الباب الثاني

النشاط الإشعاعي

Radioactivity

1- نبذة تاريخية.

2- الاضمحلال الإشعاعي.

3- العمر النصفي الفيزيائي والنشاط.

4- العمر المتوسط.

5- النشاط النوعي.

6- اضمحلال خليط غير مرتبط.

7- اضمحلال خليط مرتبط.

8- العمر النصفي البيولوجي (الحيوي).

9- العمر النصفي الفعّال.

* * *

obeikandi.com

obeikandl.com

1- نبذة تاريخية

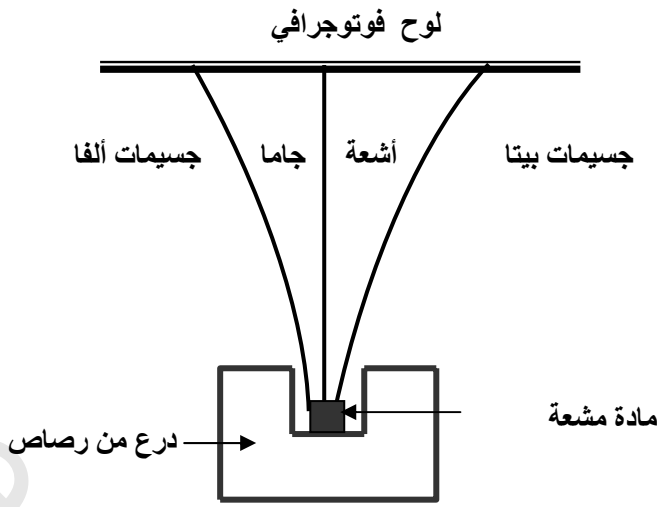
يستخدم المصطلح «النشاط الإشعاعي» للتعبير عن انطلاق طاقة من نواة غير مستقرة في صورة أشعة كهرومغناطيسية (فوتونات) وجسيمات نووية (جسيمات α - جسيمات β - نيوترونات) نتيجة تغير يحدث داخل النواة، وقد تم اكتشاف النشاط الإشعاعي في باريس عام 1896 عندما كان يجري عالم فرنسي اسمه هنري بيكرل Becquerel تجاربه على بعض مركبات اليورانيوم، فلاحظ تأثر الألواح الحساسة (الفوتوجرافية) بأشعة تنبعث تلقائيًا من هذه المركبات حتى ولو كانت ملفوفة بالورق الأسود.

تلى ذلك العديد من التجارب التي أظهرت أن كثيرًا من العناصر ذات الأرقام الذرية العالية ($Z>81$) تصدر أشعة لها نفس التأثير، ولا تتوقف خواصها على درجة الحرارة أو الضغط أو كون العنصر في مركب كيميائي بعينه، وخلال العديد من التجارب الرائدة والعمل المضني تمكنت السيدة ماري كوري Marie Curie وزوجها من اكتشاف بعض العناصر المشعة، مثل: البولونيم[1] Polonium ($^{214}_{83}Po$)، والراديوم ($^{226}_{88}Ra$) Radium، وهذان العالمان هما اللذان أعطيا ظاهرة انبعاث الفوتونات والجسيمات من تلك العناصر المسمى: "radioactivity".

بعد مرحلة اكتشاف النشاط الإشعاعي تركزت الأبحاث على محاولة التعرف على ماهية الإشعاع النووي، وعلاقة ذلك بالتركيب البنائي للنواة، وقد كان لرزفورد Rutherford في عام 1899 السبق في كشف الكثير عن طبيعة هذه الإشعاعات وخواصها، وعلاقة ذلك بالتركيب البنائي للنواة.

(1) أطلقت عليه هذا المسمى تشريفا لبلدها الأم بولندا.

obeikandl.com



شكل (1-2). شكل تخطيطي لانبعاث الأنواع المختلفة
الإشعاعات النووية من مادة مشعة.

عند وضع خليط من المواد المشعة في فجوة محفورة في قطعة سميكة من الرصاص (شكل 1-2) يمكن الحصول على شعاع من هذه الإشعاعات صغير المقطع في اتجاه واحد حيث تُمتص الإشعاعات الصادرة في الاتجاهات الأخرى بواسطة الرصاص. وعند مرور هذا الشعاع خلال مجال كهربي (أو مغناطيسي) يمر جزء بلا انحراف، وتلك هي أشعة جاما (γ) Gamma، ويمر جزء آخر منحرفا في اتجاه اللوح السالب للمجال الكهربي دالًّا على أنه عبارة عن جسيمات موجبة الشحنة، وتلك هي جسيمات ألفا Alpha (α)، والجزء الثالث يمر منحرفا نحو اللوح الموجب دالًّا على أنه جسيمات سالبة الشحنة، وتلك هي جسيمات بيتا (β).

2 - الاضمحلال الإشعاعي

Radioactive Decay

لكل نواة مشعة مجموعة من الخواص المميزة التي تنفرد بها عن غيرها، تلك تشمل النمط (الطريقة) التي تضمحل من خلالها النواة mode of radioactive decay وأنواع الأشعة المنطلقة وطاقة الانتقال transition energy (والتي عادة ما يُرمز لها بالحرف Q) والعمر المتوسط averagelifetime.

الاضمحلال الإشعاعي عملية تنتقل فيها النواة من حالة عدم استقرار إلى حالة أكثر استقرارا، ذلك من خلال انطلاق جسيمات نووية أو فوتونات (أشعة جاما) أوكليهما. قد تدخل الإلكترونات الذرية أحيانا طرفًا في عملية الاضمحلال (تأثير Auger، قنص إلكترون، التحول الداخلي)، لكن تظل عملية الاضمحلال نووية الأصل سببها عدم الاستقرار النووي nuclear instability، والطاقة المنطلقة أثناء الاضمحلال النووي تُسمى طاقة الانتقال transition energy Q.

