمتص بشكل كبير من الملابس والطبقات الخارجية من الجلد. ولكن داخل أجسامنا، ومن خلال الطعام، فإنّ النظائر المشعة تتّصل مباشرة مع الخلايا الحية. إنّ أحد النظائر المشعة الخطرة هو $^{90}_{38}Sr$ الذي يشبه كيميائيًّا الكالسيوم بدرجة كبيرة. وإذا تركّز في العظام، فإنه يسبب السرطانات التي تدمّر نخاع العظم. لقد وقّعت معاهدة 1963 من مئة دولة تحظر اختبارات الأسلحة النووية في الغلاف الجوي، وطُلِب الالتزام بها بسبب الأخطار الناجمة عن التوابع المشعة.

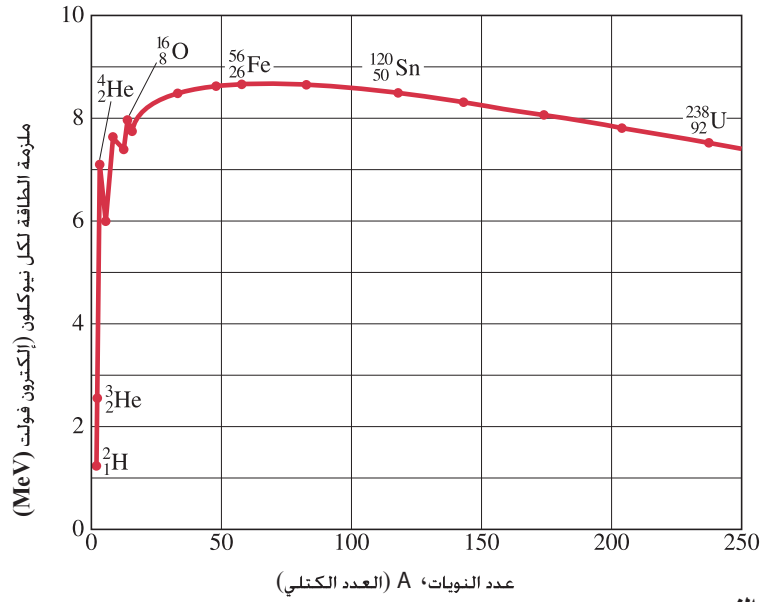
الشكل 31 – 9 ج.روبرت أوبنهيمر إلى اليسار مع الجنرال ليسلي جروفر الذي كان رئيسًا لمختبر لوس ألاموس خلال الحرب العالمية الثانية. التقطت الصورة في موقع ترينيتي في صحراء نيومكسيكو حيث فجرت أول قنبلة ذرية.

الشكل 31 – 10

صورة التقطت بعد شهر من إلقاء القنبلة الذرية على ناجازاكي. الأكواخ أنشئت بعد ذلك من الحطام المتبقي.

3-31 الاندماج النووي

إنّ كتلة أيّ نواة مستقرة أقلّ من كتل مكوناتها من البروتونات والنيوترونات. فعلى سبيل المثال، كتلة نظير الهيليوم $^{4}_{2}He$ أقلّ من كتلة نيوترونين مضافًا إليهما كتلة بروتونين، كما سنرى في (المثال 30 – 3). وعليه، إذا جمعنا بروتونين ونيوترونين لتشكيل نواة هيليوم، فسيكون لدينا نقص في الكتلة. وهذا النقص في الكتلة يظهر في إطلاق كمية كبيرة من الطاقة.



الشكل 31 – 11 متوسط طاقة الربط لكلّ نيوكليون كدالة في العدد الكتلي A للأنوية المستقرة. مثل (الشكل 30 – 1).

الاندماج النووي؛ النجوم

إنّ العمليةَ التي تُبنى بها الأنوية بتجميع نيوترونات وبروتونات منفصلة مع بعضها بعضًا، أو بناء أنوية كبيرة عن طريق تجميع مجموعة من الأنوية الصغيرة تُسمّى الاندماجَ النوويَّ. وتبين لنا نظرة سريعة إلى (الشكل 31 – 11) (مثل الشكل 30 – 1) سبب تجمّع الأنوية الصغيرة لتشكيل نواة أكبر مع إنتاج طاقة؛ ويتحقق هذا لأنّ طاقة الربط لكلّ نيوكليون أقلّ في حالة الأنوية الصغيرة منه في حالة الأنوية التي يزداد عددها الكتلي ($A \approx 60$ تقريبًا). ومن المتعارف عليه أنّ كثيرًا من العناصر في الطبيعة تتكوّن في الأصل من عملية الاندماج النووي (انظر الفصل 33) والاندماج مستمرٌّ حصوله اليوم داخل النجوم بما فيها شمسنا، مما ينتج كمية هائلة من الطاقة الإشعاعية التي تبثها.

المثال 31-6 الطاقة الناجمة عن الاندماج

يشمل أحد تفاعلات الاندماج النووي البسيطة تكوين الديتيريوم $^{2}_{1}H$ من بروتون ونيوترون

$$^{1}_{1}H + n \rightarrow {}^{2}_{1}H + \gamma$$

ما مقدار الطاقة الناتجة من هذا التفاعل؟

النّهج: تساوي الطاقةُ الناتجة الفرقَ في الكتلة بين المتفاعلات والنواتج مضروبًا في مربّع سرعة الضوء (c^2).

الحلّ: من الملحق B، تساوي الكتلة السكونية للمتفاعلات

$$1.007825\ u + 1.008665\ u = 2.016490\ u$$

أمّا بعد التفاعل، فإنّ كتلة الناتج وهو $^{2}_{1}H$ هي 2.014102 u. وفرق الكتلة يساوي

$$2.016490\ u - 2.014102\ u = 0.002388\ u$$

وبالتالي، فإنّ الطاقة الناتجة هي

$$(\Delta m)c^2 = (0.002388\ u)(931.5\ MeV/u) = 2.22\ MeV$$

وتتوزع هذه الطاقة بين نواة $^{2}_{1}H$ وأشعة γ.

تنجم الطاقة الصادرة عن الشمس من سلسلة من التفاعلات الاندماجية الآتية:

تفاعل اندماجي في الشمس (حلقة بروتون - بروتون)

$^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}H + e^{+} + \nu$	(0.42 MeV)	**(31 - 6 أ)**
$^{1}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma$	(5.49 MeV)	**(31 - 6 ب)**
$^{3}_{2}He + {}^{3}_{2}He \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{1}H + {}^{1}_{1}H$	(12.86 MeV)	**(31 - 6 جـ)**

الطاقة الناتجة (القيمة Q) لكلّ تفاعل مبيّنة بين الأقواس.

إنّ التأثيرَ الكليّ لهذه التفاعلات التي تُسَمّى حلقة بروتون – بروتون هو تجمعُ أربعة بروتونات لتشكيل نواة ^4_2He، وزوج من البوزيترونات، وزوج من النيوترينوات، وزوج من أشعة جاما

$$4\,{}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2\text{e}^+ + 2\nu + 2\gamma \qquad \textbf{(7-31)}$$

لاحظ أنّنا نحتاج إلى أول معادلتين من المعادلات السابقة (المعادلتان 31 - 6 أ، 31 - 6 ب) لإنتاج ^3_2He اللازم للتفاعل في المعادلة الثالثة. والطاقة الناجمة عن التفاعل الصافي في (المعادلة 31 – 7) هي

$(2 \times 0.42\ \text{MeV} + 2 \times 5.49\ \text{MeV} + 12.86\ \text{MeV}) = 24.7\ \text{MeV}$

من جهة أخرى، فإنّ كلّ بوزيترون e^+ في (المعادلة 31 - 6 أ) يتلاشى بسرعة مع إلكترون لإنتاج طاقة مقدارها $2m_e c^2 = 1.02\ \text{MeV}$، وتكون الطاقة الكلية الناتجة $(24.7\ \text{MeV} + 2 \times 1.02\ \text{MeV}) = 26.7\ \text{MeV}$. إنّ احتمالية التفاعل الأول وهو تكوين ديويتريوم من بروتونين (المعادلة 31 - 6 أ) قليلة جدًّا، وأنّ الحدوث القليل لهذا التفاعل يخدم تقليل معدل إنتاج الشمس للطاقة.

المثال 31-7 تقدير طاقة الاندماج

قدّر الطاقة الناتجة من التفاعل التالي في حالة حدوثه $^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$.

النّهج: نستخدم (الشكل 31 – 11).

الحلّ: نرى من خلال (الشكل 31-11) أنّ كلًّا من ^2_1H له طاقة ربط تساوي تقريبًا $1\frac{1}{4}\ \text{MeV}$ لكلّ نيوكليون ولنواتين كتلتيهما 2 تساوي $4 \times (1\frac{1}{4}) \approx 5\ \text{MeV}$. نواة ^4_2He لها طاقة ربط تساوي 7 MeV لكلّ نيوكليون وبالمحصلة، فإنّها تساوي $4 \times 7\ \text{MeV} = 28\ \text{MeV}$. وهنا، فإنّ الطاقة الناتجة تساوي $28\ \text{MeV} - 5\ \text{MeV} = 23\ \text{MeV}$.

تنتج الطاقة في النجوم الأكثر حرارة من الشمس- غالبًا - من الكربون أو من دورة (CNO) التي تشمل سلسلة التفاعلات التالية:

دورة الكربون
(بعض النجوم)

$$^{12}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{13}_7\text{N} + \gamma$$
$$^{13}_7\text{N} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + \text{e}^+ + \nu$$
$$^{13}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \gamma$$
$$^{14}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{15}_8\text{O} + \gamma$$
$$^{15}_8\text{O} \rightarrow {}^{15}_7\text{N} + e^+ + \nu$$
$$^{15}_7\text{N} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$$

من السهل أن ترى (انظر التمرين 35) بأنّه لا يوجد كربون مستهلك في هذه الدورة (انظر أول وآخر معادلتين)، وبأنّ التأثير الصافي يكون مثل حلقة البروتون - بروتون، (المعادلة 31 - 7)، (مضافًا إليها أشعة γ واحدة). لقد وُضعت نظرية حلقة البروتون – بروتون، وحلقة الكربون كمصدر للطاقة في النجوم والشمس أول مرّة من قِبَل هانزبيث (*Hans Bethe*) عام 1939.

المثال المفاهيمي 31-8 الاندماج في النجوم

ما أثقل عنصر يمكن إنتاجه عن طريق عملية الاندماج في النجوم؟

الإجابة: يكون الاندماج ممكنًا إذا كانت النواتج ذات طاقة ربط أكبر (كتلة أقلّ) من المتفاعلات، وبالتالي تنتج طاقة. وحيث إنّ منحنى طاقة الربط في (الشكل 31 – 11) (أو الشكل 30 – 1) تكون له قيمة قصوى في المدى $A \approx 56$ إلى 58 تقريبًا، وهذه تعود إلى الحديد أو النيكل، وبالتالي لن يكون مفضلا من حيث الطاقة إنتاج عناصر أثقل منها، وعلى الرغم من ذلك، فإنّه في مركز النجوم الثقيلة، وفي انفجار السوبر نوفا تكون هنالك طاقة حركيّة ابتدائية كافية لعمل تفاعلات ماصّةٍ للطاقة ينتج منها عناصر أثقل.

المفاعل الاندماجي المقترح

المفاعل الاندماجي

تُعدّ إمكانيةُ الانتفاع من الطاقة الناتجة من الاندماج لبناء مفاعلات قدرة مسألةً جذّابةً جدًّا. إنّ التفاعل الاندماجي يمكن نجاحه في المفاعل عند توافر نظائر الهيدروجين $^{2}_{1}H$ (الديتيريوم) و $^{3}_{1}H$ (التريتيوم) وتفاعلها كما يلي، مع وضع الطاقة الناتجة من كلّ تفاعل بين الأقواس:

التفاعلات الإندماجية للمفاعل المقترح

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{1}H + ^{1}_{1}H \quad (4.03\ MeV) \quad \textbf{(31 - 8 أ)}$$

$$^{2}_{1}H + ^{2}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He + n \quad (3.27\ MeV) \quad \textbf{(31 - 8 ب)}$$

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + n \quad (17.59\ MeV) \quad \textbf{(31 - 8 جـ)}$$

وبمقارنة هذه الطاقة الناتجة مع ما ينتج من انشطار $^{235}_{92}U$ نستطيع رؤية أنّ الطاقة الناتجة في المفاعلات الاندماجية أكبر باستخدام الكتلة نفسها من الوقود النووي في الانشطار. بالإضافة إلى ذلك، وكوقود يمكن أن تُستخدم المفاعلات الاندماجية الدينيريوم الذي يتوافر في ماء المحيطات (الوفرة الطبيعية للديتريوم $^{2}_{1}H$ هي 0.0115% بالمتوسط، أو حوالي 1g من الديتريوم لكلّ 80 L من الماء). ويمكن استخدام تفاعل البروتون - بروتون البسيط، في (المعادلة 31 - 6 أ) لزيادة توفير مصدر الوقود $^{1}_{1}H$، إلا أنّ احتمالية حدوثه قليلة. لذا، لا يمكن اعتبار إمكانيته على الأرض.

ومع أنّ الاستفادة من المفاعلات الاندماجية لم تتحقق حتى الآن، إلا أنّ هنالك مشاريع مقترحة قد نُفِّذَتْ لاحتواء الصعوبات اللازمة. إنّ المشاكل مرتبطةٌ بحقيقة أنّ النويّات جميعها لها شحنة موجبة تتنافر مع بعضها بعضا. ومن هنا، فإنّ الاندماج يتحقق إذا استطعنا تقريب هذه الأنوية بشكل كافٍ من بعضها. بحيث تقوم قوة التجاذب النووي قصيرة المدى بدورها. ولكي تقترب الأنوية بشكل كافٍ من بعضها؛ فعليها امتلاك طاقة حركية كبيرة لتتغلب على قوة التنافر الكهربائية. يمكن الحصول على الطاقة الحركية العالية بسهولة من مسارعات الجُسيمات (الفصل 32)، ولكن عدد الجُسيمات هنا يكون قليلا جدًّا. ولإنتاج كمية معقولة من الطاقة؛ يجب أن نتعامل مع المادة بمقادير كبيرة تكون فيها الطاقة الحركية الكبيرة تعني درجات حرارة عالية. وفي الواقع، فإنّ درجات الحرارة العالية جدًّا مطلوبة لحدوث التفاعل الاندماجي، وتصنف أجهزة الاندماج على أنها أجهزة حرارية نووية. إنّ الشمس والنجوم الأخرى ذات درجات حرارة عالية جدًّا، أي ملايين الدرجات. لذا، فإنّ تفاعل الاندماج يمكن حدوثه فيها. كما أنّ الشمس والنجوم تُعدّ مفاعلًا حراريًّا نوويًّا ذاتيّ الإمداد. وتبقى متماسكةً بسبب جاذبيتها الكتلية الهائلة، أمّا على الأرض، فقد ثبتت صعوبة احتواء الأنوية المتحركة بسرعة عالية، والتي تحتاج إلى درجات حرارة وكثافات عالية.

