الفصل الثاني

النشـاط الإشعـاعي

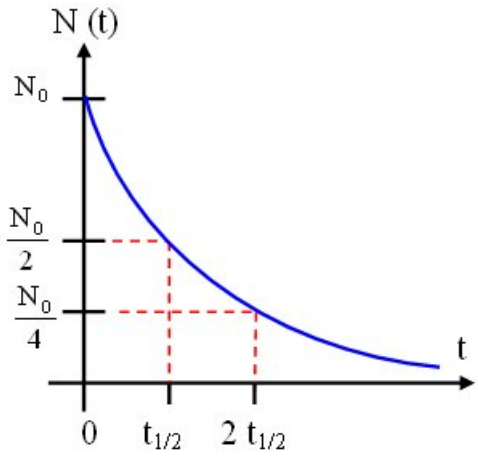
النوى صنفان : نوى مستقرة (stable) لا تتغير مع مرور الزمن ، و نوى غير مستقرة (unstable) تتحول تلقائيا إلى نوى أخرى مختلفة مع بث إشعاعات نووية (nuclear radiations) على شكل جسيمات أو فوتونات عالية الطاقة . نقول عن هذه الأخيرة أنها مشعة (radioactive) ، و تعرف الظاهرة بالنشاط الإشعاعي (radioactivity) . اكتشف النشاط الإشعاعي الطبيعي بالصدفة سنة 1896 على يد العالم الفرنسي "بكرال" (Becquerel) ، و كذلك الزوجان "بيار" و "ماري كوري" (Pierre and Marie Curie) اللذان اكتشفا عناصر طبيعية مشعة جديدة ، هي البولونيوم (polonium) و الراديوم (radium) . عام 1934 م ، اكتشف العالمان "إيران" و "فرديريك جوليو-كوري" (Irène et Frédéric Joliot-Curie) النشاط الإشعاعي الإصطناعي ، و هو استحداث نوى مشعة غير طبيعية في المخبر من خلال التفاعلات النووية .

1. قانـون الانحـلال الإشعـاعي

في غضون السنوات الثلاث التي أعقبت عام 1896 - تاريخ اكتشاف النشاط الإشعاعي - ، لاحظ العلماء أن معدل الإنحلال (disintegration rate) لمادة مشعة صافية يتناقص مع الزمن بطريقة أسية(exponential) . فالانحلال الإشعاعي للنكليدات يخضع في جميع الحالات إلى نفس القانون ، و هو أن عدد النوى ($\mathrm{d}N$) التي تتفكك خلال المدة الزمنية ($\mathrm{d}t$) يتناسب طردا مع عدد النوى الموجودة في تلك اللحظة (N) :

$$\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} = -\lambda N \qquad (14)$$

حيث يمثل λ ثابتا يدعى ثابت الإنحلال (disintegration constant) ، و لا تتوقف قيمته إلا على طبيعة النواة الأصلية . إشارة ناقص ($-$) تشير هنا إلى أن عدد النوى الأصلية يتناقص مع الزمن .



شكـــل 11: تغير عدد نوى نكليد مشع بدلالة الزمن .

حل المعادلة يقودنا إلى قانون الانحلال الإشعاعي (radioactive decay law) :

$$N(t) = N_0 \, \mathrm{e}^{-\lambda t} \tag{15}$$

حيث يمثل N_0 عدد النوى الموجودة في اللحظة الإبتدائية $(t = 0)$.

لتقدير مدى سرعة انحلال العناصر المشعة المختلفة ، نعرف عمر النصف (half-life) كالمدة الزمنية اللازمة لتنقص نوى مشعة إلى نصف عددها نتيجة للتحلل الإشعاعي :

$$N(t = t_{1/2}) = N_0 \mathrm{e}^{-\lambda t_{1/2}} = \frac{N_0}{2}$$

و منه :

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \tag{16}$$

يعطينا الشكل (11) تغير عدد نوى نكليد مشع بدلالة الزمن و لا سيما عمر النصف .

نعرف أيضا النشاط الإشعاعي (activity) لعنصر مشع ، و رمزها A ، كعدد النوى التي تخل في وحدة الزمن من عينة من هذا العنصر :

$$A(t) = \left| \frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t} \right| = \lambda N(t) = A_0 \mathrm{e}^{-\lambda t} \tag{17}$$

حيث يمثل A_0 النشاط الإشعاعي في اللحظة الإبتدائية $(t = 0)$. وحدة النشاط الإشعاعي في النظام العالمي هي البكرال (Bequerel) ، رمزها Bq ، و هي تساوي تفككا واحدا في الثانية . و هناك وحدة ثانية متداولة ايضا هي الكوري (Curie) ، رمزها (Ci) ، و هي تساوي :

$$1 \ \mathrm{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \ \mathrm{Bq}$$

المصادر الإشعاعية المستخدمة في المخابر غالبا ما يتراوح نشاطها الإشعاعي بين μCi و mCi .

2. أنمـاط الانحـلال الإشعـاعي

يخضع الانحلال الإشعاعي إلى قوانين حفظ (conservation laws) ، و هي قوانين أساسية في الفيزياء تحكم حفظ كميات أساسية لنظام معزول ، مثل الطاقة الكلية (total energy) و كمية الحركة (momentum) و الشحنة الكهربائية (electric charge) .