اصطلاحا: تُسمى النواة الغير مستقرة بالنواة الوالدة (الأم) parent وعادة ما يُرمز لها بالرمز X، وتُسمى النواة الأكثر استقرارا، أي الناتجة من عملية الاضمحلال، النواة المولودة (الابنة) daughter، وعادة تأخذ الحرف Y، وتلك الأخيرة قد تكون غير مستقرة ومشعة أيضا فتقوم بعملية اضمحلال أخرى، وهكذا عملية الاضمحلال النووي عملية تلقائية spontaneous، بمعنى أنها لا تتأثر بالظروف خارج النواة، كما أنه ليس ثَمة طريقة يمكن بواسطتها أن نتوقع بالضبط متى تضمحل نواة غير مستقرة إلى أخرى أكثر استقرارا.

كما أسلفنا، أن لكل نواة غير مستقرة نمط معين للاضمحلال mode of decay. نتناول الآن الأنماط المختلفة التي تضمحل بها الأنوية المختلفة:

1-2 الاضمحلال عن طريق جسيمات بيتا السالبة

Decay by Beta β^- Emission

أغلب الأنوية المشعة غير مستقرة بسبب خلل النسبة بين النيوترونات والبروتونات neutron – proton imbalance، ومن ثَم يتم التوصل إلى الحالة الأكثر استقرارا بتحول نيوترون إلى بروتون في الأنوية الأغنى بالنيوترونات، أو تضمحل بتحول بروتون إلى نيوترون في الأنوية الأغنى بالبروتونات. في الحالة الأولى تنطلق جسيمات بيتا السالبة β^-، وفي الثانية تنطلق جسيمات بيتا الموجبة β^+ (بوزوترونات). في هذا النوع من العمليات يتغير العدد الذري Z بينما يبقى الرقم الكتلي A ثابتا ومن ثَم فهي انتقالات أيزوبارية isobaric trnsitions، وعلى ذلك يكون كل من النواة الوالدة والنواة المولودة isobars وتُعتبر جسيمات بيتا من الإشعاعات المؤينة (1) ionizing radiation.

(1) الإشعاعات المؤينة تشمل بعض أنواع الأشعة الكهرومغناطيسية (مثل فوتونات جاما وأشعة x) وبعض الجسيمات النووية (مثل جسيمات ألفا وبيتا والنيوترونات) التي لها القدرة على تأيين الذرات.

obeikandl.com

جسيمات بيتا السالبة عبارة عن إلكترونات (تسمى في بعض الأحيان **نيجاترونات** Negatrons) كالإلكترونات المدارية غير أن مصدرها عملية نووية لبعض الأنوية الغير مستقرة، والتي تكون لها النسبة n/p أعلى من القيمة التي تقابل الاستقرار أي أنوية غنية بالنيوترونات .

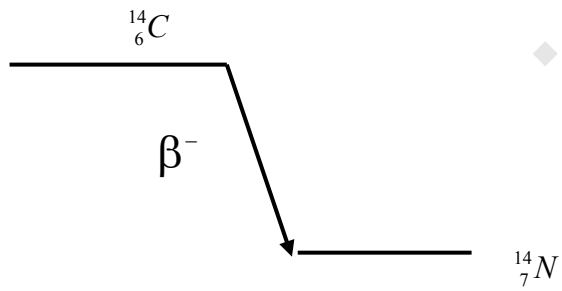
تنطلق أشعة بيتا السالبة نتيجة تحول نيوترون أثناء عملية التحلل الإشعاعي إلى بروتون وإلكترون، ويصاحب ذلك ظهور جسيم أولي elementary particle متعادل مهمل الكتلة يسمى **مضاد النيوترينو** Antineutrino ν^*، وذلك حتى يتسنى تحقيق القوانين الخاصة بحفظ الطاقة وكميتي الحركة الخطية والدورانية:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu^* \qquad (2-1)$$

ونظريًّا يستحيل تواجد الإلكترونات داخل النواة؛ ولذا يتصور تركه للنواة لحظة تخلقه (ولادته). ونتيجة لانطلاق جسيمات بيتا يزيد عدد البروتونات داخل النواة بمقدار 1.

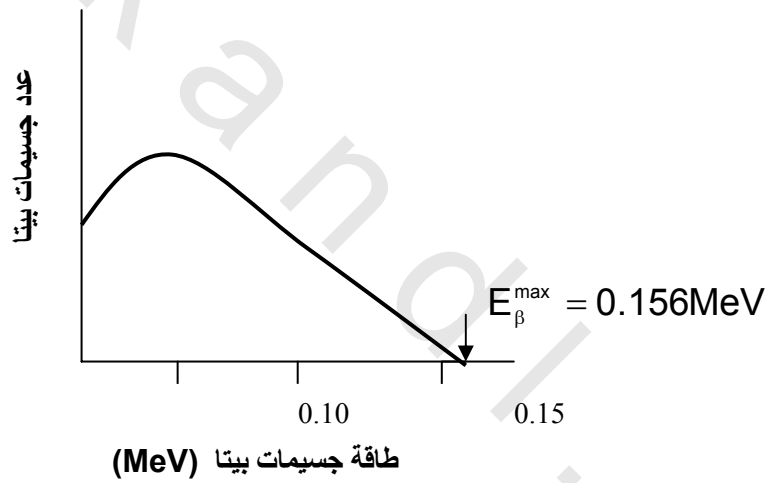
يمثل الاضمحلال الإشعاعي بمخطط يُسمى مخطط الاضمحلال decay scheme.