لقد أصبح من المعروف بعد الحرب العالمية الثانية أنّ الحرارة الناتجة من القنبلة الانشطارية (أو الذرية) قريبة من 10^{8} K. وهذا يدل على أنَّ هذه القنبلة يمكن استخدامها لإشعال القنبلة الاندماجية (تعرف عادة باسم القنبلة النووحرارية أو الهيدروجينية) لتوفير الطاقة العالية للاندماج. تعدّ الطاقةُ غير المسيطر عليها الناتجة من طاقة الاندماج في القنبلة الهيدروجينية (عام 1952) سهلةَ الانطلاق نسبيًّا، ولكن لجعل الطاقة الناتجة من الاندماج معقولة، ويمكن استخدامها؛ يجب أن يتمّ هذا الاندماج ببطء وبمعدل مسيطر عليه. وهذا هو التحدّي الحقيقي.

المثال 31-9 الحرارة اللازمة لاندماج الديتريوم والتريتيوم (d – t)

قدّر الحرارة اللازمة لاندماج الديتيريوم والتريتيوم.

النّهج: بفرض أنّ النواتين تقتربان من بعضها بعضًا بطاقة حركية KE، والقوة النووية تؤدّي دورها عندما تصبح المسافة بين مركزيهما مساوية لمجموع نصفي قطريهما. الطاقة الكامنة الكهربائية (البند 17 – 5) للجسيمين عند هذه المسافة يجب أن تساوي الطاقة الحركية الكلية للجسيمين عندما يكونان على مسافة من بعضهما بعضًا. ويرتبط متوسط الطاقة الحركية بدرجة الحرارة بالكلفن (K) حسب (المعادلة 13 – 8).

الحلّ: يُعطى نصف قطر كلّ نواة ($Z_1 = 2$ و $Z_2 = 3$) من (المعادلة 30 – 1): $r_d \approx 1.5\,\text{fm}$، و $r_t \approx 1.7\,\text{fm}$ لذا، يكون $r_d + r_t = 3.2 \times 10^{-15}\,\text{m}$. نساوي الطاقة الحركية للجسيمين الابتدائيين بالطاقة الكامنة عندما يكونان قريبين من بعضهما

$$2\text{KE} \approx \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{e^2}{(r_d + r_t)}$$

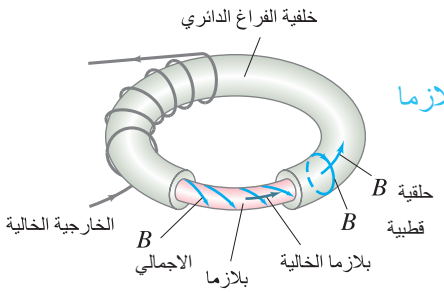
$$\approx \left(9.0 \times 10^9 \frac{\text{N}\cdot\text{m}^2}{\text{C}^2}\right)\frac{(1.6 \times 10^{-19}\,\text{C})^2}{(3.2 \times 10^{-15}\,\text{m})(1.6 \times 10^{-19}\,\text{J/eV})} \approx 0.45\,\text{MeV}$$

وعليه، فإنّ $\text{KE} \approx 0.22\,\text{MeV}$. وإذا سألنا: هل متوسط الطاقة الحركية هنا عالٍ؟ فإنه من (المعادلة 13 – 8)، نحصل على $\frac{3}{2}kT = \overline{\text{KE}}$

$$T = \frac{2\overline{\text{KE}}}{3k} = \frac{2(0.22\,\text{MeV})(1.6 \times 10^{-13}\,\text{J/MeV})}{3(1.38 \times 10^{-23}\,\text{J/K})} \approx 2 \times 10^9\,\text{K}$$

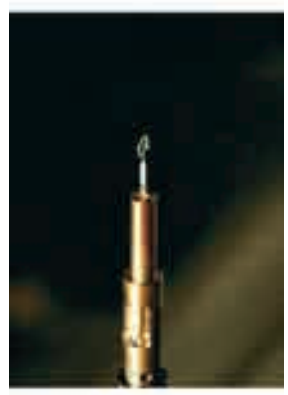
ملحوظة: إنّ الحسابات الأكثر دقة تبيّن أنّ درجة الحرارة اللازمة لحدوث الاندماج (في الواقع) أقلّ من هذا التقدير التقريبي؛ لأنّه ليس من الضروري أن يكون متوسط الطاقة الحركية $0.22\,\text{MeV}$. إنّ طاقة أقلّ من هذه يمكن أن تكون كافية (الجُسيمات في ذيل توزيع ماكسويل، الشكل 13 – 18). ويدلنا حساب معقول لمفاعل الاندماج الذي يمكن استخدامه على أنّ درجة الحرارة هي بالمدى $T \gtrsim 2 \times 10^8\,\text{K}$ إلى $4 \times 10^8\,\text{K}$.

إنّ المفاعل الاندماجي لا يحتاج إلى الحرارة العالية فقط ، بل يجب أن تكون هنالك أيضًا كثافة كبيرة للأنوية لتوفير معدل عال للتصادمات. إنّ الصعوبة الحقيقية للتحكم في الاندماج هي احتواء الأنوية لفترة طويلة كافية وبكثافة كافية لحدوث التفاعل لإنتاج الطاقة المراد استخدامها. وعند درجات الحرارة التي نحتاج إليها لحصول الاندماج تتأين الذرات. ويُسَمّى التجمع الناتج للأنوية والإلكترونات البلازما. تتبخّر المواد المألوفة عند بعض الآلاف من الدرجات في أفضل الحالات، وهنا لا نستطيع استخدامها لاحتواء تفاعل البلازما ذي درجات الحرارة العالية. وهناك طريقتان أساسيّتان لاحتواء مثل هذا التفاعل هما: الحجز المغناطيسي، والحجز القصوري. ففي الحجز المغناطيسي، نستخدم مجالا مغناطيسيًّا لمحاولة احتواء تفاعل البلازما عالي الحرارة. وإحدى الإمكانيات لذلك هي باستخدام تصميم يشبه حلقة المرساة، (الشكل 31 – 12)، ويُعرف عادةً باسم توكاماك(*tokamak*). أما الطريقة الثانية لاحتواء الوقود اللازم للاندماج فتُسَمّى الحجز القصوري، وفيها تطلق كُريّة صغيرة من الديتيريوم أو التريتيوم بشكل متواصل من عدة اتجاهات بواسطة حزمة كثيفة من أشعة الليزر (الشكل 31 – 13). يسخّن التدفقُ الكثيفُ للطاقةِ الكُريةَ ويؤيّنُها، ويحولها إلى بلازما، فيضغطها ويسخّنها إلى درجات حرارة يحدث عندها الاندماج. يقع زمن الحجز في مدى 10^{-11} إلى $10^{-9}\,\text{s}$. وخلال هذا الزمن، فإنّ الأيونات لا تتحرك بشكل يمكن تقديره بسبب قصورها الذاتي، وعندها يحدث الاندماج وتنفجر الكريّةُ.



الشكل 31 - 12 مخطط للتوكاماك يرينا المجال المغناطيسي الكليّ $\vec{\mathbf{B}}$ الناتج من تيار خارجي والتيار في البلازما نفسها.

(أ)



(ب)

الشكل 31 - 13
(أ) حجرة الأهداف (قطرها 5 m) في النوفا ليزر في مختبرات لورنس ليفرمور، وفيها تلتقي عشر حزمات من الليزر عند الهدف.
(ب) هدف الديتيريوم - التريتيوم الذي قطره 1-mm مثبت في مكانه في مركز حجرة التفاعل.

4-31 مرور الإشعاع في المواد، أضرار الإشعاع

يشمل الإشعاع كلًّا من إشعاعات γ، β، α، والأشعة السينية (X)، بالإضافة إلى البروتونات، والنيوترونات، والجُسيمات الأخرى مثل البيونات (انظر الفصل 32). ولأنّ الجُسيمات المشحونة تستطيع تأيين الذرات والجزيئات التي تمر خلالها، فإنّها تُسَمّى إشعاعات مؤينة. ولأنّ الإشعاع ينتج تأيينًا، فإنّه يسبب أضرارًا كبيرة للمواد وخصوصًا الأنسجة البيولوجية.

إنّ الجُسيمات المشحونة مثل α، و β، والبروتونات تسبب تأيينًا بسبب القوّة الكهربائية، أي أنّه عند مرورها من خلال المواد فإنّها تستطيع التجاذب أو التنافر بقوة مع الإلكترونات لإزالتها من ذرات هذه المواد. تنتج إشعاعات α، و β من المواد المشعة، وبطاقة في المدى من 1 MeV (10^4 إلى 10^7 eV). وحيث إنّ تأيين الذرات يحتاج إلى طاقة بحدود 10 eV، فإنّ جسيم α أو β واحد يستطيع عمل الآلاف من عمليات التأيين.

تستطيع الجُسيمات المتعادلة أيضًا تأيين الذرات عند مرورها في المواد، فعلى سبيل المثال، تعمل فوتونات أشعة كلّ من X أو γ على تأيين الذرات باقتلاع الإلكترونات عن طريق الظاهرة الكهروضوئية وظاهرة كومتيون (الفصل 27). أضف إلى ذلك أنّه لو امتلكت أشعة γ طاقة كافية (أكبر من 1.02 MeV) فإنها تستطيع عمل ظاهرة إنتاج الأزواج التي ينتج منها إلكترون وبوزيترون (البند 27 – 6). وتستطيع الجُسيمات المشحونة الناتجة في كلّ من هذه العمليات إنتاج عمليات تأين إضافية. ومن جهة أخرى، تتفاعل النيوترونات مع المواد بشكل رئيس عن طريق التصادمات مع الأنوية التي تتفاعل معها بقوة. وفي العادة، فإنّ النواة تنشطر إلى عدة أجزاء بمثل هذه التصادمات، وقد تسبب هذه الأجزاء أيضًا عمليات تأين إضافية.

إنّ الأشعة المارة خلال المواد قد تُسبّب أضرارًا كبيرة. كما أنّ المعادن وبقية المواد تصبح هشة، وتضعف صلابتها إذا كانت الأشعة ذات كثافة عالية كما في المفاعلات النووية، أو في مركبات الفضاء عندما تمر في المناطق التي تحتوي على أشعة كونية كثيفة.

تنجم الأضرار الإشعاعية الناتجة في الأنظمة البيولوجية أساسًا عن التأيين الناتج في الخلايا. وهناك عدّة عمليّات مرتبطة يمكن أن تحدث نتيجة لذلك. تتفاعل الأيونات أو الجذور الناتجة كيميائيًّا وبشدة، ممّا يؤثر في العمليات الأساسية التي تقوم بها الخلية. أضف إلى ذلك أنّ أشكال الإشعاع جميعها تستطيع تأيين الذرات عن طريق اقتلاع الإلكترونات بعد اصطدامها بها، وإذا كانت هذه الإلكترونات هي الإلكترونات المسببة للروابط الكيميائية، فإنّ الجزيء يتفكك، ويتغير تركيبه، ممّا يؤدّي إلى عدم قيامه بآليته الطبيعية، أو قيامه بآلية ضارة. وفي حالة البروتينات، فإنّ فقدان جزيء واحد ليس خطيرًا إذا كان هنالك نسخ أخرى منه في الخلية، ويمكن أن تصنع نسخ إضافية منه من الجينات المسؤولة عنه. ومن جهة أخرى، فإنّ جرعات أكبر من الإشعاع تستطيع تدمير جزيئات كثيرة لا تستطيع الخلية صناعة نسخ أخرى منها بالسرعة الكافية، ممّا يؤدّي إلى موت الخلية.

إنّ الأضرار الناتجة في الحمض النووي DNA هي الأكثر خطورة بسبب احتواء الخلايا على نسخة واحدة. لذا، فأيّ تغيير في DNA يؤثر في الجين، ويغيّر آلية عمل الجزيء الذي يحويه، وبالتالي تموت الخلية مرة أخرى.

إنّ موت الخلايا بشكل منفرد لا يُعدّ مشكلة؛ لأنّ الجسم يستطيع إنتاج خلايا جديدة بدلًا منها. (هناك استثناء: وهو أنّ الخلايا العصبية لا تستبدل، لذا فنقصها يسبب مشكلة حقيقية) ولكن إذا ماتت عدة خلايا، فإنّ التشكيل البيولوجي لا يمكن تغطيته. ومن جهة أخرى، قد تبقى الخلية حية ولكنها تبقى ناقصة. وبانقسام هذه الخلية، يمكن أن ينتج تشكيل من الخلايا الناقصة مما يؤدّي إلى حدوث السرطان وهو إنتاج سريع للخلايا غير مسيطر عليه.

تقسم أضرار الإشعاع على التشكيلات البيولوجية إلى عدة أصناف: فالأضرار الجسدية تعود لأيّ جزء من الجسم باستثناء التي يمكن إعادة إنتاجها. تؤثر الأضرار الجسدية في جزء بيولوجي معين، وتؤدي إلى حدوث السرطان، وعلى جرعات عالية تؤدي إلى الإجهاد الإشعاعي (وأعراضه هي: الغثيان، والتعب، وتساقط الشعر، وغيرها من الأعراض) وقد تؤدي إلى الموت. أما الأضرار الجينية فتعود إلى الأضرار الناتجة في الخلايا المتجددة، والتي تسبب الطفرات الجينية. إنّ أكبر أثر لها هو انتقال الصفات الوراثية إلى الأجيال القادمة. إنّ الأضرار المحتملة الناتجة من استخدام الأشعة السينية (X) وبقية الأشعة يجب مواءمتها مع المنافع الطبية، واستمرار الحياة كنتيجة للاستخدامات التشخيصية لها.