نعتبر انحلالا إشعاعيا في شكله العام :

$$(1) \rightarrow (2) + (3)$$

الشحنة الكهربائية الكلية لهذا النظام المعزول لا تتغير و بالتالي :

$$q_1 = q_2 + q_3$$

كما تبقى كمية الحركة الكلية دائما ثابتة ، مما يسمح لنا بكتابة :

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_3$$

الطاقة لا تفنى و لا تستحدث ، و لكن تتحول من صورة إلى أخرى . و من ثم يمكننا أن نكتب :

$$m_1c^2 + T_1 = m_2c^2 + T_2 + m_3c^2 + T_3$$

حيث تمثل m كتلة السكون (rest mass) و T الطاقة الحركية (kinetic energy) . تعرف القيمة Q للانحلال على النحو التالي :

$$Q = [m_1 - (m_2 + m_3)]c^2 = (T_2 + T_3) - T_1 \qquad (18)$$

لا يكون الانحلال ممكنا إلا إذا كانت قيمة Q موجبة $(Q > 0)$.

ا) الانحـلال الألفـاوي (α)

الانحلال الألفاوي (alpha decay) يصحبه إصدار جسيم α (α-particle) ، و هو عبارة عن نوى الهليوم 4 ($^4_2\mathrm{He}$) كما أثبته "روذرفورد" (Rutherford) عام 1909 . الشكل العام لهذا النمط من النشاط الإشعاعي يكون كالتالي :

$$^A_Z\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^4_2\alpha$$

حيث يمثل الحرف X رمز النكليد الأصلي (النواة الأم) و Y رمز النكليد النهائي (النواة البنت) . مثلا :

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

يساوي عمر النصف لهذا النكليد 1600 سنة و تساوي الطاقة الحركية لجسيمات α المنبعثة 4.8 MeV .
الكثير من النوى الثقيلة ($A \geq 150$) تتميز بهذا النوع من النشاط الإشعاعي .

انحفاظ الطاقة يسمح لنا بكتابة العلاقة التالية :

$$m_{\mathrm{X}}c^2 + T_{\mathrm{X}} = m_{\mathrm{Y}}c^2 + T_{\mathrm{Y}} + m_\alpha c^2 + T_\alpha$$

و منه - بافتراض أن النواة الأم في حالة سكون - :

$$Q = m_{\mathrm{X}}c^2 - m_{\mathrm{Y}}c^2 - m_\alpha c^2 = T_{\mathrm{Y}} + T_\alpha$$

الانحلال الألفاوي لا يمكن أن يحدث تلقائيا إلا إذا كان لدينا :

$$Q > 0$$

من جهة أخرى ، انحفاظ كمية الحركة يسمح لنا بكتابة :

$$p_{\mathrm{Y}} = p_\alpha$$

حيث يمثل p_{Y} كمية حركة النواة الناتجة و p_α كمية حركة الجسيم α المنبعث . و منه نستنتج أن :

$$T_\alpha = \frac{Q}{1 + m_\alpha/m_{\mathrm{Y}}} \approx Q\left(1 - \frac{4}{A-4}\right) \qquad (19)$$

يأخذ جسيم α المنبعث حوالي 98% من الطاقة الكلية بينما لا تأخذ النواة المرتدة إلا حوالي 2% .

ب) الانحـلال البيتـاوي (β)

الانحلال البيتاوي (beta decay) يصحبه ، إما إصدار إلكترون (electron) و نيوترينو الإلكترون المضاد (electronic anti-neutrino) :

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \;\rightarrow\; ^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} \;+\; ^{0}_{-1}\mathrm{e}^- \;+\; \bar{\nu}_{\mathrm{e}} \qquad (\beta^-)$$

و إما إصدار بوزيترون (positron) و نيوترينو الإلكترون (electronic neutrino) :

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \;\rightarrow\; ^{A}_{Z-1}\mathrm{Y} \;+\; ^{0}_{+1}\mathrm{e}^+ \;+\; \nu_{\mathrm{e}} \qquad (\beta^+)$$

مثلا :

$$^{131}_{53}\mathrm{I} \;\rightarrow\; ^{131}_{54}\mathrm{Xe} \;+\; ^{0}_{-1}\mathrm{e}^- + \bar{\nu}_{\mathrm{e}} \qquad (t_{1/2} = 8\ \mathrm{d})$$

$$^{25}_{13}\mathrm{Al} \;\rightarrow\; ^{25}_{12}\mathrm{Mg} \;+\; ^{0}_{+1}\mathrm{e}^+ + \nu_{\mathrm{e}} \qquad (t_{1/2} = 72\ \mathrm{s})$$

يلحق بالإنحلال البيتاوي ظاهرة ثالثة ، تدعى الأسر الإلكتروني (electron capture) ، رمزها EC ، و هي تتمثل في امتصاص النواة الذرية لإلكترون من إلكترونات الذرة المدارية ، و يصحب هذه الظاهرة إصدار نيوترينو الإلكترون :

$$ {}^{A}_{Z}\mathrm{X} + {}^{0}_{-1}\mathrm{e}^{-} \;\rightarrow\; {}^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} \;+\; \nu_{\mathrm{e}} \qquad (\mathrm{EC}) $$