شكل (2-2) يمثل مخطط الاضمحلال الإشعاعي لنواة ^{14}C التي تضمحل عن طريق β^- فقط، يُرسم الخط الأفقي الذي يمثل النواة الوالدة ^{14}C أعلى يسار الخط الأفقي الذي يمثل النواة المولودة ^{14}N، السهم الذي يمثل عملية الاضمحلال يميل إلى اليمين؛ لأن العدد الذري (عدد البروتونات) يزيد للنواة المولودة نتيجة هذا الاضمحلال، المسافات الرأسية على المخطط تتناسب مع الطاقة المنطلقة، طاقة الانتقال Q، في حالتنا هذه، Q= 0.156 Mev.



شكل (2-2). مخطط الاضمحلال لنواة ^{14}C. يتم الاضمحلال عن طريق انطلاق β^- فقط.

طاقة الانتقال المنطلقة يتقاسمها كل من جسيم β^- ومضاد النيوترينو، ويتم هذا التقسيم بطريقة تكاد تكون عشوائية بين أنوية النظير المشع ^{14}C. هذا التوزيع العشوائي للطاقة يؤدي إلى انبعاث جسيمات بيتا على مدى متصل continuous، أي أن التوزيع الإحصائي (العدد النسبي) لجسيمات بيتا كدالة في طاقة الحركة التي تنطلق بها والذي يُسمى **بطيف بيتا** energy spectrum يُمثل بمنحنى متصل. شكل (2-3) يوضح هذا الطيف المتصل لجسيمات β^- المنبعثة من النظير ^{14}C، حيث تبدأ طاقة الحركة للجسيمات المنطلقة من قيمة ضئيلة تقترب من الصفر حتى قيمة عظمى تساوي طاقة الانتقال Q، أي أن القيمة العظمى لطاقة الحركة $E_\beta^{max} = 0.156Mev$، والطاقة المتوسطة لهذا التوزيع هي: $\overline{E}_\beta = 0.0493Mev$ وتساوي تقريبا $\frac{1}{3}E_\beta^{max}$، وكما يتضح من الشكل أنه نادرا ما تنطلق جسيمات بيتا بطاقتها القصوى:



شكل (2-3). التوزيع الطيفي لجسيمات β^- المنطلقة من ^{14}C

إذا كانت جسيمات بيتا تنطلق بطيف متصل من طاقة الحركة فإن الوضع يختلف في حالة انبعاث جسيمات ألفا وفوتونات جاما، حيث تنطلق كل بطاقة محددة القيمة discrete غير متصلة.

obeikandl.com

يُعزى انبعاث جسيمات α، أو فوتونات γ بطاقة محددة إلى انتقال النواة المشعة من حالة غير مستقرة إلى مستوى أقل للطاقة وصولا لحالة الاستقرار، وتساوي الطاقة التي ينطلق بها الجسيم أو الفوتون الفرق بين مستويي الطاقة للنواة في الحالتين، وتتضمن هذه العملية انطلاق جسيم ألفا بمفرده أو انبعاث فوتون جاما بمفرده، ولا يحدث أن ينطلقا سويًّا دفعة واحدة أو ينطلق أيهما مع جسيم آخر في ذات الوقت يشاركه طاقة الانتقال، كما لا تتضمن عملية انطلاق ألفا أو جاما تحولًا لأي من الجسيمات النووية، كأن يتحول بروتون إلى نيوترون أو العكس؛ أما في حالة جسيمات بيتا والتي تنطلق بطيف متصل من الطاقة لا ينفرد جسيم بيتا بكل الطاقة التي تقابل الفرق بين مستويي طاقة النواة قبل وبعد عملية الانطلاق (طاقة الانتقال Q)، ولكن يشاركه فيها جسيم آخر (النيوترينوأو مضاده) تتراوح طاقته من قيمة ضئيلة تقترب من الصفر (وحينئذ تنفرد بيتا بكامل الطاقة تقريبًا، وتلك هي القيمة العظمى للطاقة التي تنطلق بها $E_{\beta}^{\max}$) حتى قيمة تساوي تقريبًا الفرق بين مستويي الطاقة للنواة، وحينئذ ينطلق جسيم بيتا بطاقة ضئيلة جدًّا تقترب من الصفر، وهكذا تنطلق جسيمات بيتا بطيف متصل من الطاقة.

تتراوح طاقة جسيمات بيتا المنطلقة من الأنوية المشعة من بضع آلاف إلكترون فولت إلى أكثر قليلا من مليوني إلكترون فولت، وتنطلق جسيمات بيتا بسرعات عالية، ومن ثم يجب استخدام قوانين النظرية النسبية عند المعالجة النظرية لتفاعلاتها المختلفة مع المادة.

لجسيمات بيتا مدى أكبر كثيرًا من مدى جسيمات ألفا فهو يبلغ عدة مترات في الهواء عند الظروف القياسية من الضغط ودرجة الحرارة (واحد ضغط جوي ودرجة الصفر المئوي (273 كلفن)) غير أن قيمته تبلغ في الماء أو الأنسجة اللينة soft tissue عدة ملليمترات، مما يحد من استخدام جسيمات بيتا في التطبيقات الطبية بصفة عامة، وعلاج الأورام السرطانية بصفة خاصة فعليها أن تخترق أكثر من ملليمترات، لكي تصل إلى خلايا الورم tumor cells أو أن تتمكن من الاختراق إلى خارج الجسم ليمكن رصدها. يبقى أن نذكر أن المواد الخفيفة، مثل: الماء، والبلاستيك، والألمونيوم تستخدم كدروع للحماية من جسيمات بيتا فيكفي حاجز من الماء سمكه 1 cm أولوح من الألمونيوم سمكه 5mm لتوفير حماية كافية من أخطارها.