تطبيق الفيزياء
الأضرار البيولوجية

5-31 قياس الإشعاع – قياس الجرعات الإشعاعية

مع أنّ مرور الإشعاعات المؤينة يسبب أضرارًا كبيرة عند مرورها بجسم الإنسان، إلا أنّه يمكن استخدام الإشعاع لعلاج أمراض معينة ومنها السرطان باستخدام حزمة ضيقة جدًّا توجه للورم السرطاني لتدميره (البند 31 – 6). لذا، فإنه من المهم تحديد كمية الإشعاع أو الجرعة الإشعاعية، وهذا هو هدف قياس الجرعات الإشعاعية (*dosimetry*).

نشاطية المصدر

يمكن تحديد قوة المصدر الإشعاعي عند زمن معين بما يُسَمّى نشاطية المصدر (شدة النشاط الإشعاعي للمصدر) وهي عدد التحللات الناتجة في الثانية الواحدة. والوحدة التقليدية لها هي الكوري (Ci) وتعرف كما يلي:

الكوري (وحدة)

$$1\ \text{Ci} = 3.70 \times 10^{10}\ \text{تحلل في الثانية}$$

(هذه الصورة جاءت من التعريف الأصلي لنشاطية جرام واحد من الراديوم)، الكوري ما زالت مألوفة الاستخدام، ولكن وحدة النظام الدولي (SI) للوحدات لنشاط المصدر هي البيكوريل (Bq) وتعرف كما يلي:

البيكوريل (وحدة)

$$1\ \text{Bq} = 1\ \text{تحلل في الثانية}$$

إنّ المصادر التجارية للأنوية المشعة تحدد النشاطية عند زمن معين. وحيث إنّ هذه النشاطية تقلّ مع الزمن، ويكون هذا النقصان أكبر في النظائر قصيرة العمر، فإنّ من المهم أخذ ذلك بالحسبان.

تتناسب نشاطية المصدر $(\Delta N/\Delta t)$ مع عدد النويات المشعة عند لحظة معينة ومع عمر النصف $T_{\frac{1}{2}}$ كما يلي: (انظر البند 30 – 8):

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N = \frac{0.693}{T_{\frac{1}{2}}} N$$

المثال 31-10 النشاطية المأخوذة من الخلايا

في تجربةٍ معيّنة، وُجّهت $0.016\ \mu\text{Ci}$ من $^{32}_{15}\text{P}$ نحو وسط يحوي تجمّعًا من البكتيريا. بعد ساعة واحدة، وبعد فحص الخلايا، قاس عداد كفاءته 70% (يسجل 70% من أشعة β التي يمتصها) كمية الإشعاع في الخلايا كلها، فسجل 720 عدًّا في الدقيقة. ما نسبة الإشعاع الذي امتصته الخلايا من المصدر $^{32}_{15}\text{P}$؟

النّهج: عمر النصف للمصدر $^{32}_{15}\text{P}$ هو حوالي 14 يومًا (الملحق B)، وتستطيع إهمال الفقدان في نشاطية المصدر خلال ساعة واحدة. ومن النشاطية المعطاة، تستطيع إيجاد كمية أشعة β الصادرة، ومقارنة 70% منها مع تحلل $(720/\text{min})/(60\ \text{s/min}) = 12$ التي يسجلها العداد.

الحلّ: العدد الأصلي للتحللات في الثانية الواحدة هو

$$(0.016 \times 10^{-6})(3.7 \times 10^{10}) = 590$$

وبما أنّ كفاءة العداد 70%، فإنه يعدُّ 70% من هذا العدد، أي 410 في الثانية الواحدة. وبما أنّه عُدَّ $720 / 60 = 12$ في الثانية الواحدة، فإن $12/410 = 0.029$ أو 2.9% من الإشعاع تراكم في الخلايا.

الجرعة الممتصة

هناك نوع آخر من الأقيسة وهو التعرض الإشعاعي أو الجرعة الممتصة، ويمثل تأثير الإشعاع في المادة الممتصة. إنّ الوحدة القديمة للجرعة الإشعاعية هي الرونتجن (R) التي تعرف بدلالة كمية التأيين الناتجة من الإشعاع (1.6×10^{12}) أيون لكل جرام من الهواء الجاف في الظروف المعيارية). وأما الآن، فإنّ 1 R تعرّف بأنها كمية أشعة X أو γ والتي تودع $0.878 \times 10^{-2}\ \text{J}$ من الطاقة لكلّ كيلوجرام من الهواء. لذا، نستخدم الآن وحدة أخرى للجرعة الإشعاعية حيث نستطيع تطبيقها علىّ أي نوع من الإشعاع ألا وهي الراد (*rad*) بدلا من الرونتجن. والراد هي كمية الإشعاع التي تودع طاقة بمعدل $1.00 \times 10^{-2}\ \text{J/kg}$ في أيّ مادة ممتصة (وهذه قريبة من الرونتجن في حالة أشعتي X و γ). والوحدة المناسبة للجرعة الإشعاعية في نظام SI هي الجري (Gy) حيث

الراد (وحدة)

الجري (وحدة)

$$1\ \text{Gy} = 1\ \text{J/kg} = 100\ \text{rad} \qquad \textbf{(9-31)}$$

إنّ الجرعة الممتصة لا تعتمد فقط على شدة الحزمة الإشعاعية المتوافرة (عدد الجُسيمات في الثانية) وعلى الطاقة لكلّ جسيم، ولكنها تعتمد أيضًا على نوع المادة الممتصة للإشعاع. فالعظام مثلا، تمتص عادةً كمية من الإشعاع المستخدم أكبر من الكمية التي يمتصها اللحم. وعليه، فإنّ الجرعة الإشعاعية (بالراد أو الجري) للحزمة الإشعاعية نفسها عند مرورها في جسم الإنسان، تكون في العظام أكبر منها في اللحم.

إنّ الجري والراد وحدتان فيزيائيتان للجرعة الإشعاعية، وتمثلان الطاقة الممتصة من وحدة الكتلة للمادة. هاتان الوحدتان ليستا أكثر الوحدات التي لها معنى لقياس الأضرار البيولوجية الناجمة من الإشعاع؛ لأنّ الجرعات المتساوية للأنواع المختلفة من الإشعاع تسبب كميات مختلفة من الأضرار. فعلى سبيل المثال، يسبب راد واحد من أشعة α أضرارًا 10 – 20 مرة أكبر من الأضرار الناجمة من راد واحد من أشعة β أو أشعة γ. ويظهر هذا الفرق بشكل أكبر؛ لأنّ أشعة α (وبقية الجُسيمات الثقيلة مثل البروتونات والنيوترونات) تتحرك ببطء أكبر من أشعتي β و γ اللتين لهما الطاقة نفسها بسبب كتلتيهما الأكبر، فالتصادمات المؤينة تظهر متقاربة من بعضها بعضًا، وينتج منها ضرر وتلف كبيران. إنّ التأثير البيولوجي النسبي (RBE) أو معامل الجودة (QF) لنوع معين من الإشعاع يعرف بأنّه كمية الإشعاع بالراد لأشعة X، أو أشعة γ التي تنتج الأضرار البيولوجية نفسها للراد الواحد من إشعاع معين. والجدول 31 – 1 يعطينا معامل الجودة لأنواع متعددة من الإشعاع. وهذه الأرقام تقريبية؛ لأنّها تعتمد نوعًا ما على طاقة الجُسيمات، ونوع الدمار المستخدم كمعيار.

التأثير البيولوجي النسبي أو معامل الجودة

تُعطى الجرعة المؤثرة (الجرعة المؤثرة) بحاصل ضرب الجرعة الإشعاعية بالراد في معامل الجودة QF. وأمّا وحدتها فتعرف بـــ رِم (*rem*) وهي مختصرة من الجرعة المكافئة للإنسان:

الجرعة المؤثرة

$$(\text{in rem}) = \text{dose (in rad)} \times \text{QF} \qquad \textbf{(10-31 أ)}$$

الجرعة المؤثرة

وحدة السيفيرين

وأمّا وحدة الجرعة الممتصة في النظام SI، فقد حلّت بدلا منها وحدة السيفيرت (*Sievert*) التي يرمز إليها بالرمز (Sv) وتساوي

$$(\text{SV}) = \text{dose (Gy)} \times \text{QF} \qquad \textbf{(10-31 ب)}$$

الجرعة المؤثرة

وبهذه التعريفات، فإنّ 1 rem أو (1 Sv) لأيّ نوع من الجرعة الإشعاعية له تقريبًا المقدار نفسه من الضرر البيولوجي. فعلى سبيل المثال، 50 rem من النيوترونات السريعة لها ضرر 50 rem من أشعة γ نفسه. ولكن لاحظ أنّ 50 rem من النيوترونات السريعة تساوي 5 rads فقط، في حين أنّ 50 rem من أشعة γ تساوي 50 rads.

وحدة الريم

نحن نتعرّض بشكلٍ ثابتٍ للحدِّ الأدنى من إشعاعات المصادر الطبيعية مثل: الأشعة الكونية، والنشاطية الطبيعية في الصخور والتربة، والظهور الطبيعي للنظائر المشعة في طعامنا مثل $^{40}_{19}\text{K}$. يقع الرادون $^{222}_{86}\text{Rn}$ تحت التركيز المسيطر عليه في هذه الأيام، وهو ناتج من انحلال اليورانيوم، كما أنّه متوسط في سلسلة انحلال اليورانيوم (انظر الشكل 30 – 11). تبقى معظم المتوسطات في الصخور التي تشكلت منها، ولكن الرادون عبارة عن غاز يتسرب من الصخور (ومن مواد البناء مثل الباطون) إلى الهواء الجوي الذي نتنفسه. وعلى الرّغم من أنّ الرادون غاز خامل كيميائيًّا (لأنّه عنصر نبيل) إلا أنّه ليس خاملًا فيزيائيًّا؛ لأنّه ينحلّ بإطلاق أشعة ألفا، كما أنّ نواتج هذا الانحلال مشعة أيضًا، إضافة إلى كونها غير نبيلة، ويمكنها الالتصاق بغلاف الرئة الداخلي.

جدول 31-1
معامل الجودة (QF) لأنواع مختلفة من الأشعة

نوع	معامل الجوده QF
أشعة X و أشعة γ	1
β (الكترونات)	≈ 1
بروتونات سريعة	1
نيوترونات بطيئة	≈ 3
نيوترونات سريعة	حتى 10
دقائق α وأيونات ثقيلة	حتى 20

الرادون

إنّ متوسط الخلفية الطبيعية للنشاط الإشعاعي يساوي (300 mrem) 0.30 rem تقريبًا بالسنة الواحدة لكلّ شخص في الولايات المتحدة. وبالطبع هنالك عدة متغيرات تسبب ذلك. فمن الأشعة السينية الطبيّة، فإنّ الشخص المتوسط يستقبل حوالي50–60 mrem/year، وتعطينا هذه متوسط جرعة كلية مقدارها 360 mrem (3.6 mSv) لكلّ شخص. يقترح المنظمون الحكوميون حدًّا أعلى للجرعة الإشعاعية للشخص في المجتمع بحوالي (1 mSv) 100 mrem في السنة الواحدة باستثناء المصادر الطبيعية، وليس من المعروف فيما إذا كانت الجرعات الإشعاعية القليلة تزيد من فرصة حدوث السرطان والعيوب الجينية أم لا. لذا، علينا التصرف بحذر بحيث نبقي التعرض للجرعات الإشعاعية أقلّ ما يمكن.

أمّا حدّ الجرعة الإشعاعية الأعلى للأشخاص الذين يعملون في مناطق الإشعاع كالمستشفيات، ومحطّات توليد الطاقة، ومختبرات البحث فهو (50 mSv) 5 rem لكلّ الجسم في أيّ سنة من السنوات، وبحيث تكون أقلّ من 2 rem/yr بالمتوسط خلال خمس سنوات. وللكشف عن التعرض الإشعاعي؛ فإنّ الأشخاص الذين يعملون في مناطق الإشعاع يحملون بالعادة نوعًا من أنواع مقياس الإشعاع. ومن هذه الأنواع المألوفة (البطاقة) أو الباجة التي تحوي فيلمًا إشعاعيًّا. إنّ مرور الإشعاع المؤيّن خلال الفيلم يغيّره بحيث يصبح الفيلم مظلمًا خلال عملية التحميض، وهذا يبيّن الجرعة المستقبلة. وهناك أنواع أخرى جديدة تُسَمّى المقاييس الحرارية الضوئية (TLD). إنّ أجهزة قياس الإشعاع والباجات لا تحمي العاملين في مجال الإشعاع، ولكن المستويات العليا المسجلة تتطلّب إعادة تطوير خطوات عملية للحدِّ من التعرض الإشعاعي لمستويات مقبولة.

شارات الافلام ومقاييس الجرعات

إنّ الجرعات العالية للإشعاع يمكن أن تسبب أعراضًا غير مرغوبة كالغثيان، والتعب، وتساقط الشعر. وتُعزى هذه التأثيرات إلى ما يُسَمّى بالمرض الإشعاعي. كما أنّ الجرعات العالية قد تكون ميتة. على الرغم من أن، فإنّ مدة التعرض للإشعاع مهمّة أيضًا. فالتعرض إلى جرعة مقدارها 1000 rem (10Sv) تكون قاتلة تقريبًا.

مرض الإشعاع

كما أنّ التعرّض لجرعة مقدارها (4-Sv) لمدة قصيرة قد تكون ميتة بنسبة 50% من الحالات. ومن جهة أخرى، فإنّ الجسم يعمل عمليّات إصلاح ملحوظة عند تعرضه للإشعاع. فمثلاً، إذا تعرّض الجسم لجرعة مقدارها 400-rem في زمن يمتدّ لعدة أسابيع، فإنّها لا تكون عادة ميتة، ولكنها قد تسبّب أضرارًا كبيرة للجسم. في حين أنّ تأثير الجرعات المنخفضة لمدة زمنية طويلة من الصعب تحديده، وما زال غير معروف حتى الآن.