مثلا :

$$ {}^{54}_{25}\mathrm{Mn} \;+\; {}^{0}_{-1}\mathrm{e}^{-} \;\rightarrow\; {}^{54}_{24}\mathrm{Cr} \;+\; \nu_{\mathrm{e}} \qquad (t_{1/2} = 312\ \mathrm{j}) $$

يمكن تلخيص الانحلال البيتاوي في المعادلات التالية :

$$ \begin{cases} \mathrm{n} \;\rightarrow\; \mathrm{p} \;+\; {}^{0}_{-1}\mathrm{e}^{-} \;+\; \bar{\nu}_{\mathrm{e}} & (\beta^{-}) \\ \mathrm{p} \;\rightarrow\; \mathrm{n} \;+\; {}^{0}_{+1}\mathrm{e}^{+} \;+\; \nu_{\mathrm{e}} & (\beta^{+}) \\ \mathrm{p} \;+\; {}^{0}_{-1}\mathrm{e}^{-} \;\rightarrow\; \mathrm{n} \;+\; \nu_{\mathrm{e}} & (\mathrm{EC}) \end{cases} $$

من الناحية الطاقوية ، يعطينا حساب حرارة التفاعل في حالة β^{-} مثلا :

$$ Q_{\beta^-} \approx [m(A,Z) - m(A,Z+1)]c^2 \approx T_{\mathrm{e}^-} + T_{\bar{\nu}_{\mathrm{e}}} $$

حيث يمثل T_{e^-} و $T_{\bar{\nu}_{\mathrm{e}}}$ الطاقة الحركية للإلكترون و النوترينو المنبعثين . كتلة النوترينو من جهة و طاقة ارتداد النواة البنت من جهة أخرى ضعيفتان و بالتالي يمكن إهمالهما . لدينا أيضا :

$$ T^{\max}_{\mathrm{e}^-} \approx T^{\max}_{\bar{\nu}_{\mathrm{e}}} \approx Q_{\beta^-} $$

ج) الانحـلال الغامـاوي (γ)

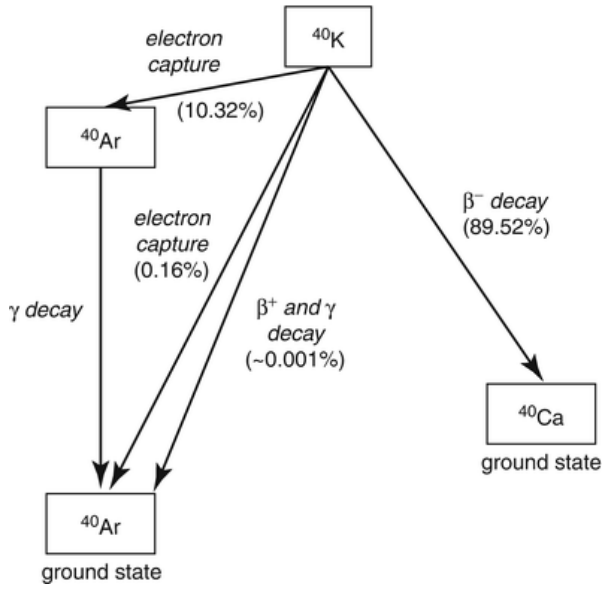
الانحلال الغاماوي (gamma decay) هو انتقال نواة مثارة إلى مستوى طاقي أدنى مع بث فرق الطاقة على شكل فوتون عالي الطاقة يدعى الإشعاع الغاماوي أو الأشعة غاما (γ-radiation) ، فهو يشبه ظاهرة انبعاث الضوء من طرف الذرات المثارة :

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

طاقة الفوتون المنبعث تساوي الفرق بين المستويين الطاقيين (بإهمال طاقة ارتداد النواة) :

$$ E_{\gamma} = \Delta E $$

و تتراوح قيمته بين 0.1 و 10 MeV . تعتبر دراسة الأطياف الطاقية التي تنتجها مختلف النكليدات في المجال الغاماوي (gamma spectroscopy) وسيلة فعالة لمعرفة مستوياتها الطاقية .



شكـل 12: مثال لنكليد يتحلل عن أكثر من طريق .

يظهر هذا النوع من النشاط الإشعاعي في كل النوى التي تملك حالات مثارة ($A > 5$) ، و هو يتبع غالبا الإنحلال الألفاوي و البيتاوي ، و نجده أيضا في التفاعلات النووية المستحدثة لأن النواة البنت في هذه الحالات غالبا ما تكون مثارة . عمر النصف ($t_{1/2}$) بالنسبة لهذه الظاهرة يكون عادة من رتبة 10^{-9} s ، لكن هناك بعض الحالات التي يكون فيها أطول بكثير و هي تعرف بالإنتقالات الإيسومرية (isomeric transitions) . هناك ظاهرة تصحب أحيانا الإنحلال الغاماوي ، تعرف بالتحول الداخلي (internal conversion) ، و هي تتمثل في امتصاص الفوتون المنبعث من طرف إلكترون من إلكترونات الذرة المدارية ، مما يقذف به خارج الذرة .