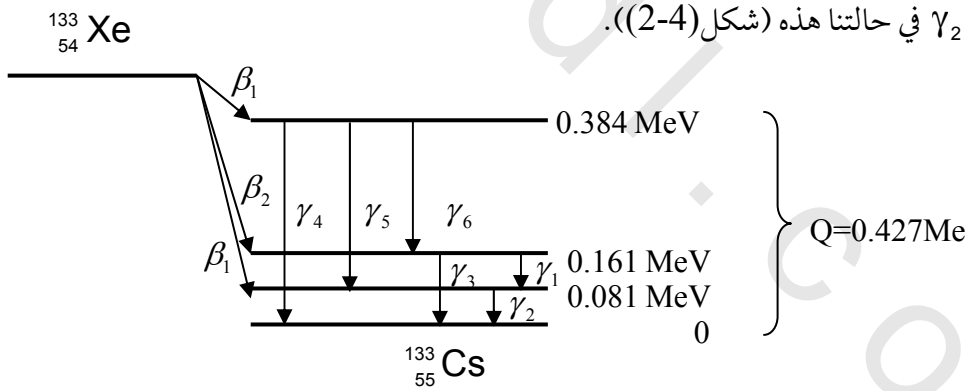
2-2 الاضمحلال عن طريق جسيمات بيتا السالبة وفوتونات جاما

Dcay by (β^-,γ)

في بعض الأحيان يؤدي الاضمحلال من خلال انبعاث جسيمات بيتا إلى ترك النواة المولودة في حالة استثارة أو في حالة شبه مستقرة، ولا تكون في حالتها الأرضية، حيث تكون الطاقة التي تنطلق بها جسيمات بيتا ومضاد النيوترينو لا تكفي لنقل النواة إلى حالتها المستقرة، وعلى ذلك تنتقل النواة من فورها إلى ترتيب (حالة) أكثر استقراراً بإطلاق فوتونات جاما، ويشار إلى هذا النمط من الاضمحلال باستخدام (β^-,γ)، ويعبر عنه باستخدام الرموز النووية المعروفة:

$$^{A}_{Z}X \xrightarrow{\beta-} {}^{A}_{Z+!}Y^{*} \xrightarrow{\gamma} {}^{A}_{Z+1}Y$$

من أمثلة الاضمحلال (β^-,γ)، اضمحلال النظير المشع ^{133}Xe حيث تنتقل نواته إلى إحدى ثلاث حالات مستثارة لنوة ^{133}Cs فتنطلق جسيمات بيتا بثلاث قيم قصوى (هي β_1,β_2,β_3 على مخطط الاضمحلال لهذا النظير – شكل (2-4)). النواة الابنة التي تولد تكون في حالة مستثارة، تضمحل إلى الحالة الأرضية أو إلى حالة مستثارة أخرى أقل طاقة من خلال انطلاق فوتونات جاما. إذا كان هذا الانتقال الأخير إلى حالة مستثارة أخرى فإن فوتونًا آخر ينطلق وصولا إلى حالة أكثر استقرارًا أو إلى الحالة الأرضية أي أنه في حالة الاضمحلال (β^-,γ) قد ينطلق أكثر من فوتون فعلى سبيل المثال تُتبع β_2 بانبعاث γ_1 و γ_2 في حالتنا هذه (شكل(2-4)).

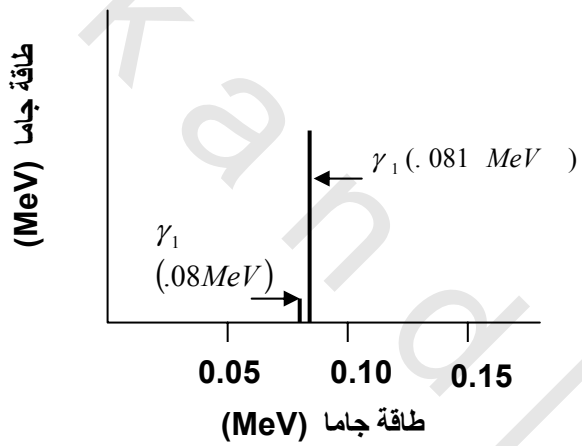


شكل(2-4). مخطط للاضمحلال (β^-,γ) للنظير ^{133}Xe

تتحدد نسبة الأنوية التي تضمحل إلى حالات مستثارة مختلفة في إطار احتمالي تختلف باختلاف النظير، ففي حالة النظير Xe^{133} تضمحل 98% من الأنوية إلى الحالة المستثارة 0.081Mev عن طريق β_3 ثم يُتبع ذلك بانبعاث γ بطاقة 0.081Mev.

من الأمثلة الأخرى التي تضمحل عن طريق (β^-,γ) اليود المشع I^{131} حيث تنطلق جسيمات بيتا بعدة قيم E_β^{max} متبوعة بفوتونات جاما وصولا إلى النظير المستقر Xe^{131}.