المثال المفاهيمي 31-11 تقليل الجرعة الإشعاعية

انتبهت عاملة في مكان يحوي مصدرًا إشعاعيًّا إلى أنّ الجرعة الإشعاعية تتراكم بسرعة. فإذا أرادت أن تقلل تعرضها للإشعاع إلى العُشْر لتبقى في عملها بأمان حتى نهاية العام. فعليها أن تعمل على مسافة أبعد عن المصدر. فكم هذه المسافة المطلوبة؟

الأجوبة: إذا كانت الطاقة الإشعاعية تنتقل بشكل منتظم في الاتجاهات جميعها، فإنّ كثافة الإشعاع (الجرعة/ المسافة) يجب أن تقلّ مع مربع المسافة مثل الموجات الصوتية والضوئية. وعليه، إذا عملت على مسافة أكبر بأربع مرات بعيدًا عن المصدر، فإنّ التعرّض يقلّ بنسبة 1 إلى 16 وهي مسافة كافية لتبقى بأمان.

المثال 31-12 الجرعة الإشعاعية لكلّ الجسم

ما الجرعة الإشعاعية التي يمتصها كامل الجسم لعامل مختبر كتلته 70-kg عند تعرضه لـ 40-mCi من المصدر المشع $^{60}_{27}\mathrm{Co}$ على افتراض أنّ مساحة مقطع الجسم $1.5\ \mathrm{m}^2$، ويقع عادةً على بعد 4.0 m تقريبًا من المصدر، ويتعرض للإشعاع بمعدل 4.0 h في اليوم. $^{60}_{27}\mathrm{Co}$ يبعث أشعة γ طاقتها 1.33 MeV و 1.17 MeV بتتابع سريع. تتفاعل 50% تقريبًا من أشعة γ مع الجسم، وترسب طاقتها كلّها، في حين تخترق البقية الجسم.

النّهج: نسبة الطاقة الإشعاعية من الطاقة المنبعثة كلّها التي تمرّ خلال جسم العامل تساوي مساحته مقسومة على مساحة سطح كرة نصف قطرها 4.0 m (الشكل 31 – 14).

الحلّ: الطاقة الكلية لأشعة γ لكلّ انحلال تساوي 2.50 MeV=(1.33+1.17) MeV، والطاقة الكلية التي تبث من المصدر في الثانية الواحدة

$$(0.040\ \mathrm{Ci})(3.7 \times 10^{10}\ \mathrm{decays/Ci \cdot s})(2.50\ \mathrm{MeV}) = 3.7 \times 10^{9}\ \mathrm{MeV/s}$$

إنّ النسبة من هذه الطاقة التي تمرّ خلال الجسم تساوي مساحة مقطع الجسم ($1.5\ \mathrm{m}^2$) مقسومة على مساحة سطح كرة نصف قطرها 4.0 m (الشكل 31 – 14) وتساوي

$$\frac{1.5\ \mathrm{m}^2}{4\pi r^2} = \frac{1.5\ \mathrm{m}^2}{4\pi(4.0\ \mathrm{m})^2} = 7.5 \times 10^{-3}$$

ومعدل الطاقة التي تترسب في الجسم (تذكر أنّ 50% فقط من أشعة γ تتفاعل مع الجسم) هو

$$E = \left(\tfrac{1}{2}\right)(7.5 \times 10^{-3})(3.7 \times 10^{9}\ \mathrm{MeV/s})(1.6 \times 10^{-13}\ \mathrm{J/MeV})$$
$$= 2.2 \times 10^{-6}\ \mathrm{J/s}$$

ولأنّ $1\ \mathrm{Gy} = 1\ \mathrm{J/kg}$، فإنّ معدّل الجرعة الإشعاعية للجسم الذي كتلته 70-kg كلّه هو

$$(2.2 \times 10^{-6}\ \mathrm{J/s})/(70\ \mathrm{kg}) = 3.1 \times 10^{-8}\ \mathrm{Gy/s}$$

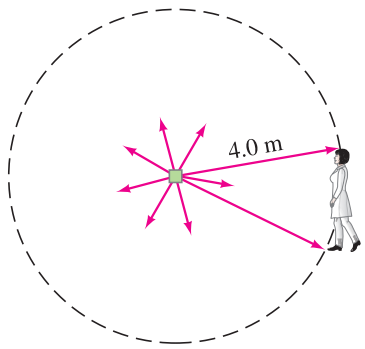
وبفترة 4.0 h، فإنّ مقدار الجرعة الإشعاعية يساوي

$$(4.0\ \mathrm{h})(3600\ \mathrm{s/h})(3.1 \times 10^{-8}\ \mathrm{Gy/s}) = 4.5 \times 10^{-4}\ \mathrm{Gy}$$

ولأنّ $\mathrm{QF} \approx 1$ لأشعة جاما، فإنّ الجرعة المؤثرة (المعادلة 31 -10ب) تساوي 450 μSv أو (انظر المعادلة 31 - 9):

$$(100\ \mathrm{rad/Gy})(4.5 \times 10^{-4}\ \mathrm{Gy})(1) = 45\ \mathrm{mrem} = 0.45\ \mathrm{mSv}$$

ملحوظة: هذه الجرعة المؤثرة التي تساوي 45-mrem هي حوالي 50% من الجرعة المسموحة في السنة الكاملة (100 mrem/yr) أو 1% من أقصى جرعة سنوية مسموحة للعاملين في الإشعاع. يجب ألّا يتعرض هذا العامل لمثل هذه الجرعة يوميًّا. لذا، فعليه الابتعاد لتقليل هذه الجرعة (وضع حواجز على المصدر، أو تغيير العمل، أو العمل على مسافة أبعد ...إلخ).



الشكل 31 – 14 انتشار الإشعاع للاتجاهات جميعها. الشخص الذي يقع على بعد 4.0 m يستقبل نسبة من الإشعاع مقدارها مساحة مقطعه مقسومة على مساحة سطح كرة نصف قطرها 4.0 m.
(مثال 31 - 12)

* 6-31 المعالجة الإشعاعية

قد يكون الإشعاع مفيدا جدًا (ليس خطيرًا فقط)

تطبيق الفيزياء
المعالجة الإشعاعية

إنّ تطبيقات النشاط الإشعاعي بالنسبة للإنسان وبقية الكائنات الحية تشكل مجالًا واسعًا يملأ الكثير من الكتب؛ ففي المجال الطبي هنالك وجهان: 1 - المعالجة الإشعاعية، وهي معالجة الأمراض (خاصة السرطان) وهو ما سنعالجه في هذا البند. 2 - تشخيص الأمراض، والذي سنناقشه في البنود القادمة من هذا الفصل.

قد يسبّب الإشعاعُ السرطانَ، ولكن يمكن استخدامه في معالجته أيضًا. فالنمو السريع للخلايا السرطانية قابل (بشكل خاص) للتدمير بواسطة الإشعاع. لا نحتاج إلى جرعات عالية لقتل الخلايا السرطانية، وبعض الخلايا السليمة المحيطة سوف تقتل حتمًا. ولهذا، فإنّ الحالة المرضية التي تتعرّض للعلاج الإشعاعي سوف تعاني من بعض الأعراض الجانبية من الإجهاد الإشعاعي. ولتقليل تدمير الخلايا السليمة؛ نستخدم حزمة ضيقة من أشعتي γ أو X عندما يكون الورم السرطاني محصورًا بشكلٍ جيّد. تُوجّه الحزمةُ مباشرةً باتجاه الورم، ويدور المصدر (أو الجسم) بحيث تخترق الحزمة الإشعاعية أجزاء مختلفة من الجسم لجعل الجرعة الإشعاعية للمكان الواحد أقلّ ما يمكن باستثناء الورم والأماكن المحيطة به مباشرة، حيث تمر بها الحزمة في الأوقات جميعها (الشكل 31– 15). قد يكون مصدر الإشعاع من $^{60}_{27}\mathrm{Co}$، أو من آلة تصدر الأشعة السينية (X) والتي تصدر فوتونات في المدى من 200 keV إلى 5 MeV. إنّ البروتونات، والنيوترونات، والإلكترونات، والبيونات التي تنتج في مسارعات الجُسيمات (البند 32 - 1) قد تستخدم أيضًا في المعالجة الإشعاعية.

وفي بعض الحالات، تدخل عينة صغيرة من ب ب مشعة مباشرة داخل الورم السرطاني، والتي بدورها ستدمر معظم الخلايا السرطانية. وبطريقة مشابهة تتم معالجة سرطان الغدة الدرقية عن طريق ادخال اليود المشع $^{131}_{53}\mathrm{I}$. حيث تقوم الغدة الدرقية بتركيز اليود الموجود في مجرى الدم وخاصة في أي منطقة تكون فيها أورام سرطانية. وتقوم أشعاته بتدمير الخلايا المعتلة.

وعلى الرّغم من أنّ الإشعاع يمكن أن يزيد من مدة حياة عدة حالات، إلّا أنّه لا يكون فاعلًا بشكلٍ كامل. كما أنّه لا يتمكن أحيانًا من القضاء على الخلايا السرطانية كلّها. لذا، فهنالك احتمالية لعودة المرض. وفي كثير من الحالات خصوصًا عندما تكون الخلايا السرطانية غير متمركزة في مساحة واحدة، فإنّ من الصعب معالجته دون تدمير الأعضاء السليمة.

وهناك فائدة أخرى للإشعاع تتمثل في تعقيم اللفائف الطبية، وأدوات الجراحة، وحتى في تغليف الطعام حيث تقتل البكتيريا والفيروسات، أو تقلّ فاعليتها بسبب الجرعات العالية من الإشعاع.

(الشكل 31 – 15)
يدور مصدر الأشعة بحيث تمر الحزمة الإشعاعية خلال الخلايا المريضة ولكن مع تقليل الجرعة لبقية الجسم.

* 7-31 اقتفاء الأثر الإشعاعي والتصوير في الأبحاث والطب

تطبيق الفيزياء
اقتفاء الأثر (التخطيط) في الطب والبيولوجيا

نستخدم النظائر المشعة في الأبحاث الطبية والبيولوجية لاقتفاء الأثر الإشعاعي. وهناك مركبات معينة يمكن تركيبها باستخدام نظير مشع مثل $^{14}_{6}\mathrm{C}$ أو $^{3}_{1}\mathrm{H}$. مثل هذه الجزيئات، يمكن اقتفاء أثرها عندما تتحرك في النسيج الحيّ، أو عندما تعمل تفاعلات كيميائية.

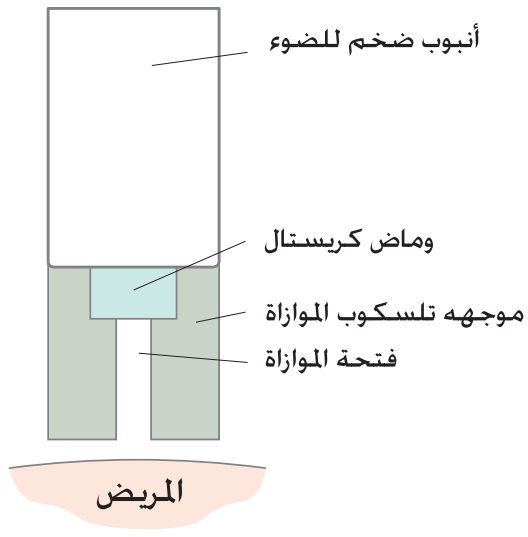
ويمكن الكشف عن ظهور هذه الجزيئات (أوجزء منها إذا عملت تفاعلات كيميائية) باستخدام عداد جايجر أو عداد الومضات الذي يكشف الإشعاعات الصادرة (انظر البند 30 - 13). كيف تهضم جزيئات الطعام؟ ولأيّ أجزاء الجسم يتم تحولها ويمكن اقتفاء أثرها؟ تستخدم متتبعات الأثر الإشعاعية لتحديد كيفية تركيب الحموض الأمينية، والمركبات الأساسية الأخرى في الكائنات الحية.

يمكن تحديد نفاذية جدار الخلية للجزيئات والأيونات المختلفة باستخدام النظائر المشعة. تقذف الجزيئات والأيونات باتجاه السائل خارج الخلايا، وتقاس النشاطيةُ الإشعاعية التي تظهر داخل الخلايا وخارجها كدالة مع الزمن.

وبتقنية تُسَمّى التصوير بالإشعاع الذاتي (*autorodiography*) تكشف أماكن النظائر المشعة على شريط فلمي، فعلى سبيل المثال، فإنّ توزيع الكاربوهيدرات التي تنتج في أوراق النبات من امتصاص CO_2 يمكن ملاحظتها بترك النبتة في محيط بيئي تكون فيه ذرات الكربون في CO_2 هي النظير المشع $^{14}_{6}\mathrm{C}$.

وبعد زمن معين، توضع الورقة بثبات على لوح (تصويري) فوتوغرافي، والإشعاع الناتج يجعل الفيلم معتمًا بشكل أكبر في الأماكن التي تكون فيه النظائر مركزة بشكل أقوى (الشكل 31 – 16أ). يُستخدم التصوير بالإشعاع الذاتي لتحديد النيوكليوتايدات (مركبات DNA) التي تعكس الكثير من التفاصيل عن تطابق DNA (الشكل 31 – 16ب). وللتشخيص الطبي، فإنّ النويات المشعة المستخدمة هذه الأيام هي $^{99m}_{43}Tc$، الحالة المهيجة طويلة العمر من التيكنيتيوم 99 (الرمز m يعود إلى الحالة شبه المستقرة) ويتكون عند انحلال $^{99}_{42}Mo$، الاستخدام الكبير للنظير $^{99m}_{43}Tc$ بسبب نصف العمر الملائم له والذي يساوي 6 h (قصير، ولكنه ليس قصيرًا جدًّا) بالإضافة إلى حقيقة أنه يستطيع الارتباط مع عدد متنوّع من المركبات. يُختار المركب المرتبط بالنواة المشعة؛ لأنه يتركز في الأجهزة أو مناطق التشريح المراد دراستها. توضع كواشف خارج الجسم لتسجيل التوزيع الإشعاعي للمركبات المحددة أو تصويره. ويمكن إجراء الكشف باستخدام كاشف منفرد (الشكل 31 - 17) بحيث يتحرك حول الجسم، ويقيس كثافة النشاط الإشعاعي عند عدد كبير من النقاط. إنّ النشاط الإشعاعي النسبي هو أداة تشخيصية. فعلى سبيل المثال، فإنّ النشاطية الإشعاعية العالية أو المنخفضة قد تمثل فوق نشاطية أو تحت نشاطية للجهاز الحيوي أو جزء منه، وقد تمثل في حالة أخرى آفة أو ورمًا خبيثًا.