د) نشاطـات اشعاعيــة أخــرى

بعض النوى الثقيلة لها إمكانية الانشطار التلقائي (spontaneous fission) إلى جزءين كالنكليد $^{256}_{100}\mathrm{Fm}$ و $^{254}_{98}\mathrm{Cf}$ ، كما أن النكليدات التي ينتجها الإنشطار النووي تصدر أحيانا بصورة تلقائية نويات (بروتونات أو نوترونات) و تدعى هذه الظاهرة انبعاث النويات (nucleon emission) .

هـ) نســب التفــرع

بعض النكليدات المشعة تنحل عن أكثر من طريق . في هذه الحالة ، نقوم بحساب نسب التفرع (branching ratios) و هي نسبة (%) عدد النوى التي تتحلل عن طريق ما إلى عدد النوى الكلية المتحللة لهذا النكليد . يعطينا الشكل 12 مثالا لنكليد ينحل عن أكثر من طريق .

3. السلسـلات الاشعاعيـة

في الكثير من الأحيان ، انحلال النوى المشعة يؤدي إلى إنتاج نوى مشعة هي الأخرى ، فنحصل بالتالي على سلسلات اشعاعية (radioactive chain) :

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \ldots$$

ليكن N_i عدد نوى كل عنصر $(i = 1, 2, 3, ...)$ و لنفترض أن العينة صافية في اللحظة الإبتدائية :

$$N_1 = N_0 \; ; \qquad N_2 = N_3 = \ldots = 0$$

ليكن λ_i ثوابت انحلال مختلف العناصر على التوالي . عدد النوى الأصلية يتناقص مع الزمن وفقا للمعادلة :

$$\frac{\mathrm{d}N_1}{\mathrm{d}t} = -\lambda_1 N_1(t)$$

حل هذه المعادة من شكل :

$$N_1(t) = N_0 \, \mathrm{e}^{-\lambda_1 t}$$

كل نواة من العنصر الأول (1) تنتج نواة من العنصر الثاني (2) عندما تنحل . و بالتالي ، فإن عدد النوى (2) من جهة يتزايد بسبب تفكك نوى العنصر (1) ، و من جهة أخرى يتناقص بسبب نشاطه الإشعاعي ، مما يجعلنا نكتب :

$$\frac{\mathrm{d}N_2}{\mathrm{d}t} = +\lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

نكتب هذه المعادلة على الشكل المعتاد :

$$\frac{\mathrm{d}N_2}{\mathrm{d}t} + \lambda_2 N_2(t) = \lambda_1 N_0 \, \mathrm{e}^{-\lambda_1 t}$$

هذه معادلة تفاضلية من الدرجة الأولى بطرف ثاني غير ثابت ، حلها يكون من شكل :

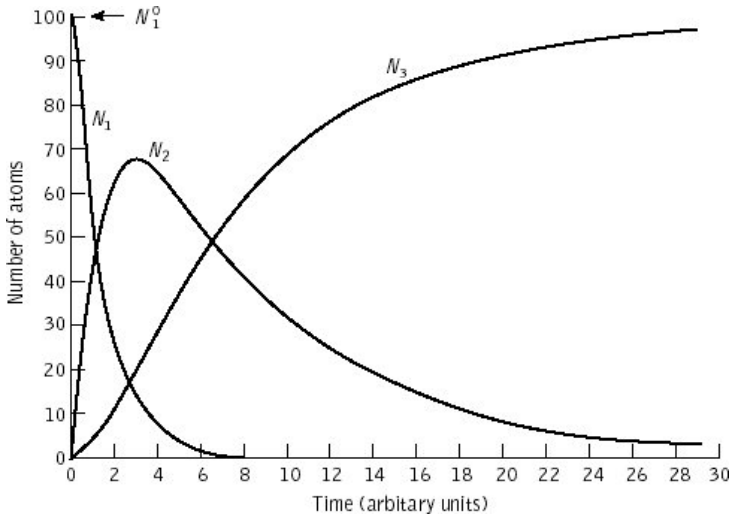
$$N_2(t) = N_0 \, \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \, \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

النشاط الإشعاعي للعنصر الثاني هو :

$$A_2(t) = \lambda_2 N_2(t) = N_0 \, \frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \, \left(e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t} \right)$$

الآن لو نفترض أن العنصر الثالث (3) غير مشع ، أي أن السلسلة الإشعاعية تتوقف ، فإن تغير العدد N_3 يعطى بالعلاقة :

$$\frac{\mathrm{d}N_3}{\mathrm{d}t} = +\lambda_2 N_2(t)$$



شكـل 13: التغير بدلالة الزمن لعدد نكليدات سلسلة إشعاعية تتوقف عند العنصر الثالث .

و منه :

$$N_3(t) = \int \lambda_2 N_2 \, \mathrm{d}t = N_0 \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}(e^{-\lambda_1 t} - 1) + \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}(e^{-\lambda_2 t} - 1) \right]$$

يعطينا الشكل (13) تطور عدد النكليدات بدلالة الزمن بالنسبة لسلسلة تتوقف عند العنصر الثالث .