كما أسلفنا، تنبعث فوتونات جاما بطاقات ذات قيم محددة discrete، وليس بطيف متصل كما هو الحال بالنسبة لجسيمات بيتا. شكل (5-2) يمثل جزءًا من طيف الانبعاث (الخطي) لفوتونات جاما من النظير Xe^{133}، حيث يظهر الخطان اللذان يمثلان γ_1، و γ_2 اللذان يظهران في مخطط الاضمحلال (شكل(4-2)). لاحظ أن انبعاث γ_2 يتبع الاضمحلال β_3^- الذي يحدث بالنسبة الغالبة (98.3%)، وأن طيف جاما عبارة عن:



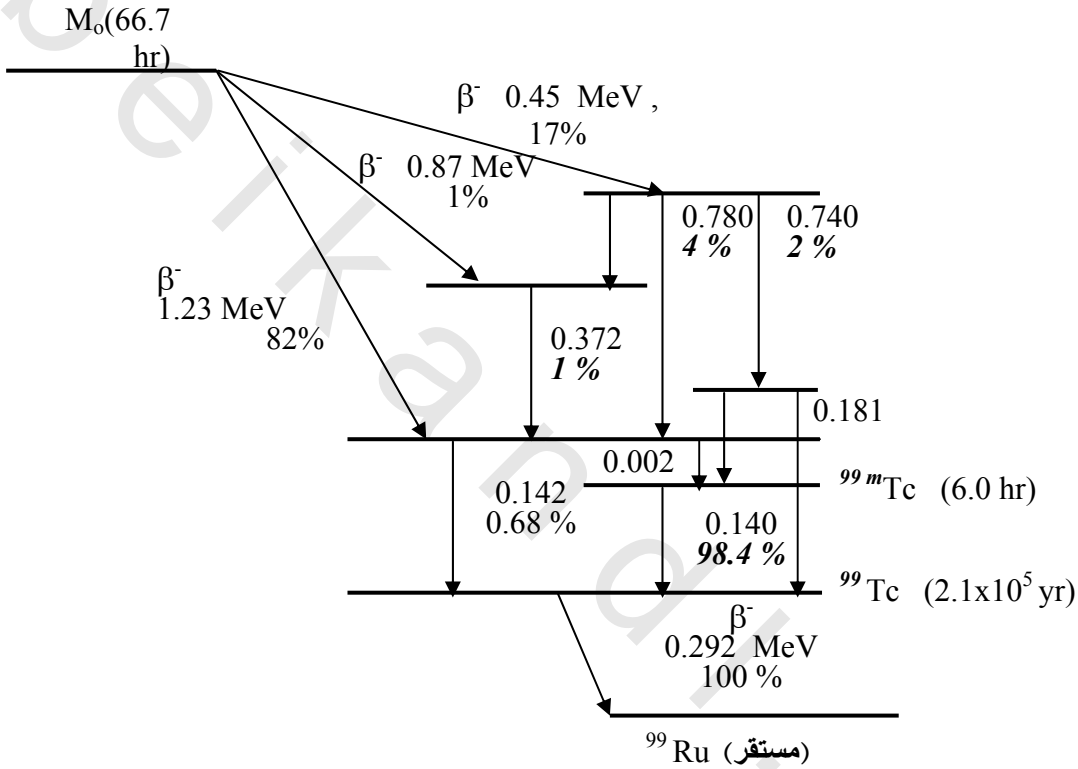
شكل (5-2) . طيف الانبعاث لفوتونات جاما التي تنطلق من النظير Xe^{133} بالطاقة 0.080 و0.081 Mev لا يظهر في الشكل الفوتونات التي تنطلق بطاقات أعلى. يجب الربط بين هذا الشكل والشكل السابق.

علاقة بين العدد النسبي للفوتونات المنبعثة (أي العدد النسبي للأنوية التي تضمحل عن طريق (β_3^-,γ_2)، ولهذا يظهر الخط الطيفي γ_2 في شكل (5-2) بهذا الطول.

openkandil.com

3-2 الاضمحلال الأيزوميري
Isomeric Decay

الحالات المستثارة ذات العمر النصفي الكبير long – lived (بعض الثواني أو حتى أيام) هي ما نعنيه بالحالات شبه المستقرة metastable states ويُشار إليها بوضع الحرف m بعد الرقم الكتلي. اضمحلال الحالة شبه المستقرة بانبعاث فوتونات جاما هو ما يُقصد به الانتقال الأيزوميري



شكل (6-2). المخطط الاضمحلالي للتكنيشيوم ^{99m}Tc – الانتقالات الأساسية

Isomeric transition؛ ذلك لأنه لدينا نفس قيم Z و A قبل وبعد حدوث الانتقال.

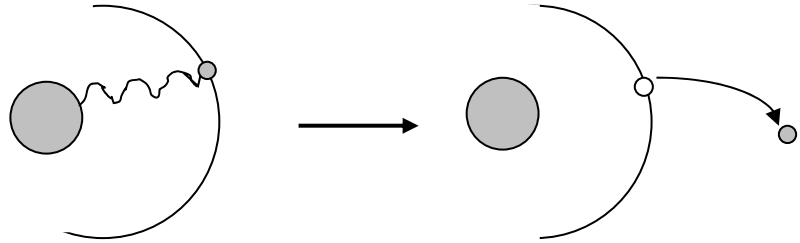
المثال الأكثر شيوعًا للاضمحلال الأيزوميري في مجال الطب النووي هو اضمحلال التكنيشيوم ^{99m}Tc، شكل(6-2) يوضح الانتقالات الأساسية في المخطط الاضمحلالي له، ^{99m}Tc decay scheme. تضمحل النواة الوالدة ^{99}Mo والتي