وهنالك آلات تصوير أكثر تعقيدًا تعمل باستخدام أشعة جاما، وتستخدم أكثر من كاشف، كما أنّها تسجل بالتناوب النشاطية الإشعاعية عند عدة نقاط. ويمكن أن تعرض الكثافات المقيسة على شاشة تلفزيون أو حاسوب تعمل على إنجاز دراسات متحركة (تغير فيها الصورة مع الزمن).



الشكل 31 – 17 الكاشف الذي يستخدم أشعة جاما المسددة لعمل تصوير متحرك للحالة. من الضروري أن يختار المسدّد أشعة جاما التي تأتي بخط مستقيم من الحالة. ودون هذا المسدّد، فإنّ أشعة γ ستأتي من الجسم، فتصطدم بالوامض منتجة صورة غير واضحة.

8-31 التصوير الإشعاعي الطبقي الانبعاثي *

إنّ الصورة المتكونة باستخدام الطرق القياسية للطب النووي المشروحة باختصار في الجزء السابق تنتج من متتبع أثر من مصدر إشعاعي في حجم معيّن من الجسم. ومن الممكن أيضًا تصوير الانبعاث الإشعاعي من مقطع أو شريحة من الجسم باستخدام التصوير الإشعاعي الطبقي المبرمج، والذي نوقش في (البند 25 - 12). وهناك آلة تصوير أساسية تعمل بأشعة جاما تتحرك حول الحالة لقياس الشدة الإشعاعية لمتتبع الأثر عند عدة نقاط وعدة زوايا، وتعالج المعلومات بالطريقة المتبعة نفسها في التصوير بالأشعة السينية (X-ray CT scans) المشروحة في (البند 25 - 12). تُسمّى هذه التقنيةُ التصويرَ الإشعاعيَّ الطبقيَّ باستخدام انبعاث الفوتون المنفرد (SPET).*

* المعروف أيضاً باسم SPECT "فوتون واحد التصوير المقطعي الانبعاثات".

(الشكل 31 - 16) (أ) صورة بتقنية التصوير بالإشعاع الذاتي لورقة نبات القرع التي تعرضت لـ $^{14}CO_2$ المشع مدة 30 s. مناطق التمثيل الضوئي (الخضراء) أصبحت مشعة، أمّا المناطق التي لا يكون فيها تمثيل ضوئي من العروق فإنّها تخلو من ^{14}C، ولا تجعل ورقة الأشعة السينية سوداء. هذه التقنية مهمة في النمط التالي من نقل التغذية في النبات

(ب) صورة لكروموسوم من DNA لنبات معيّن. النقاط المرتبة على الفيلم ترينا النمو على شكل حرف Y للنقاط في الـ DNA المنقسم.

(أ)

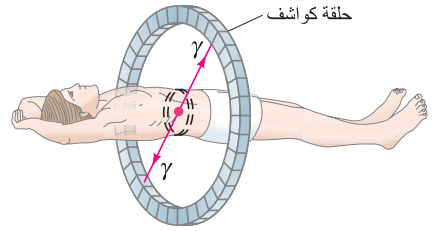
(ب)

تطبيق الفيزياء

التصوير الطبيّ

SPET

PET



الشكل 31 – 18

التصوير الإشعاعي الطبقي باستخدام انبعاث البوزيترون (PET) تستخدم حلقة من الكواشف بأنبوب مضاعف ضوئي (البند 30 - 13) لكشف أشعتي جاما الناتجتين من التفاعل γ ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$) اللتين تنبعثان بزاوية 180° مع بعضهما بعضا.

كما أنّ هنالك تقنيةً أخرى مهمّةً تُسَمّى التصويرَ الإشعاعيَّ الطبقيَّ باستخدام انبعاث البوزيترون (PET)، والتي تستخدم باعثات البوزيترون مثل $^{11}_{6}C$، و $^{13}_{7}N$، و $^{15}_{8}O$، و $^{18}_{9}F$ التي لها عمر نصف قصير. تندمج هذه النظائر مع الجزيئات عند حقنها أو استنشاقها، وتتراكم في الجهاز الحيوي أو عضو الجسم المراد دراسته. عندما تبعث هذه النويات أشعة β، فإنّ البوزيترون المنبعث يسير عدة مليمترات قبل اصطدامه بإلكترون عادي. وفي هذا التصادم، فإنّ البوزيترون والإلكترون يتلاشيان بحيث يعطيان فوتوني جاما ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$)، وكلّ منهما له طاقة تساوي $(= m_e c^2)$ 511 keV. ينطلق فوتونا جاما باتجاهين متعاكسين $(180° \pm 0.25°)$ بحيث يكون لهما المقدار نفسه من الزخم الخطي تمامًا لتحقيق قانون حفظ الزخم الخطي (الزخم الخطي لكلّ من e^+ و e^- الابتدائيين يساوي صفرًا مقارنة بالزخم الزاوي لفوتوني جاما النهائيين). ولأنّ الفوتونين يتحركان على الخط نفسه باتجاهين متعاكسين، فإنّ كشفهما يتمّ باستخدام حلقة متمركزة من الكواشف تحيط بالحالة (الشكل 31 - 18) بحيث تثبت بسهولة على الخط الذي يحدث عليه الانبعاث. وإذا حُدِّدَ الفرقُ في زمن وصول الشعاعين بدقة، فإنّ الموقع الحقيقي للنوية الباعثة على ذلك الخط يمكن حسابه. تستطيع الإلكترونيات –حاليا- قياس الزمن بدقة تصل إلى $\pm$ 300 ps. كما أنّ الموقع الحقيقي يمكن تحديده على افتراض أنّ سرعة أشعة جاما $(c = 3 \times 10^8 \text{ m/s})$بدقة تصل إلى $d = vt \approx (3 \times 10^8 \text{ m/s})(300 \times 10^{-12} \text{ s}) \approx 10 \text{ cm}$ وهي ليست مفيدة جدًّا. وبالإضافة إلى ذلك، هنالك جهود مستقبلية لقياس زمن الطيران لتحديد الموقع. في هذه الأيام، يستخدم التصوير الإشعاعي الطبقي المبرمج وعلى نحو مشابه للتصوير بأشعة X (CT)، والذي يمكن من خلاله إعادة تكوين صورة PET بتفريق (*resolution*) يقع في حدود 3–5 mm. تتمثل الإيجابيات الكبيرة لاستخدام PET في عدم الحاجة إلى مسدّد (كما هو الحال في كشف الفوتون المنفرد – انظر الشكل 31 - 17) كما أنّ الفوتونات التي تبدّد قليلة. وبالتالي، فإنّ الجرعات التي يمكن إعطاؤها للحالة باستخدام PET قليلة.

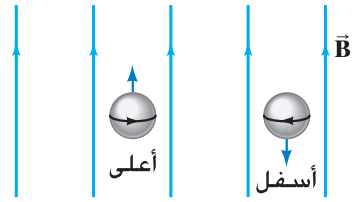
إنّ النظامين PET و SPET يعطياننا صورًا ترتبط بالكيمياء الحيوية؛ وبالأيض وبآلية العمل. ويمكن مقارنة هذا مع التصوير بالأشعة السينية (البند 25-12) والتي تعكس صورتها الشكل والتركيب، وتشكّل تشريحًا للمنطقة المصورة.

9-31 الرنين النووي المغناطيسي (NMR) والتصوير بالرنين النووي المغناطيسي (MRI)

NMR

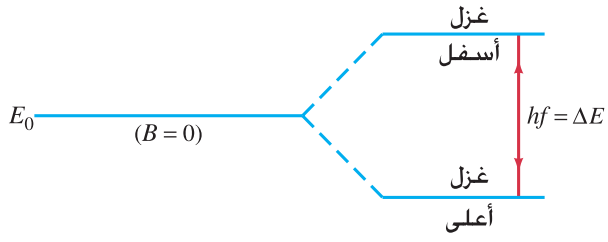
بعد اكتشافه عام 1946، أصبح الرنين النووي المغناطيسي، بشكل سريع، طريقة فاعلة جدًّا في الكثير من المجالات، من الفيزياء إلى الكيمياء والكيمياء الحيوية، كما أنّه تقنية مهمة في التصوير الطبي. في البداية، سنناقش باختصار هذه الظاهرة، ثم ننظر بعد ذلك إلى تطبيقاتها.

رأينا في (الفصل 28) (البند 28 - 6) أنّه عندما توضع الذرات في مجال مغناطيسي، فإنّ مستويات الطاقة الذرية تنقسم إلى عدة مستويات متقاربة (انظر الشكل 28 - 8). كما أنّ الأنوية أيضًا تحقق هذه الخصائص المغناطيسية. وسنختبر فقط أبسط نواة وهي نواة الهيدروجين (H) لأنّها الأكثر استخدامًا حتى في التصوير الطبي. تتكون نواة ^1_1H من بروتون منفرد. وكالإلكترون، فإنّ زخمه الزاوي المغزلي (وعزمه المغناطيسي) يأخذ قيمتين فقط عندما يوضع في مجال مغناطيسي، ونسميهما غزل للأعلى (موازٍ للمجال) وغزل للأسفل (معاكس للمجال) كما هو مبين في (الشكل 31 - 19). وعندما يظهر المجال المغناطيسي تنقسم طاقة النواة إلى مستويين كما هو موضح في (الشكل 31 - 20) حيث يأخذ الغزل العلوي (الموازي للمجال) الطاقة الأقلّ (يشبه ظاهرة زيمان لمستويات الطاقة الذرية، الشكل 28 - 8).



الشكل 31 – 19

يمثل رسم تخطيطي بروتون في مجال مغناطيسي $\vec{B}$ (نتيجة إلى أعلى) في حالتين إحداهما يغزل للأعلى والأخرى يغزل للأسفل.



الشكل 31 – 20: ينقسم مستوى الطاقة E_0 بغياب المجال المغناطيسي إلى مستويين للطاقة عند تطبيق مجال مغناطيسي.

يتناسب فرق الطاقة ΔE بين هذين المستويين مع المجال المغناطيسي الكلي B_T المطبق على النواة:

$$\Delta E = kB_T$$

حيث k هو ثابت تناسب يختلف للأنوية المختلفة.

في جهاز الرنين النووي المغناطيسي القياسي (NMR) توضع العينة المراد اختبارها في مجال مغناطيسي مستقر. تطبق إشارة ذات تردّد راديوي (RF) من إشعاع كهرومغناطيسي (فوتونات) على العينة. إذا كان التردد f لهذه الإشارة يساوي فرق الطاقة بين المستويين تماما (الشكل 31 - 20) فيكون:

$$hf = \Delta E = kB_T \qquad \textbf{(11 - 31)}$$

وهنا، فإن الفوتونات في الحزمة ذات التردد الراديوي ستمتص وستعمل على إثارة الأنوية من المستوى الأقل إلى المستويات الأعلى. وهذه هي ظاهرة الرنين التي يمكن الكشف عن فوتوناتها حيث يكون هنالك امتصاص محدّد فقط عندما يكون التردد f قريبًا جدًا من $f = kB_T/h$ ومن هنا جاءت تسمية الرنين النووي المغناطيسي. لنواة ${}^1_1\mathrm{H}$ الحرة، فإنّ التردد هو هيرتز 42.58 MHz لمجال مغناطيسي $B_T = 1.0\ \mathrm{T}$. إذا كانت ذرات الهيدروجين مرتبطة في جزيء، فإنّ المجال المغناطيسي الكليّ B_T المطبق على أنوية الهيدروجين سيكون مجموع المجال المغناطيسي الخارجي (B_{ext}) المطبق مضافًا إلى المجال المغناطيسي الموضعي (B_{local}) الناتج من إلكترونات وأنوية الذرات المجاورة. ولأنّ f تتناسب مع B_T، فإنّ قيمة f لمجال مغناطيسي خارجي مؤثر سوف تكون مختلفة قليلاً بالنسبة لذرات الهيدروجين المرتبطة مقارنة بذرات الهيدروجين الحرة:

$$hf = k(B_{ext} + B_{local})$$

يمكن قياس هذا الفرق البسيط في التردد الذي يسمّى (الانحراف الكيميائي). وهناك تفاصيل أكثر تمّ تعلمها عن تراكيب الجزيئات والروابط باستخدام مثل هذه الأقيسة للرنين النووي المغناطيسي (NMR).

يستخدم الهيدروجين لإنتاج صورة مفيدة طبيًّا للرنين النووي المغناطيسي (NMR) – تُسَمّى اليوم MRI أو التصوير بالرنين المغناطيسي – لأنّه العنصر الأكثر شيوعًا في جسم الإنسان، ويعطينا إشارة NMR قوية.

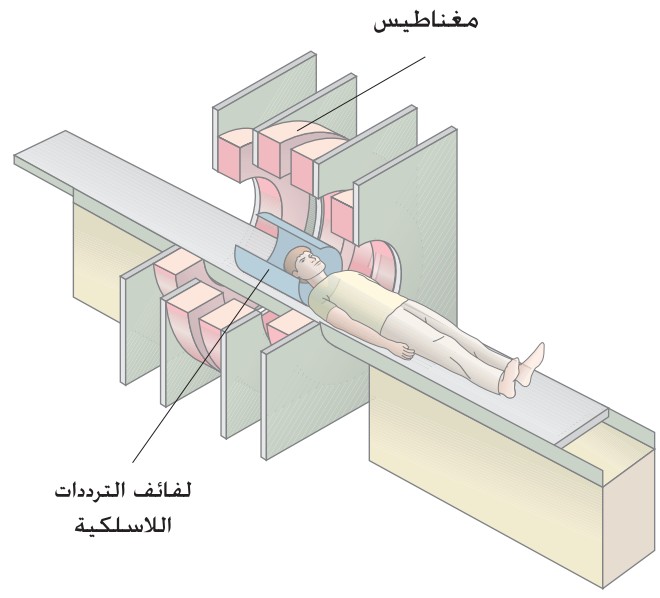
جهاز التصوير بالرنين النووي المغناطيسي موضح في (الشكل 31 - 21). الملف الكبير يعطينا المجال المغناطيسي الموضعي، وملف RF ينتج إشارة RF للأمواج الكهرومغناطيسية (الفوتونات) وهي التي تسبب قفز الأنوية من المستويات السفلى إلى المستويات العليا (الشكل 31 - 20). يمكن أن تكشف هذه الملفات (أو ملف آخر) امتصاص الطاقة أو انبعاث الإشعاع (أيضًا التردد $f = \Delta E/h$, المعادلة 31 - 11) عندما تقفز الأنوية إلى مستوى سفلي.