النشاط الإشعاعي الكلي للعينة التي تتضمن السلسلة الإشعاعية يعطى بالعلاقة :

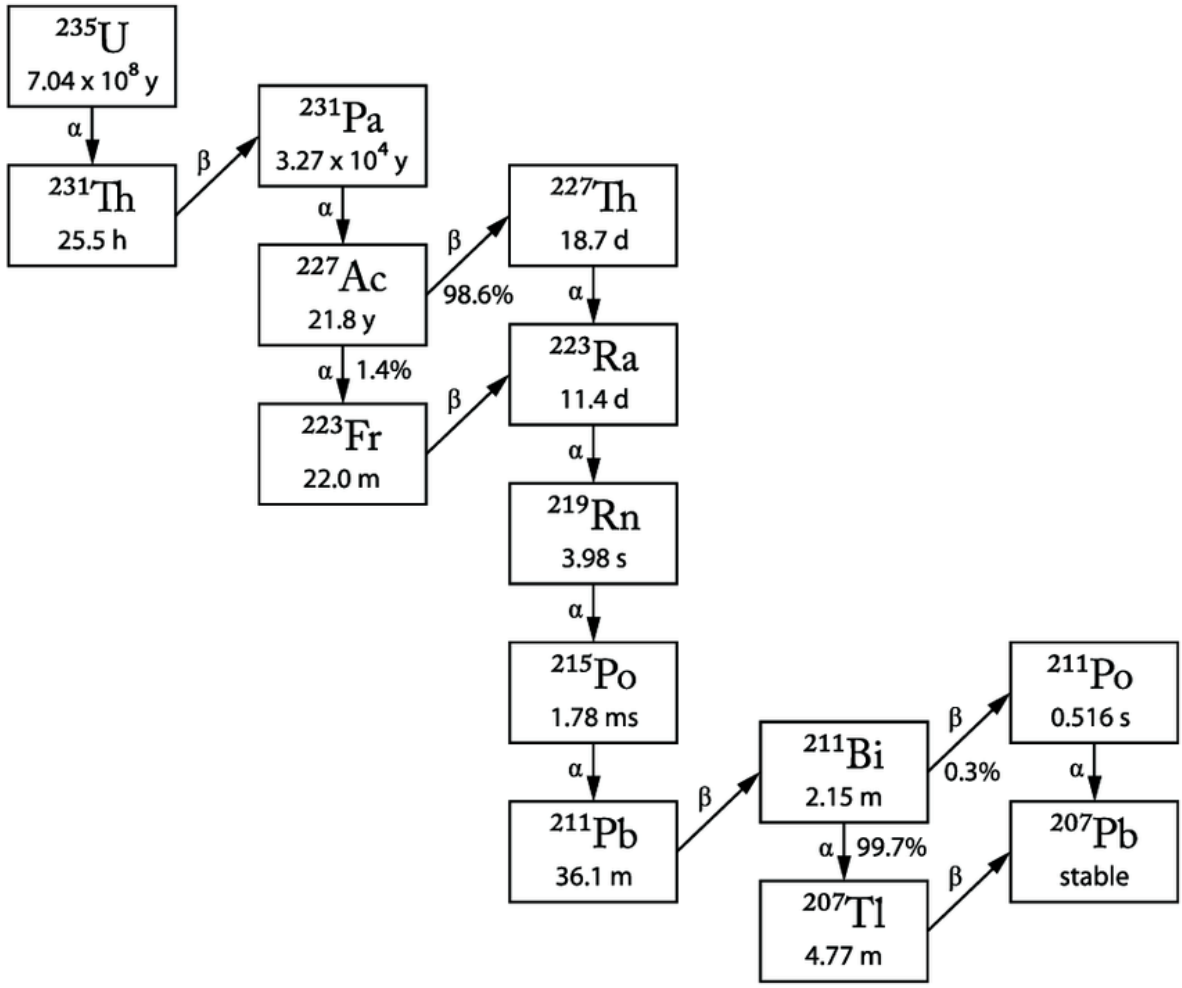
$$A(t) = \sum_i \lambda_i N_i(t) = \lambda_1 N_1(t) + \lambda_2 N_2(t) + \lambda_3 N_3(t) + \ldots \qquad (20)$$

4. النشـاط الاشعـاعي الطبيـعي

حين تكونت الأرض منذ حوالي 4.5 ملايير سنة ، تكونت معها نظائر مختلف العناصر التي من بينها النظائر المشعة . النظائر المشعة التي تتميز بمتوسط عمر قصير مقارنة بعمر الأرض اختفت من قشرة الأرض ، و ذلك بسبب إنحلالها الإشعاعي . أما تلك التي تتميز بمتوسط عمر طويل ، فهي ما تزال موجودة في الطبيعة ، و يتسبب انحلالها المتواصل منذ القدم فيما يعرف بظاهرة النشاط الإشعاعي الطبيعي (natural radioactivity) . تنتمي أغلب النكليدات المشعة الطبيعية إلى ثلاث سلسلات إشعاعية تعرف بالعائلة $4n$ و $4n+2$ و $4n+3$ ، حيث يمثل n عددا صحيحا (الجدول 2) . العائلة الأولى $(4n)$ تشمل كل النكليدات المشعة التي يكون رقمها الكتلي A مضاعفا للعدد 4 ، و العائلة الثانية $(4n+2)$ النكليدات المشعة التي يكون فيها A مضاعفا للعدد $4n+2$ ، إلخ . العائلة $4n+1$ كانت موجودة في الماضي لكنها تلاشت اليوم . يعطينا الشكل (14) تفاصيل السلسلة الإشعاعية الطبيعية المعروفة باسم سلسلة الأكتنيوم $(4n+3)$.