عمرهـا النـصفي 66.7hr عـن طريـق انبعـاث جـسيمات β^- بـثلاث قـيم للطاقـة القصوى E_β^{max}. 82% منها يضمحل إلى Tc^{99m} الذي لـه مـستوى الطاقـة 0.142 Mev والعمر النصفي 8.64hr. جزء يسير جدًّا (0.68%) يضمحل مباشرة إلى المستوى الأرضي Tc^{99} (لاحظ غياب الحرف m بعد الرقم الكتلي للنظير) ومن ثَم تنطلق فوتونات جاما بطاقة 0.142 Mev. الجزء الأعظم من الأنوية، 99.32% يـضمحل عـلى خطـوتين، الأولى الانتقال بين المستويين شبه المستقرين 0.142 و0.140 Mev لتنطلق فوتونات جامـا بطاقـةMev 2.0، ويـتم ذلـك بنـسبة ضـئيلة، 0.92%. الخطـوة الثانيـة، انتقـال أغلـب الأنوية، 98.40% من الحالة شبة المستقرة، (المستوى 0.140 Mev)، ذي العمـر النـصفي 6.0hr إلى الحالة الأرضية للتكنيشيوم Tc^{99} لتنطلق فوتونات جاما بطاقـة 140 Kev. حوالي 10% من هذه الفوتونات تُمتص بواسطة بعض الإلكترونات القريبة من النواة لتنطلق هذه الأخيرة تاركة الـذرة في عمليـة تُـسمى التحـول الـداخلي Internal Conversion (IC). أيضا، يظهر في طيـف التكنيـشيوم وجـود لـبعض فوتونـات أشـعة x وإلكترونـات Auger.

نظرًا لاختلاف السلوك الكيميائي لكل مـن التكنيـشيوم والمولبـدينيم molybdenum والطـول النـسبي للعمـر النـصفي للتكنيـشيوم، فإنـه يـسهل الحـصول عـلى التكنيـشيوم المشع Tc^{99m} ذي العمر النصفي 6.0hr والذي لا ينبعث منه جسيمات بيتا ويعطي نـسبة عالية من فوتونات جاما ذات الطاقة 140Kev. كل تلك المواصفات تجعل مـن Tc^{99m} نظيرا مثاليًّا للاستخدام في مجال الطب النووي.

4-2 التحول الداخلي
Internal Conversion (IC)

بدلا من أن تنطلق بعض فوتونات جاما عند اضمحلال بعض الأنوية مـن حالتهـا الـشبه مستقرة تُمتص بواسطة إلكترونات مدارية، وإذا كانت طاقة هذه الفوتونـات عاليـة انطلقـت هذه الإلكترونات تاركة الذرة. تُسمى هذه العملية بـالتحول الـداخلي والإلكـترون المنطلـق بإلكترون التحول conversion electron (شكل (7-2)).



شكل (7-2). تنتقل طاقة الفوتون إلى إلكترون مداري فينطلق تاركا الذرة.

عادة ما تكون الإلكترونات المنطلقة آتية من المدارات الداخلية القريبة من النواة (K أوL) والطاقة التي تزيد عن طاقة ربط الإلكترون تظهر كطاقة حركة للإلكترون المنطلق. المكان الشاغر الناتج عن انطلاق الإلكترون ما يلبث أن ينطلق إليه إلكترون آخر من المدارات الخارجية فينتج عن ذلك؛ إما انبعاث فوتون أشعة x ، أو إلكترون Auger.

الاضمحلال عن طريق التحول الداخلي يشبه الاضمحلال عن طريق β^-؛ ففي الحالتين يكون الجسيم المنطلق هو الإلكترون ولكن ثَمة اختلافان: أولهما أن مصدر الإلكترون المنطلق في حالة اضمحلال β^- هو «النواة» بينما في حالة التحول الداخلي، المصدر هو مدارات (المستويات الإلكترونية) الذرة والاختلاف الآخر أن إلكترونات بيتا تنطلق بطيف متصل بينما إلكترونات التحول الداخلي تنطلق بطاقة محددة تساوي طاقة الفوتون الممتص مطروحا منها طاقة الربط للإلكترون.

5-2 **قنص الإلكترون**

Electron Capture (EC)

بعض الأنوية تقوم بقنص إلكترون من الإلكترونات القريبة منها، حيث يتحد مع أحد بروتوناتها مكونًا نيوترون، وينطلق نتيجة هذه العملية نيوترينو حاملًا جزء من طاقة الانتقال:

$$p^+ + e^- \longrightarrow n + \nu + \text{طاقة}$$

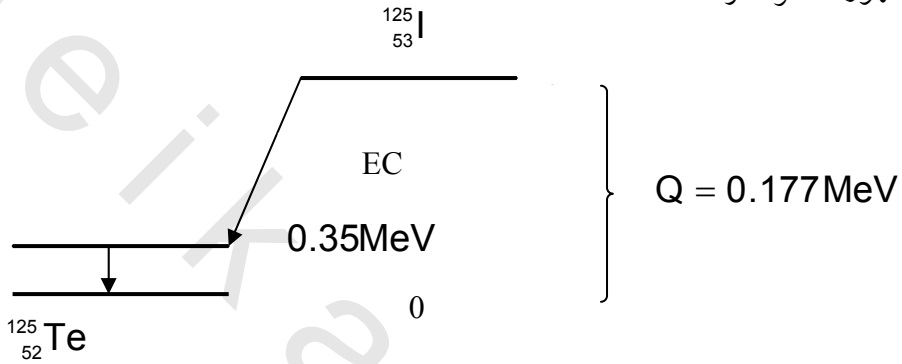
وهذه العملية تكاد تكون العملية العكسية لعملية الاضمحلال عن طريق انطلاق جسيمات β^-، وهي بالفعل تُسمى في بعض الأحيان باضمحلال β^- العكسي decay β^- inverse. جزء آخر من الطاقة يظهر على هيئة فوتونات أشعة x أوإلكترونات Auger، ذلك نتيجة انتقال إلكترون من مدار خارجي ليملأ الفراغ الذي تركه الإلكترون

الذي اقتنصته النواة؛ ونظرا لأن القنص يتم للإلكترونات الأقرب للنواة فإنه تُستخدم الرموز EC(K) أو EC(L) للتعبير عن ذلك.