تطبيق الفيزياء

التصوير بالرنين النووي المغناطيسي (*MRI*)

(الشكل 31 - 21) جهاز التصوير بالرنين النووي المغناطيسي (أ) مخطط (ب) صورة

(ب)



(أ)

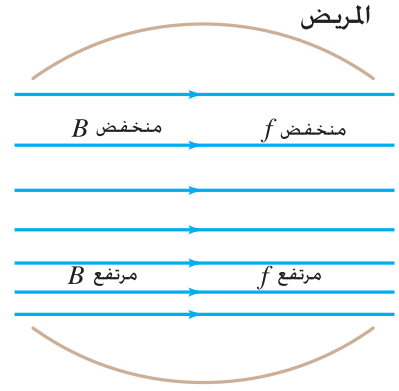
يمكن تكوين الصورة في بعدين أو ثلاثة بتقنية شبيهة بالتصوير الإشعاعي الطبقي (البند 25 - 12). وأنّ أبسط شيء يمكن قياسه لتكوين الصورة هو كثافة الإشعاع المتص أو المنبعث من النقاط المختلفة للجسم، وهذه ستكون قياسًا لكثافة ذرات الهيدروجين عند كلّ نقطة. ولكن كيف نستطيع تحديد الجزء من الجسم الذي يصدر الفوتون منه؟ إنّ إحدى التقنيات هي بإعطاء المجال المغناطيسي الموضعي تدرّجًا مع الموقع. أيْ أنّه بدلًا من تطبيق مجال مغناطيسي منتظم B_T، فإنّ هذا المجال يعمل بحيث يتدرج مع الموقع على طول العينة (أو الجسم). وحيث يتناسب التردّد المُمتَصّ بواسطة أنوية الهيدروجين مع B_T (المعادلة 31 - 11)، فإنّ هناك مستوى واحدًا في الجسم سيكون له قيمة مناسبة للمجال B_T ليمتص الفوتونات التي يكون لها تردد محدد f. وبتغيير f، يمكن قياس الامتصاص بواسطة المستويات المختلفة. وبشكل متناوب، إذا كان تغيّر المجال يطبق بعد إشارة **RF**، فإنّ تردد الفوتونات المنبعثة سوف يقاس من المكان الذي ينبعث منه. (انظر الشكل 31 - 22).

إذا كان تدرج المجال المغناطيسي باتجاه واحد يطبق خلال الاستثارة (امتصاص الفوتونات) وانبعاث فوتونات بتردد متفرد، فإنّ أنوية الهيدروجين الموجودة فقط في شريحة دقيقة سوف تستثار، وبتطبيق تدرّج للمجال المغناطيسي باتجاه مختلف، عمودي على الأول خلال إعادة الانبعاث، فإنّ التردد f للإشعاع المنبعث سوف يمثل عمق تلك الشريحة. وهنالك طرق أخرى يمكن استخدامها لربط تردد NMR مع الموقع لتدريج المجال المغناطيسي خلال حجم الجسم.

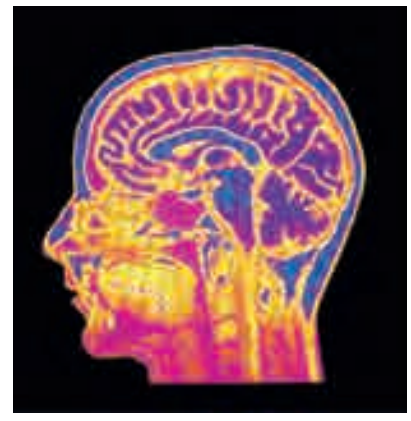
إنّ إعادة بناء الصورة التي تعتمد على كثافة ذرات الهيدروجين (كثافة الشعاع المتص أو المنبعث) ليس مفيدا كثيرًا. ولكن الأكثر فائدة هو التصوير المستند إلى المعدل الذي تنحل به الأنوية للعودة إلى المستوى الأرضي (المستقر). وهذه الصورة يمكن أن تنتج بتحليل يصل إلى 1 mm أو أفضل. إنّ تقنية NMR هذه (تُسَمّى أحيانًا الصدى المغزلي) تنتج صورًا قيمتها التشخيصية عالية لكلا الغرضين وهما: وصف التركيب (التشريح)، و دراسة عمليات الأيض. هناك صورة بواسطة NMR موضحة في (الشكل 31 - 23).

إنّ التصوير بواسطة NMR غير ضار للإنسان. ونستطيع حساب طاقة النوتونات اللازمة والتي ذكرت سابقًا في مجال مغناطيسي شدته 1.0-T وتردد $f = 42.58\ \text{MHz}$ للنظير ^1H. وهذا يكافئ طاقة مقدارها $hf = (6.6 \times 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})(43 \times 10^6\ \text{Hz}) \approx 3 \times 10^{-26}\ \text{J}$ أو حوالي $10^{-7}\ \text{eV}$. ولأنّ الروابط الجزيئية حول 1 eV، فمن الواضح أنّ الفوتونات ذات التردد الراديوي يمكن أن تسبب تمزيقًا قليلا للخلايا، وهذا يجب أن يقارن بأشعة X أو أشعة γ التي طاقتها في المدى من 10^4 إلى $10^6\ \text{eV}$، والتي يمكن أن تسبب تدميرًا كبيرا. يُعتقد بأنّ المجال المغناطيسي الموضعي الذي يعدّ كبيرًا نوعًا ما ($\approx 0.1 - 1\ \text{T}$) غير مؤذٍ (باستثناء الأشخاص الذين يستعملون جهازًا منظمًا لنبضات القلب).

يرينا (الجدول 31 – 2) قائمة للتقنيات الحديثة المتطورة التي ناقشناها للتصوير الداخلي للجسم. وبالطبع، فإنّ قوة التبيين (*resolution*) هي العامل الوحيد الذي يجب أخذه بالحسبان هنا. وعلينا تذكر أنّ طرق التصوير المختلفة توفر عدة أنواع من المعلومات المفيدة لعدة أنواع من التشخيص.



(الشكل 31 – 22)
المجال الموضعي الذي يكون أقوى في القاع من القمة. يتناسب تردد الشعاع المتص أو المنبعث تتناسب مع B في NMR



(الشكل 31 – 23)
ألوان غير صحيحة لصورة NMR لمقطع عمودي خلال الرأس يرينا تركيب الدماغ الطبيعي.

الجدول 31 – 2

التقنية	مكانها في هذا الفصل	التبيين
التصوير التقليدي بأشعة X	البند 25 - 12	$\frac{1}{2}$ mm
أشعة X، CT-Scan	البند 25 - 12	$\frac{1}{2}$ mm
متتبعات الأثر الطّبية	البند 31 - 7	1 cm
SPET	البند 31 - 8	1 cm
NET	البند 31 - 8	3–5 mm
NMR	البند 31 - 9	$\frac{1}{2}$–1 mm
الأمواج فوق الصوتية	البند 12 - 9	2 mm

ملخص

يظهر التفاعل النووي عندما تتصادم نواتان لإنتاج نواتين أو أكثر، أو جُسيمات مختلفة. في هذه العملية وكما في النشاط الإشعاعي، تظهر تحوّلات في العناصر.

طاقة التفاعل أو القيمة - Q للتفاعل $\mathrm{a} + \mathrm{X} \rightarrow \mathrm{Y} + \mathrm{b}$ هي

$$Q = (M_a + M_X - M_b - M_Y)c^2 \quad \textbf{(1-31)}$$

$$= K_b + K_Y - K_a - K_X \quad \textbf{(2-31)}$$

في الانشطار النووي، تنشطر نواة ثقيلة كاليورانيوم إلى نواتين متوسطتي الحجم بعد قذفها بنيوترون. تنشطر $^{235}_{92}\mathrm{U}$ بعد قذفها بنيوترونات بطيئة، في حين تحتاج بعض الأنوية الأخرى إلى نيوترونات سريعة لانشطارها. ينجم كثير من الطاقة عن الانشطار؛ لأنّ طاقة الربط لكلّ نيوكليون أقلّ في الأنوية الثقيلة منها في الأنوية المتوسطة. وتكون كتلة النواة الثقيلة أكبر من الكتلة الكلية لنواتج الانشطار.

ينطلق من عملية الانشطار نيوترونات، وهنالك إمكانية لحدوث تفاعل متسلسل. الكتلة الحرجة هي أقلّ كتلة نحتاج إليها من الوقود النووي لعمل تفاعل متسلسل. في المفاعلات النووية أو القنبلة النووية، نحتاج إلى مهدىء يعمل على إبطاء سرعة النيوترونات المنطلقة.

في عملية الاندماج النووي، تندمج أنوية صغيرة لتكوين نواة أكبر، كما ينتج هنا طاقة أيضًا. يُعتقد أنّ الطاقة الناتجة من شمسنا تنجم عن تفاعلات انشطارية تُسَمّى حلقة البروتون – بروتون، والتي يتحد فيها أربعة بروتونات لتكوين نواة $^{4}_{2}\mathrm{He}$ ، وينتج أكثر من 25 MeV من الطاقة. المفاعلات الاندماجية المفيدة لإنتاج الطاقة لم تثبت إمكانية تطويرها بسبب صعوبة احتوائها على الوقود النووي (الديتيريوم مثلا) لفترة طويلة عند درجات الحرارة العالية التي تحتاج إليها. يمكن أن يسبب الإشعاعُ إتلافَ المواد بما فيها الأنسجة البيولوجية. هنالك عدة وحدات وضعت لتقدير كمية الإشعاع: فالكوري (Ci) والبيكوريل (Bq) وحدتان تقيسان نشاطية المصدر أو معدل إشعاع العينة $1\ \mathrm{Ci} = 3.70 \times 10^{10}$ و $1\ \mathrm{Bq} = 1$ disintegration/s. تُحدّد الجرعة الممتصة دائمًا بالراد (rad) التي تقيس كمية الطاقة المترسبة في وحدة الكتلة من المادة الممتصة: *1 rad* هي كمية الإشعاع الذي يودع طاقة بمعدل $10^{-2}\ \mathrm{J/kg}$ من المادة وحدة النظام الدولي *SI* للجرعة الممتصة هي الجري (Gy) حيث $1\ \mathrm{Gy} = 1\ \mathrm{J/kg} = 100\ \mathrm{rad}$. تُحدّد الجرعة المؤثرة دائمًا بالرم (rem) حيث: $\mathbf{rem} = \mathrm{rad} \times \mathrm{QF}$ و QF هو معامل الجودة لنوع معين من الإشعاع. تقريبًا، 1 rem من أيّ نوع من الجرعات الإشعاعية يعمل المقدار نفسه من التلف البيولوجي. متوسط الجرعة الإشعاعية التي يتعرّض لها الأشخاص في الولايات المتحدة في السنة الواحدة حوالي 0.36 rem. وحدة النظام الدولي SI للجرعة المؤثرة هي السيفيرت (Sv) حيث $1\ \mathrm{Sv} = 10^{2}\ \mathrm{rem}$.

*[تستخدم الإشعاعات النووية طبّيًا في العلاج وتصوير العمليات البيولوجية، بالإضافة إلى أنواع عديدة من التصوير الطبقي لجسم الإنسان ممثلة في: PET، وSPET، و MRI، والأخيرة هي أحدث أنواع التصوير باستخدام ظاهرة الرنين النووي المغناطيسي (NMR)]

أسئلة

(ملحوظة: الكتل موجودة في المحلق ب).

1. أكمل الفراغ بالنواة أو الجسيم المناسبين:

(أ) $\mathrm{n} + {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} \rightarrow ? + \gamma$

(ب) $\mathrm{n} + {}^{137}_{56}\mathrm{Ba} \rightarrow {}^{137}_{55}\mathrm{Cs} + ?$

(جـ) $\mathrm{d} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} + ?$

(د) $\alpha + {}^{197}_{79}\mathrm{Au} \rightarrow ? + \mathrm{d}$

حيث d تمثل الديتيريوم.

2. ينتج النظير $^{32}_{15}\mathrm{P}$ من التفاعل $\mathrm{n} + ? \rightarrow {}^{32}_{15}\mathrm{P} + \mathrm{p}$. ماذا يجب أن تكون النواة الهدف؟

3. عندما يقذف $^{22}_{11}\mathrm{Na}$ بالديوترون $^{2}_{1}\mathrm{H}$ تنتج جسيم α. ما هي النواة الناتجة؟

4. لماذا يعدّ النيوترون قذيفة مثالية لإنتاج التفاعلات النووية؟

5. عند اصطدام بروتون بالنواة $^{20}_{10}\mathrm{Ne}$، نلاحظ انبعاث جسيم α. ما هي النواة الناتجة؟ اكتب معادلة التفاعل.

6. هل نواتج الانشطار النووي هي باعثات لأشعة β^{+} أم β^{-}؟ فسّر إجابتك.

7. إذا كان $^{235}_{92}\mathrm{U}$ ينتج في المتوسط *1.5* نيوترون لكلّ انشطار، فهل من الممكن حدوث التفاعل المتسلسل؟ وإذا كان هذا ممكنا، فماذا سيكون الاختلاف؟

8. ينتج $^{238}_{92}\mathrm{U}$ *2.5* نيوترون بالمتوسط لكلّ انشطار مقارنة بـ $^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ الذي ينتج *2.9* نيوترون لكلّ انشطار. إذا أخذنا عينة نقية من كليهما، فأيهما ستكون له كتلة حرجة أقلّ؟ فسّر إجابتك.