Type	Name	Longest-lived member	Final nucleus
$4n$	Thorium	$^{232}_{90}\mathrm{Th}$ $(1.41\times10^{10}$ y)	$^{208}_{82}\mathrm{Pb}$
$4n+1$	Neptunium	$^{237}_{93}\mathrm{Np}$ $(2.14\times10^{6}$ y)	$^{209}_{83}\mathrm{Bi}$
$4n+2$	Uranium	$^{238}_{92}\mathrm{U}$ $(4.47\times10^{9}$ y)	$^{206}_{82}\mathrm{Pb}$
$4n+3$	Actinium	$^{235}_{92}\mathrm{U}$ $(7.04\times10^{8}$ y)	$^{207}_{82}\mathrm{Pb}$

جدول 2: السلسـلات الاشعاعيـة الطبيعيـة .



شكـل 14: السلسلة الإشعاعية الطبيعية للأكتنيوم .

لكن يوجد أيضا في قشرة الأرض بعض النكليدات المشعة الأخرى التي تتميز بمتوسط عمر طويل مقارنة بعمر الأرض ، لكنها لا تؤدي إلى سلسلات إشعاعية (الجدول 3) .

من جهة أخرى ، تشكل الأشعة الكونية (cosmic rays) مصدرا ثانيا للنشاط الإشعاعي الطبيعي ، و هي عبارة عن جسيمات مشحونة عالية الطاقة تأتي من الفضاء الخارجي و تقذف الأرض من جميع الإتجاهات منذ الأزل . عندما تخترق الأشعة الكونية الغلاف الجوي للأرض ، تتفاعل مع نوى

Nuclide	Abundance (%)	Half-life	Disintegration	Products
$^{40}_{19}\mathrm{K}$	0.016	1.28×10^{9} y	β^-, EC, β^+	$^{40}_{20}\mathrm{Ca}$, $^{40}_{20}\mathrm{Ar}$
$^{87}_{37}\mathrm{Rb}$	27.83	4.8×10^{10} y	β^-	$^{87}_{38}\mathrm{Sr}$
$^{113}_{48}\mathrm{Cd}$	12.2	9.0×10^{15} y	β^-	$^{113}_{49}\mathrm{In}$
$^{115}_{49}\mathrm{In}$	95.7	5.1×10^{14} y	β^-	$^{113}_{49}\mathrm{Sn}$

جدول 3: بعض النكليدات الطبيعية المشعة التي لا تنتمي إلى سلسلات إشعاعيــة .

الهواء (الآزوت و الأكسيجين) مما يؤدي إلى إنتاج جسيمات ثانوية و نكليدات مشعة تساهم بقدر ضئيل في النشاط الإشعاعي الطبيعي ، لكن مفعولها يتوقف في الواقع على على خط عرض و إرتفاع المكان الذي تحسب فيه . من بين النكليدات المشعة المنتجة ، هناك نظير الكربون المشع الذي يدخل في تكوين كل الكائنات الحية بسبب امتصاص النباتات لثاني أكسيد الكربون (CO_2) . تستغل هذه الظاهرة في عملية قياس عمر المواد ذات الأصل البيولوجي المستخرجة من باطن الأرض .

5. النشـاط الاشعـاعي الاصطنـاعي

عام 1934 قام "فريدريك" و "إران جوليو-كوري" (Frédéric and Irène Joliot-Curie) بقذف صفيحة ألومنيوم بجسيمات α ، فلاحظا أن الألومنيوم يصدر بوزترونات (e^+) تتناقص شدتها مع الزمن بطريقة أسية . فهم العالمان أن جسيمات α قامت بتنشيط (activation) بعض نوى الألومنيوم ، أي أنها تحولت بعد امتصاص جسيم α إلى نوى مشعة :

$$\begin{aligned} ^{27}_{13}\mathrm{Al} + {}^{4}_{2}\alpha &\rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \\ {}^{30}_{15}\mathrm{P} &\rightarrow {}^{30}_{14}\mathrm{Si} + {}^{0}_{+1}\mathrm{e}^+ + \nu_\mathrm{e} \end{aligned}$$

النكليد $^{30}_{15}\mathrm{P}$ غير موجود في الطبيعة ، فهو أول نكليد مشع اصطناعي ، و يتميز بعمر نصف قدره دقيقتان و نصف ($t_{1/2} = 2.5$ mn) . النكليدات الإصطناعية تقدر اليوم بحوالي 3000 ، و هي تستخدم في شتى المجالات العلمية و التكنولوجية .