يمكن التعبير عن عملية القنص:

$$ {}^{A}_{Z}X \xrightarrow{NC} {}^{A}_{Z-1}Y $$

ومن ثَم فهو اضمحلال أيزوباري isobaric decay، حيث تبقى A ثابتة وهو أيضًا يؤدي إلى تحول عنصري elemen transmulation، حيث تنقص Z بمقدار 1، ومن ثَم ظهور عنصر آخر.



شكل (8-2). المخطط الاضمحلالي (Ec,γ) للنظير I^{125}

كثيرًا ما تُترك النواة بعد عملية القنص في حالة مستثارة أو في حالة شبه مستقرة لا تلبث أن تضمحل بعدها النواة إلى الحالة الأرضية أو إلى حالة أكثر استقرارا بإطلاق فوتونات جاما (أو بتحول داخلي)، ويرمز للاضمحلال حينئذ باستخدام (EC,γ). من أمثلة هذه العملية اضمحلال I^{125} (شكل (8-2))، ذلك النظير المستخدم في الدراسات الخاصة بالغدة الدرقية thyroid. لاحظ أن المخطط الاضمحلالي في حالة قنص الإلكترون يتجه يسارا؛ ذلك لأن Z للنواة المولودة تنقص بمقدار 1. من النظائر التي تستخدم في مجال الطب النووي وتضمحل من خلال EC و (EC,γ) :

$$ {}^{125}I, {}^{123}I, {}^{111}In, {}^{67}Ga . $$

6-2 الاضمحلال عن طريق البوزوترونات (β^+)

positron β^+ Decay

في بعض الأنوية الغير مستقرة التي تكون النسبة n/p أقل من الواحد، أي أنوية غنية

بالبروتونات يتحول بروتون إلى نيوترون وإلكترون موجب الشحنة يُسمى بوزوترون positron، ويصاحب ذلك انطلاق جسيم أولي متعادل مهمل الكتلة هو النيوترينو Neutrino :

$$P^{+} \rightarrow n + e^{+} \; v \qquad (2-2)$$

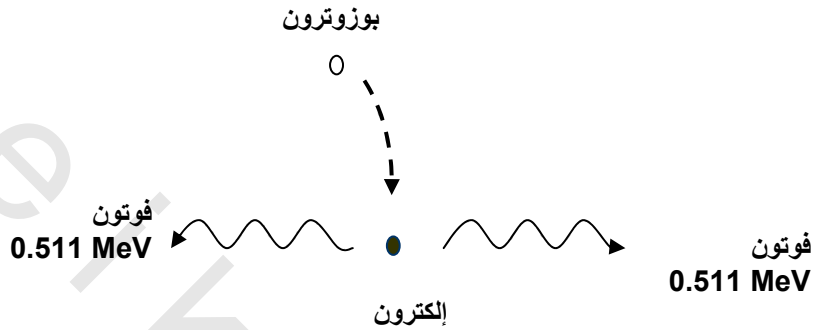
جدير بالذكر أن لكل من النيوترينو ومضاده عدد كمي مغزلي spin quantum number يساوي $\frac{1}{2}$، وأن أحدهما هو الجسيم المضاد للآخر، وذلك في إطار القاعدة التي تقرر أن لكل جسيم أولي elementary particle مضاد له antiparticle يشبهه في بعض الصفات، ويختلف معه في بعضها، كما في حالة الإلكترون والبوزوترون أيضا، فلهما نفس الكتلة ويختلفان في الشحنة حيث يحمل الأول شحنة سالبة، ويحمل الثاني شحنة موجبة.

بانطلاق البوزوترون من النواة تنقص طاقتها بمقدار يكافئ كتلته[1]، 0.511 Mev بالإضافة إلى طاقة الحركة التي ينطلق بها. بمجرد تركه للنواة يبدأ في فقد طاقة حركته نتيجة تصادماته مع ذرات الوسط حتى يتوقف بعد مسيرة عدة ملليمترات في أنسجة العضو البشري، ويحدث ذلك خلال نانو ثانية، 10^{-9} sec. وحينئذ يتحد البوزوترون مع أحد إلكترونات ذرات الوسط الذي يمر فيه في عملية تُسمى عملية الفناء annihilation reaction، حيث يفنى كل من الإلكترون والبوزوترون متحولة كتلتاهما إلى طاقة يحملها فوتونان ينطلقان آنيًّا في اتجاهين متضادين كل بطاقة 0.511Mev (شكل (9-2)). وهكذا ينتهي المطاف بالاضمحلال البوزوتروني إلى انطلاق هذين الفوتونين.