9. تظهر الطاقة الناتجة من الانشطار النووي على شكل طاقة حرارية. لأيّ شيء تكون هذه الطاقة الحرارية؟

10. لماذا لا يُخَصَّب اليورانيوم بالطرق الكيميائية؟

11. كيف يستطيع النيوترون الذي لا يمتلك طاقة حركية إثارة النواة في المدى الموضح في (الشكل 31 - 2)؟

12. لماذا تكون قطعة اليورانيوم ذات المسامات الأكثر قابلة للانفجار عند حفظها في الماء أكبر من قابليتها للانفجار عند حفظها في الهواء؟

13. يستطيع مفاعلٌ يستخدم يورانيوم عالي التخصيب استخدامَ الماء العادي (بالإضافة إلى الماء الثقيل) كمهدئ، ومع ذلك يبقى لدينا تفاعل متسلسل مدعوم ذاتيًّا. فسّر ذلك.

14. لماذا يجب أن تُنتِج عملية الانشطار نيوترونات لكي تكون مفيدة؟

15. ناقش الحسنات والسلبيات النسبية بما فيها التلوث والأمان للطاقة الناتجة لكلّ من الوقود الأحفوري، والانشطار النووي، والاندماج النووي.

16. ما سبب وجود النظام الثاني في المفاعل النووي في (الشكل 31 – 7)؟ أي لماذا لم نستخدم الماء الذي سخن من الوقود مباشرة لتشغيل التوربينات؟

17. لماذا تنتج النيوترونات في التفاعل الانشطاري؟

18. لماذا تخترق جُسيمات جاما المواد بسهولة أكثر من جُسيمات بيتا؟

19. لماذا تحتاج إلى حرارة أكبر في حالة تفاعل الديتيريوم -ديتيريوم منها في حالة تفاعل الديتيريوم - تريتيوم؟ فسر إجابتك.

20. تنتج الطاقة الضوئية المنبعثة من الشمس والنجوم من عملية اندماج. ما الشروط اللازمة داخل النجوم لجعل هذا ممكنًا؟

21. كيف تحافظ النجوم والشمس على حجز البلازما للاندماج؟

22. ما الفروقات الأساسية بين الاندماج النووي والانشطار النووي؟

23. يواجه الأشخاص الذين يعملون حول المواد المعدنية التي تنتج جُسيمات ألفا خطرا قليلا من الاقتراب أو حتى من ملامسة هذه المواد، ولكن عليهم أخذ الحيطة و الحذر من ابتلاعها. لذا، هناك قواعد صارمة تمنع الأكل والشرب في أثناء العمل، وعند تصنيع المعادن كذلك، لماذا؟

24. لماذا تكون الجرعة الإشعاعية القصوى الموصى بها للنساء في مراحل الطفولة أعلى منها للنساء الشابات؟

25. يستخدم الإشعاع أحيانًا لتعقيم الأدوات الطبية وحتى الطعام. اشرح كيفية هذه العملية؟

26. ما الفرق بين كلّ من الجرعة الممتصة والجرعة المؤثرة؟ ما وحدات النظام الدولي SI لكليهما؟

27. كيف نستطيع استخدام متتبعات الأثر المشعة في الكشف عن شق في أنبوب؟

مسائل

(ملحوظة: الكتل موجودة في الملحق ب)

31-11 التفاعلات النووية وتحوّلات العناصر

1. (I) يتكون الألمنيوم الطبيعي كلّه من $^{27}_{13}\text{Al}$. إذا امتص نيوترونا، فماذا يصبح؟ هل ينحلّ بواسطة β^+ أم β^-؟ ماذا ستكون النواة الناتجة؟

2. (I) هل يحتاج التفاعل $^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \text{n}$ إلى طاقة ابتدائية؟ وضّح ذلك.

3. (I) هل التفاعل $^{238}_{92}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}^{239}_{92}\text{U} + \gamma$ ممكنًا بواسطة نيوترونات بطيئة؟ فسّر إجابتك.

4. (II) هل يحتاج التفاعل $^7_3\text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \alpha$ إلى طاقة، أم أنّه يعطي طاقة؟ ما مقدار هذه الطاقة؟

5. (II) احسب الطاقة الناتجة (أو الطاقة اللازمة) لحدوث التفاعل $^9_4\text{Be} + \alpha \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \text{n}$

6. (II) (أ) هل يمكن حدوث التفاعل $^{24}_{12}\text{Mg} + \text{n} \rightarrow {}^{23}_{11}\text{Na} + \text{d}$ إذا كان الجسم المقذوف يمتلك طاقة حركية مقدارها 10.00 MeV؟ (d تمثل الديتيريوم ^2_1H). (ب) إذا كان كذلك، فما مقدار الطاقة الناتجة؟

7. (II) (أ) هل يمكن حدوث التفاعل $^7_3\text{Li} + \text{p} \rightarrow {}^4_2\text{He} + \alpha$ إذا كانت الطاقة الحركية للبروتون الساقط = 2500 keV ؟ (ب) إذا كان كذلك، فما الطاقة الحركية الكلية للنواتج؟

8. (II) في التفاعل $^{14}_7\text{N} + \alpha \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + \text{p}$، تمتلك جُسيمات α الساقطة طاقة حركية مقدارها 7.68MeV (أ) هل يمكن حدوث هذا التفاعل؟(ب) إذا كان كذلك، فما الطاقة الحركية الكلية للنواتج؟ كتلة $^{17}_8\text{O}$ تساوي 16.999131 u.

9. (II) احسب القيمة Q لتفاعل القنص التالي: $^{16}_8\text{O} + \alpha \rightarrow {}^{20}_{10}\text{Ne} + \gamma$.

10. (II) احسب الطاقة الحركية الكلية للنواتج في التفاعل $^{13}_6\text{C} + \text{d} \rightarrow {}^{14}_7\text{N} + \text{n}$ إذا كان الديوترون d يمتلك طاقة حركية $K_E = 36.3\ \text{MeV}$.

11. (II) ينتج $^{14}_6\text{C}$ المشع في الجو عندما يمتص النيوترون من النواة $^{14}_7\text{N}$. اكتب معادلة التفاعل، واحسب القيمة Q.

12. (II) مثال على تفاعل الانتزاع النووي (Stripping): $^6_3\text{Li} + \text{d} \rightarrow \text{X} + \text{p}$.
(أ) لماذا سمّي تفاعل انتزاع؟ (ب) ما هي النواة الناتجة X؟ (جـ) ما القيمة Q لهذا التفاعل؟ هل التفاعل ماصّ للحرارة أم طارد لها؟

13. (II) مثال على تفاعل الالتقاط (picK – up) النووي $^3_2\text{He} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow \text{X} + \alpha$.(أ) لماذا سمّي تفاعل التقاط؟ (ب) ما هي النواة الناتجة؟ (جـ) ما القيمة Q لهذا التفاعل؟ هل التفاعل ماص للحرارة أم طارد لها؟

14. (II) أكمل التفاعل النووي التالي: $\text{p} + ? \rightarrow {}^{32}_{16}\text{S} + \gamma$، (ب) احسب القيمة Q لهذا التفاعل.

15. (II) يحتاج التفاعل $^{18}_8\text{O} + \text{p} \rightarrow {}^{18}_9\text{F} + \text{n}$ إلى طاقة مدخلة تساوي 2.453 MeV. ما هي كتلة $^{18}_9\text{F}$؟

31 – 2 الانشطار النووي

16. (I) احسب الطاقة الناتجة من التفاعل الانشطاري $^{235}_{92}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}^{88}_{38}\text{Sr} + {}^{136}_{54}\text{Xe} + 12\text{n}$. استخدم الملحق B وافترض أنّ الطاقة الحركية الابتدائية للنيوترون الساقط قليلة جدًّا.

17. (I) ما الطاقة الناتجة من التفاعل الانشطاري في (المعادلة 31-4)؟ (كتل $^{141}_{56}\text{Ba}$، و $^{92}_{36}\text{Kr}$ هي 140.914411 u، و 91.926156 u على الترتيب.)

18. (I) كم عدد الانشطارات التي تحدث في الثانية الواحدة في مفاعل قدرته 200-MW؟ افرض أنّها تنتج طاقة مقدارها 200 MeV في الانشطار الواحد.

19. (II) الطاقة الناتجة من مفاعل انشطاري حوالي 200 MeV لكلّ انشطار. ما الكتلة السكونية للنواة $^{235}_{92}\text{U}$ المقابلة لهذه الطاقة؟

20. (II) لديك التفاعل الانشطاري التالي:
$^{235}_{92}\text{U} + \text{n} \rightarrow {}^{133}_{51}\text{Sb} + {}^{98}_{41}\text{Nb} + ?\text{n}$ (أ) كم عدد النيوترونات الناتجة في هذا التفاعل؟(ب) احسب الطاقة الناتجة. الكتل الذرية لكلّ من Sb، وNb هي 132.915250 u، و 97.910328 u على الترتيب.

21. (II) ما هي كتلة $^{238}_{92}\text{U}$ اللازمة لإنتاج الكمية نفسها من الطاقة الناتجة من احتراق 1.0 kg من الفحم (حوالي $3 \times 10^7\ \text{J}$)؟

22. (II) افرض أنّ معدل الطاقة الكهربائية التي يحتاج إليها منزل في اليوم والليلة تساوي 950 W. ما كتلة $^{235}_{92}\text{U}$ اللازمة لعمل انشطار يزوّد هذا المنزل بالطاقة لسنة كاملة؟(افرض أنّ الطاقة الناتجة من الانشطار الواحد هي 200 MeV، وأنّ الكفاءة 100%).

23. (II) ما الكتلة الابتدائية لليورانيوم $^{235}_{92}\text{U}$ اللازمة لتشغيل مفاعل قدرته 650-MW لسنة كاملة؟ افرض أنّ الكفاءة 40%.

24. (III) افرض أنّ نواتج انشطار $^{236}_{92}\text{U}$ عبارة عن نواتين متساويتين بالكتلة تقريبًا. احسب الطاقة الكامنة الكهربائية عند لحظة الانشطار. افرض أنّ النواتين الناتجتين كرويتا الشكل (انظر المعادلة 30 - 1). قارن حساباتك بالطاقة الناتجة من الانشطار والتي تساوي 200 MeV تقريبًا.

31 – 3 الاندماج النووي

25. (I) ما متوسط الطاقة الحركية للبروتونات في مركز نجم حرارته 10^7 K؟ (مساعدة: استخدم المعادلة 13 - 8).

26. (II) بيّن أنّ الطاقة الناتجة من التفاعل الاندماجي $^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{H} + \text{n}$ هي 17.59 MeV.

27. (II) بيّن أنّ الطاقة الناتجة من اندماج ديوترونين لتكوين ^3_2He مع انطلاق نيوترون تساوي 3.27 MeV.

28. (II) تحقق من القيمة Q لكلّ تفاعل في (المعادلات 31 - 6). [تنويه: احذر عند التعامل مع الإلكترونات].

29. (II) احسب الطاقة الناتجة لكلّ جرام من الوقود في (المعادلات 31 - 8أ، ب، جـ). قارن مع الطاقة الناتجة لكلّ جرام من اليورانيوم في الانشطار النووي.

30. (II) كم الطاقة الناتجة عندما تمتص $^{238}_{92}\text{U}$ نيوترونًا بطئيًا ($KE \approx 0$) وتصبح $^{239}_{92}\text{U}$؟

31. (II) إذا كان متوسط استهلاك المنزل التقليدي 950 W من الطاقة الكهربائية. فما أقلّ كمية من وقود الديتيريوم يجب استخدامها في السنة لتزويد هذا المنزل باحتياجاته الكهربائية؟ استعن بالتفاعل الموضح في (المعادلة31 - 8ب).

32. وضّح أنّ الطاقة التي تحملها كلّ من النواة ^4_2He والنيوترون في التفاعل الموضح وفق (المعادلة 31 – 8جـ)، هي حوالي 3.5 MeV و14 MeV على الترتيب. هل هذه القيم الثابتة لا تعتمد على درجة حرارة البلازما؟

33. (II) افرض أنّ مفاعل اندماج يعمل باستخدام تفاعلات (d-d) المبيّنة في (المعادلات 31 – 8 أ، ب). احسب كم سنحتاج من الماء كوقود في الساعة لتشغيل مفاعل قدرته 1000-MW. افرض أنّ الكفاءة 30%.

34. (III) كم الطاقة (بالجول) المحتواة في 1.00 kg من الماء إذا استخدم الديتيريوم الطبيعي فيه في التفاعل الاندماجي الموضح في (المعادلة 31 – 8 أ) ؟ قارن بالطاقة الناتجة من حرق 1.0 kg من الكازولين والتي تساوي 5×10^7 J تقريبًا.

35. (III) يعتقد أنّ الطاقة الناتجة من النجوم المتكتلة تنتج من حلقة الكربون – كربون (انظر الشرح). (أ) وضح أنه لا يُستهلك كربون في هذه الحلقة، وأنّ التأثير الكلي يشابه التأثير الناتج من حلقة البروتون – بروتون. (ب) ما الطاقة الكلية الناتجة؟ (جـ) لماذا تحتاج حلقة الكربون إلى درجة حرارة ($\approx 2 \times 10^7$ K) أعلى منها لحلقة البروتون–بروتون ($\approx 1.5 \times 10^7$ K)؟

36. (III) (أ) قارن الطاقة التي نحتاج إليها للتفاعل الأول في حلقة الكربون مع التي نحتاج إليها لتفاعل (الديتيريوم – تريتيوم) في (المثال31 - 9).(ب) إذا احتاج تفاعل الديتيريوم – تريتيوم إلى درجة $T \approx 3 \times 10^8$ K.احسب درجة الحرارة التي نحتاج إليها للتفاعل الأول في حلقة الكربون.

31 – 5 قياس الإشعاع – قياس الجرعات الإشعاعية

37. (I) تعدّ جرعة من أشعة جاما مقدراها 4.0 Sv في فترة زمنية قصيرة مميتة لنصف الناس الذين يتعرضون لها. ما مقدار هذه الجرعة بالجري؟

38. (I) بدلالة الدمار البيولوجي، كم رادا (rads) من الأشعة السينية (X) يكافىء 50 رادا (rads) من إشعاعات ألفا؟

39. (I) كم رادًا (rads) من النيوترونات البطيئة يعمل الدمار البيولوجي نفسه الذي يعمله 75 rads من النيوترونات السريعة؟

40. (I) كم مقدار الطاقة المترسبة في جسم شخص بالغ كتلته 65-kg عندما يتعرض لجرعة مقدارها 2.0-Gy؟

41. (II) حقنت عينة من $^{32}_{15}\text{P}$ شدة النشاط الإشعاعي لها 0.025-μCi في حيوان من أجل دراسة لتتبع الأثر الإشعاعي. إذا كان عداد جايجر يمر به 25% من جُسيمات β المنبعثة. ما معدل العدّ على اعتبار أنّ الكفاءة 85%؟

42. (II) يُعالَج مصاب بالسرطان إشعاعيًّا بحيث تسقط حزمة من البروتونات التي طاقتها 1.2 MeV على ورم سرطاني كتلته 0.25-kg.(أ) إذا كان المصاب يستقبل جرعة فاعلة مقدارها 1.0 rem، فما هي الجرعة الممتصة؟(ب) كم عدد البروتونات التي يمتصها الورم السرطاني؟ افرض أنّ $QF \approx 1$.