6. الوقايــة من الإشعــاع

تعرف أيضا الإشعاعات النووية المختلفة باسم الإشعاعات المؤينة (ionizing radiations) ، لأنها قادرة على تأيين المادة مباشرة عند المرور فيها . على وجه الخصوص ، عندما تخترق الإشعاعات النووية الخلايا الحية (living cells) ، تنقل إليها كمية من الطاقة و تقوم بتأيين و إثارة ذراتها و جزيئاتها ، و بالتالي فإن بعض مكونات الخلية قد تنقسم و يتغير تركيبها الكيميائي ، مما قد يؤدي إلى إحداث تغيرات في وظيفة الخلية ، أو إتلاف الخلية بالكامل . هذه التحولات تخل بأداء الخلايا و الأعضاء ، مما ينعكس سلبا على الصحة . لكن بالطبع ، خطورة هذه الأعراض تتوقف على كمية الإشعاعات الممتصة و على معدل امتصاصها .

ا) مصطلــح الجرعــة

لتقييم مدى خطورة الإشعاعات النووية على صحة الإنسان ، نستخدم عادة مصطلح الجرعة الممتصة (absorbed dose) ، رمزها D ، و هي الطاقة المتوسطة $(\mathrm{d}E)$ الممتصة من طرف حجم أولي لوسط ما مقسمة على كتلة هذا الحجم الأولي $(\mathrm{d}m)$:

$$D = \frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}m} \tag{21}$$

وحدة قياس الجرعة الممتصة في النظام العالمي هي الغراي (gray) ، رمزها Gy . لدينا :

$$1\ \mathrm{Gy} = 1\ \mathrm{J/kg}$$

و نستخدم أحيانا وحدة أخرى قديمة ، تعرف بالراد (rad) ، و هي كالتالي :

$$1\ \mathrm{Gy} = 100\ \mathrm{rad}$$

عندما يتعلق الأمر بالوقاية من الإشعاع النووي ، فإنه من الضروري أن نأخذ بعين الإعتبار الآثار البيولوجية لمختلف الإشعاعات النووية . و ذلك لأن بعض الإشعاعات تفقد طاقتها في الوسط الذي تعبره على طول مسارات طويلة ، أي أن كمية الطاقة المترسبة في مجال قصير ، كطول الخلية مثلا ، ضئيل جدا ، و هذا هو الحال مثلا بالنسبة للإشعاع الغاماوي (γ) و البيتاوي (β) . و على العكس ، هناك أصناف أخرى ، على غرار الإشعاع الألفاوي (α) و النوترونات (n) ، تفقد طاقتها بسرعة كبيرة على طول مسارات قصيرة جدا . بعبارة أخرى ، لو كان لدينا إشعاعان ، أحدهما ألفاوي و الآخر غاماوي ، لهما نفس قيمة الجرعة الممتصة ، فإن احتمال تحطيم خلايا حية يكون أكبر بكثير بالنسبة للإشعاع الألفاوي . لحساب هذه الإختلافات ، نربط كل صنف من الإشعاعات النووية

طبيعـة الإشعـاع	w_{R}
γ / β	1
p / n	5
α	20

جدول 4: معامـلات الإشعـاع الترجيحيـة .

بمعامل ترجيحي w_{R} ، تتراوح قيمته بين 1 و 20 كما هو مبين في الجدول (4) ، و نستخدم بدلا عن الجرعة الممتصة ما يعرف بالجرعة المكافئة (dose equivalent) ، رمزها H ، و هي حاصل ضرب الجرعة الممتصة (D) في معامل الإشعاع الترجيحي (w_{R}) . بالنسبة لوسط يتعرض لعدة إشعاعات في نفس الوقت ، لدينا :

$$H = \sum_{R} w_{\mathrm{R}}\ D_{\mathrm{R}} \tag{22}$$

وحدة الجرعة المكافئة في النظام العالمي هي السيفرت (sievert) ، رمزها Sv . لكن أحيانا نستخدم وحدة الريم (rem) القديمة ، و هي كالتالي :

$$1\ \mathrm{Sv} = 100\ \mathrm{rem}$$

و بما أن حساسية أعضاء الجسم و أنسجته إزاء الإشعاعات المؤينة متفاوتة ، نستخدم أيضا مصطلح الجرعة الفعالة (effective dose) ، و هي مجموع الجرعات المكافئة المحررة في كل عضو أو نسيج أخذا بعين الاعتبار هذا التفاوت في التأثر بالإشعاع من خلال معاملات ترجيحية خاصة . تهدف هذه الجرعة إلى تقييم الضرر الإجمالي ، و تقدر هي الأخرى بوحدة السيفرت (Sv) .