43. (II) مصدر مشعّ من $^{32}_{15}\text{P}$ (في $NaHPO_4$) شدة نشاطه الإشعاعي 1.0-mCi، يعطي إشعاعات β، زرع في ورم سرطاني بحيث يعطي 36 Gy. إذا كان عمر النصف للنظير $^{32}_{15}\text{P}$ يساوي 14.3 days وإذا كانت 1 mCi تعطي حوالي 10 mGy/min. فما الوقت التقريبي الذي يجب أن يبقى فيه المصدر مزروعًا في الورم السرطاني؟

44. (II) نحتاج إلى حوالي 35 eV لإنتاج زوج واحد من الأيونات في الهواء. بيّن أنّ هذا متوافق مع تعريفي الرونتجن المبينين سابقًا في الشرح.

45. (II) $^{57}_{27}\text{Co}$ يشع 122-keV من أشعة γ. إذا ابتلع شخص كتلته 70-kg مقدار 1.85 μCi من $^{57}_{27}\text{Co}$. ما معدل الجرعة الإشعاعية (Gy/day) للجسم كلّه بالمتوسط؟ افرض أنّ 50% من أشعة γ تترسب في الجسم. [مساعدة: احسب معدل الطاقة المترسبة في الجسم، ثم استخدم تعريف الجري (gray)].

46. (II) ما كتلة $^{14}_{6}\text{C}$ التي تعطي نشاطًا إشعاعيًّا شدته 1.00-μCi؟

47. (II) تحررت كمية هائلة من النظير المشع $^{131}_{53}\text{I}$ في حادثة تشيرنوبل عام 1986. كيميائيًّا، يذهب اليود إلى الغدة الدرقية عند الإنسان. (يُستعمل من قِبَلِ الأطباء لتشخيص مشاكل الغدة الدرقية). في الوضع الطبيعي، امتصاص يمكن أن يسبب دمارًا للغدة الدرقية. (أ) اكتب معادلة انحلال $^{131}_{53}\text{I}$.(ب) إذا كان عمره النصفي 8.0d، فكم الوقت المستغرق بعد حقن $^{131}_{53}\text{I}$ ليصبح 10% من قيمته الأصلية؟(جـ) قد يكون امتصاص 1 mCi من $^{131}_{53}\text{I}$ ضارًا. ما كتلة اليود هذه؟

48. (III) لو افترضنا أنّ النشاط الإشعاعي للترٍ من الحليب 2000 pCi بسبب وجود $^{40}_{19}\text{K}$. إذا شرب شخص كأسينٍ (0.5 L) من الحليب يوميًّا، فاحسب الجرعة المؤثرة الكلية (بوحدتي Sv و rem) التي يستقبلها في سنة. كما في نموذج كرود، افرض أنّ الحليب يبقى في المعدة 12 hr، ومن ثمَّ يتحرر. افرض (بتقريب كبير) أنّ 10% من 1.5 MeV المتحررة لكلّ تحلل تمتصّ من الجسم. قارن نتائجك بالجرعة الطبيعية المسموحة وهي 100 mrem في السنة، أجرِ حساباتك لـ : (أ) شخص بالغ كتلته 50-kg. (ب) طفل كتلته 5-kg.

49. (III) يعدّ غاز الرادون $^{222}_{86}\text{Rn}$ خطرا حقيقيّا على الصحة (انظر الشرح) وينحلّ بأشعة α : (أ) ما هي الأنوية الناتجة من التحلّل؟ (ب) هل الأنوية الناتجة مستقرة أم مشعة؟ (جـ) هل الأنوية الناتجة غازات نبيلة، أم أنها قابلة للتفاعل كيميائيًّا؟ (د) لو افترضنا أنّ 1.0 ng من $^{222}_{86}\text{Rn}$ تتسرب إلى الدور السفلي، فماذا ستكون شدة نشاطها الإشعاعي؟ إذا أغلق الدور السفلي بعد ذلك بإحكام، فماذا ستكون شدة النشاط الإشعاعي بعد مرور شهر واحد؟ [مساعدة: انظر الشكل 30 - 11].

31 – 9 الرنين النووي المغناطيسي (NMR)

50. (II) احسب الطول الموجي للفوتونات التي نحتاج إليها لإنتاج انتقال NMR لبروتونات حرة في مجال مغناطيسي شدته 1.000-T. في أيّ مدى من الطيف يقع هذا الطول الموجي؟

مسائل عامة

51. اكتشف شادويك النيوترون بعد قذف نواة ^9_4Be بالقذيفة المعروفة آنذاك وهي جسيم ألفا: (أ) إذا كان أحد نواتج التفاعل هو النيوترون المجهول، فماذا سيكون الناتج الثاني؟ (ب) ما هي القيمة Q لهذا التفاعل؟

52. درجات حرارة الاندماج النووي تعطي عادة بوحدة keV. أوجد معامل التحويل من كلفن إلى keV باستخدام المعادلة المعروفة في هذا المجال $\overline{\text{KE}} = kT$ دون المعامل $\frac{3}{2}$.

53. إحدى طرق تخصيب اليورانيوم هي باستخدام انتشار غاز UF_6 خلاله. احسب نسبة سرع الجزيئات لهذا الغاز الذي يحوي $^{235}_{92}\text{U}$ و $^{238}_{92}\text{U}$، والذي تعتمد عليه هذه العملية.

54. ما كتلة $^{235}_{92}\text{U}$التي استخدمت فعليًّا للانشطار في أول قنبلة ذرية، والتي كانت طاقتها تكافئ الطاقة الناتجة من عشرين كيلو طن من TNT (كيلو طن واحد يعطي 5×10^{12}J)؟

55. متوسط الإشعاع السنوي الذي تتعرض له قرية ما يتكون من 21 mrad من أشعة X، وأشعة γ بالإضافة إلى 3.0 mrad من جُسيمات لها QF يساوي 10. ما معدّل rem السنوي الذي يستقبله ؟

56. يشكّل الديتيريوم نسبة 0.0115% من الهيدروجين بالمتوسط. قدّر كمية الديتيريوم الكلية في محيطات الأرض، ثم احسب الطاقة الكلية الناتجة إذا استخدمت هذه الكمية كلّها في مفاعل اندماجي.

57. يعطي مصدر مغلَّف لأشعة γ جرعة إشعاعية بمعدل 0.052 rad/h على مسافة 1.0 m لشخص متوسط الحجم. إذا كان مسموحًا للعامل بجرعة إشعاعية مقدارها 5.0 rem في السنة الواحدة. فما المسافة التي يجب أن يعمل عندها بعيدًا عن المصدر إذا كان يعمل 40-h في الأسبوع؟ افرض أنّ شدة الإشعاع تتناسب عكسيًّا مع مربع المسافة. (في الواقع، تقلّ بسرعة أكبر من $1/r^2$ بسبب الامتصاص في الهواء، والقيمة التي ستحصل عليها ستكون أفضل من القيمة المسموحة.)

58. يتشكل غاز الرادون $^{222}_{86}Rn$ من انحلال α:(أ) اكتب معادلة الانحلال. (ب) أهمل الطاقة الحركية للأنوية الناتجة (لأنّ كتلها كبيرة) واحسب الطاقة الحركية لجسيم α الناتج. (جـ) احسب كمية الحركة (الزخم) للأنوية الناتجة ولجسيم α. (د) احسب الطاقة الحركية للأنوية الناتجة، وبيّن أنّ التقدير الذي عملته في الفرع (ب) صحيح.

59. لديك نظام لإنتاج الطاقة النووية ينتج 3400 MW: (أ) ما الكتلة الكلية لوقود اليورانيوم $^{235}_{92}U$ التي نحتاج إليها لتشغيل هذا النظام سنة كاملة إذا علمت أن كل عملية انشطار تنتج 200 MeV؟(ب) عادة، 6% من أنوية $^{235}_{92}U$ تنشطر (لتنتج $^{90}_{38}Sr$)، والتي تنحلّ بدورها عن طريق فقدان أشعة بأشعة β^- بعمر نصف مقداره 29 سنة. ما شدة النشاط الإشعاعي الكلية التي يصدرها $^{90}_{38}Sr$ في سنة؟ (أهمل حقيقة أنّ بعضها ينحلّ في سنة؟).

60. في التفاعل الموضح في (المعادلة 31 – 7) لحلقة البروتون – بروتون في الشمس، تنفلت النيوترينوات من الشمس بطاقة تساوي 0.5 MeV تقريبًا. في حين تبقى الطاقة المتبقية 26.2 MeV متوافرة في الشمس. استخدم هذه القيمة لحساب "حرارة الاحتراق" لكلّ كيلو جرام من وقود الهيدروجين، وقارنها بحرارة احتراق الفحم التي تساوي 3×10^7 J/kg تقريبًا.

61. تصل الطاقة إلى الأرض من الشمس بمعدل 1400 W/m^2 تقريبًا. احسب: (أ) القدرة الكلية الخارجة من الشمس. (ب) عدد البروتونات المستهلكة لكلّ ثانية في التفاعل الموضح في (المعادلة 31 - 7) على افتراض أنّ هذا هو مصدر الطاقة الشمسية كلّها.(جـ) افرض أنّ كتلة الشمس التي تساوي 2.0×10^{30} kg هي كلّها في الأصل من البروتونات، وكلّها تستهلك في التفاعلات النووية في قلب الشمس، فكم من الوقت تتوقع أن تبقى الشمس تشعّ بالمعدل الحالي؟ انظر التمرين السابق.

62. قد تبدأ بعض النجوم في مراحل سابقة من نشوئها باندماج نواتين من $^{12}_{6}C$ لتكوين نواة $^{24}_{12}Mg$: (أ) ما مقدار الطاقة الناتجة من هذا التفاعل؟(ب) ما الطاقة الحركية التي يجب أن تمتلكها ذرتا الكربون عندما تكونان بعيدتين عن بعضهما إذا كانتا تقتربان من بعضهما بعضا مسافة 6.0 fm تقريبا من المركز للمركز؟ (جـ) تقريبًا، كم درجة الحرارة التي يحتاج إليها هذا التفاعل؟

63. يحوي جسم شخص بالغ متوسط الحجم حوالي 0.10 μCi من $^{40}_{19}K$ يأتي من الطعام: (أ) كم عدد الانحلالات في الثانية الواحدة؟ (ب) ينتج انحلال البوتاسيوم جُسيمات بيتا بطاقة حوالي 1.4 MeV. احسب الجرعة الإشعاعية في السنة لشخص بالغ كتلته 50-kg. هل هذه النسبة مقبولة مقارنة بالنسبة 3.6 mSv/year المكتسبة دون خطورة؟

64. عندما وقع حادث المفاعل النووي في تشيرنوبل عام 1986، انبعث 2.0×10^7 Ci إلى الجو. افرض أنّ هذا الإشعاع قد توزع بانتظام على سطح الأرض، ما شدة النشاط الإشعاعي لكلّ متر مربع؟ (شدّة النشاط الإشعاعي غير منتظمة في الواقع؛ حيث تعرضت المناطق الجافة في أوروبا إلى إشعاع أكثر من المناطق الممطرة).

65. يحوي نجم كمية كبيرة من الهيليوم الذي يستهلك حسب المعادلة $^4_2He + {}^4_2He + {}^4_2He \rightarrow {}^{12}_6C$. ما هي القيمة Q لهذا التفاعل؟

66. مصدر مشع من $^{137}_{55}Cs$ شدة نشاطه الإشعاعي له 1.0-μCi استخدم لمدة 2.0 h بواسطة طالب كتلته 75-kg في مختبر فيزياء. $^{137}_{55}Cs$ ينحلّ بواسطة انبعاث β^- بعمر نصف مقداره 30 سنة. متوسط الطاقة لأشعة بيتا المنبعثة حوالي 190 keV لكلّ تحلل. افرض أنّ الطالب يمتص الطاقة المنبعثة كلّها β، فما هي الجرعة المؤثرة (بوحدة rem) التي يستقبلها خلال عمله في المختبر؟

67. انبعثت كمية كبيرة من النظير $^{90}_{38}Sr$ خلال حادث المفاعل النووي في تشيرنوبل عام 1986. يدخل $^{90}_{38}Sr$ إلى الجسم من خلال سلسلة الطعام. ما الوقت المستغرق في انحلال 90% من أنوية $^{90}_{38}Sr$ المنبعثة خلال الحادث؟ انظر الملحق B.

68. ثلاثة مصادر مشعة لها شدة النشاط الإشعاعي نفسها. 25 mCi المصدر A يبعث 1.0-MeV من أشعة γ، أما المصدر B فيبعث 2.0-MeV من أشعة γ ، في حين يبعث المصدر 2.0-MeV من أشعة ألفا. ما الخطر النسبي لهذه المصادر؟

69. يريد مريض كتلته 70-kg عمل فحص طبي عن طريق حقنه بالنظير $^{99m}_{43}Tc$ (البند 31 - 7) الذي ينحلّ ببث أشعة جاما طاقتها 140-keV. عمر النصف لهذا الانحلال 6 ساعات. افرض أنّ حوالي نصف فوتونات جاما تجتاز الجسم دون أن تتفاعل مع أيّ شيء. كم يجب أن تكون شدة النشاط الإشعاعي الابتدائية لعينة Tc إذا كانت الجرعة الكلية للجسم لا تستطيع تجاوز 50 mrem؟ اعمل حسابات تقريبية على افتراض أنّ التأثيرات البيولوجية يمكن إهمالها.

إجابات التمارين

أ: $^{138}_{56}Ba$

ب: ثلاثة نيوترونات

جـ: 2×10^{17}