ب) مستويـات الإشعـاع في محيـط الإنسـان

مصادر الإشعاع النووي في الطبيعة ثلاث : الأشعة الكونية (cosmic rays) ، و النوى المشعة التي تدخل في تكوين جسم الإنسان ، و العناصر المشعة الموجودة بقشرة الأرض . تتسبب الأشعة الكونية في جرعة سنوية قدرها $0.25\ \mathrm{mSv}$ بالنسبة لجسم إنسان راشد على سطح الأرض ، لكن قيمتها في الواقع تتوقف على خط العرض و تزداد مع الإرتفاع . مثلا ، بالنسبة لارتفاع قدره $4000\ \mathrm{m}$ ، تساوي الجرعة السنوية التي تتسبب فيها الأشعة الكونية $2\ \mathrm{mSv}$ ، أي حوالي 8 مرات ما هو موجود على

مستوى سطح الأرض . أما النكليدات المشعة الموجودة في جسم الإنسان ، فإنها تؤدي إلى جرعة سنوية قدرها 0.17 mSv . و أخيرا العناصر المشعة الموجودة بقشرة الأرض ، خاصة اليورانيوم (U) و الثوريوم (Th) ، تؤدي إلى جرعة سنوية في المجال 0.2-0.4 mSv ، و ذلك بحسب المنطقة التي يعيش فيها الإنسان . و تجدر الإشارة هنا إلى أن جسم الإنسان قد تكيف مع الإشعاعات النووية الطبيعية ، فهي لا تمثل أي خطر على صحته . المشكلة تكمن في الإشعاعات التي استحدثها الإنسان لأغراض شتى و التي يجب التعامل معها بحذر .

ج) الآثـار البيولوجيــة للإشعاعـات النوويــة

يتم في معظم أجزاء و أنسجة الجسم البشري تجديد الخلايا باستمرار ، حيث يتم استبدال الخلايا الميتة بخلايا جديدة بصورة متواصلة . عند التعرض لجرعات عالية من الإشعاعات المؤينة ، يتلف عدد كبير من الخلايا و لا تستطيع عملية إعادة بناء الخلايا من استعواضها ، الأمر الذي قد يؤدي إلى فقد النسيج أو العضو لوظائفه . و إذا كان النسيج أو العضو من الأجزاء الحيوية الضرورية لاستمرار الحياة ، يكون الموت هو النتيجة الحتمية لذلك الشخص - أو الكائن - الذي تعرض للإشعاع .

تأثيرات الإشعاعات النووية على الإنسان - و سائر الكائنات الحية - إما تتجلى في نفس الشخص الذي يتعرض للإشعاع ، و تعرف عندئذ بالآثار الذاتية (somatic effects) ، و إما تنتقل إلى أبنائه و الأجيال التالية ، و تسمى حينئذ الآثار الوراثية (hereditary effects) . هذه الأخيرة قد تحدث عند تعرض الأعضاء التناسلية للإشعاعات المؤينة .

الآثار الذاتية بدورها صنفان . هناك أولا الآثار المبكرة التي تحدث عند التعرض لكمية كبيرة من الإشعاعات النووية في وقت قصير (بعض الساعات) ، مثلا عند انفجار قنبلة نووية أو إثر حادث خطير بمفاعل نووي ، و تسمى أيضا الآثار الحتمية (deterministic effects) ، و تتمثل في أعراض مرضية تحدث عندما تتجاوز الجرعة الممتصة عتبة تتوقف قيمتها على طبيعة العضو ، كما هو وارد في الجدول (5) . الأنسجة الأكثر حساسية إزاء الإشعاعات المؤينة هي خلايا الجهاز الهضمي و الجهاز التناسلي و النخاع العظمي و عدسة العين و الجلد . ثم هناك الأضرار المتأخرة التي تظهر بصورة عشوائية لدى فئة سكانية بعد زمن طويل من التعرض لإشعاع مؤين حتى و لو كان بقدر ضئيل ، و تعرف أيضا بالآثار العشوائية (stochastic effects) ، و تتمثل خاصة في مرض السرطان (cancer) و في بعض الاختلالات الوراثية (genetic anomalies) . على عكس الآثار الحتمية ، ليس هناك عتبة للآثار العشوائية ، لكن احتمال وقوعها يتزايد مع قيمة الجرعة الممتصة . الجرعات الضئيلة التي يتسبب فيها مثلا الفحوصات الطبية قد تؤدي إلى مثل هذه الأضرار المتأخرة . و بالتالي ، عند الوقاية من الإشعاعات النووية ، علينا أن نراعي مبدأ أساسيا ، و هو أن نحرص على أن تكون الجرعات عند أدنى

العضو	عتبة الجرعة الممتصة	طبيعة الأضرار
العين	0.5 Gy	إعتام العدسة
الدم	1 Gy	نقص كريات الدم البيضاء
	4.5 Gy	توقف إنتاج كريات الدم الحمراء
الجلد	1 Gy	طفح جلدي
الجهاز الهضمي	1−2 Gy	غثيان
	4−6 Gy	إصابة المعدة و الأمعاء
الغدد التناسلية	2.5 Gy	عقم عند النساء
	5 Gy	عقم عند الرجال
الجسم بأكمله	1−2 Gy	فقد الحيوية
	15 Gy	غيبوبة - موت دماغي - موت حتمي

جدول 5: الآثار الحتمية للإشعاعات المؤينة .

حد ممكن لها ، و هو ما يعرف بمبدإ "ألارا" (ALARA) . و توصي اللجنة العالمية للوقاية من الإشعاع (ICRP) بأن لا تتجاوز الجرعة المكافئة 20 mSv في السنة بالنسبة للعمال و 1 mSv في السنة بالنسبة لعامة الناس .