توزيع الطاقة في حالة الاضمحلال البوزوتروني يحتاج إلى بعض التفصيل. طاقة الانتقال Q تتوزع ما بين طاقة حركة للبوزوترون والنيوترينو بالإضافة إلى طاقة الفناء $(2\times 0.511 = 1.022MeV)$، وعلى هذا فلابد من توفر قيمة دنيا من طاقة الانتقال تساوي1.022 Mev حتى يحدث الاضمحلال البوزوتروني، وقيمة الطاقة التي تزيد عن

(1) ذلك طبقا للنظرية النسبية $E = m_e c^2 = 0.511 Mev$، حيث m_e هي كتلة الإلكترون (البوزوترون)، و c هي سرعة الضوء.

الحد الأدنى تذهب كطاقة حركة تتوزع بين البوزوترون والنيوترينو وعلى هذا يكون لدينا توزيعًا (طيفا) متصلا للانبعاث البوزوتروني، كما هو الحال في حالة الاضمحلال β^- وأيضا، لدينا قيمة متوسطة لطاقة الحركة للبوزوترون تساوي تقريبا ثلث الطاقة القصوى له، $\overline{E}_\beta \approx \frac{1}{3}E_\beta^{max}$ حيث E_β^{max} تساوي طاقة الانتقال Q مطروحًا منها 1.022 Mev.



شكل (9-2). التقاء فناء بين إلكترون β^- وبوزوترون e^+ وانطلاق فوتونان آنيًّا في اتجاهين متضادين كل بطاقة 0.511 MeV.

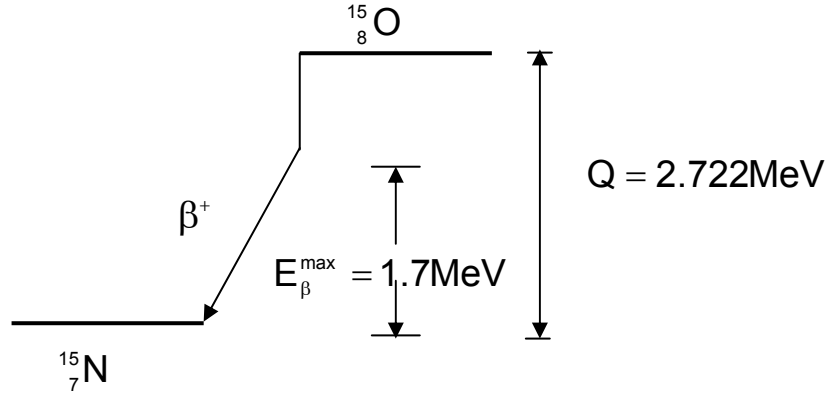
يمكن التعبير عن الاضمحلال البوزوتروني بالطريقة المتبعة في الفيزياء النووية:

$$^{A}_{Z}X \xrightarrow{\beta+} {}^{A}_{Z-1}Y$$

وعلى هذا فهو اضمحلال أيزوباري isobaric decay (A ثابتة) مع تحول عنصري element transmulation. شكل (10-2) يمثل المخطط الاضمحلالي للنظير O^{15} ذي الأهمية التطبيقية في مجال الطب النووي . الاضمحلال إلى اليسار؛ لأن Z تنقص بمقدار 1. الخط الرأسي يمثل طاقة فوتوني الفناء (1.022 Mev). الجزء الباقي من الطاقة (1.7 Mev)، (Q (2.722) – 1.022) يمثل E_β^{max}.

في بعض الأنوية المشعة، تُترك النواة بعد الاضمحلال البوزوتروني في حالة مستثارة ومن ثَم يُتبع الاضمحلال بانطلاق فوتون، وحينئذ يكون لدينا نمط الاضمحلال (β^+, γ).

obeikandl.com



شكل (2-10) .المخطط الاضمحلالي للنظير $^{15}_{8}O$ الذي يضمحل عن طريق β^+، $E_\beta^{max} = Q - 1.022Mev$.

للاضمحلال البوزوتروني أهمية في تطبيقات الطب النووي، فالحصول على فوتوني الفناء آنيًّا في اتجاهين محددين تماما (متضادين) يسمح برصدهما آنيًّا coincidence counting في عمليات التصوير النووي البوزوتروني PET، موضوع سيأتي الحديث عنه تفصيلا. من الأنوية الأخرى التي تضمحل بوزوترونيًّا ولها تطبيقات في مجال الطب النووي ^{13}N و ^{11}C.

7-2 الاضمحلال بانبعاث جسيمات ألفا والانشطار النووي

Decay by Alpha Emission and by Nuclear Fission

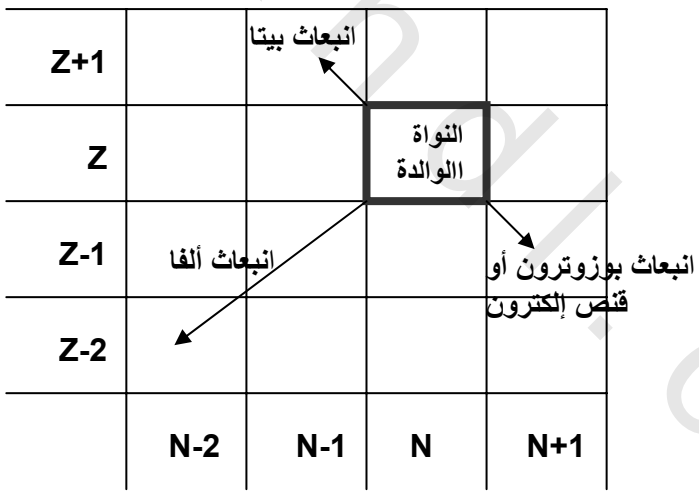
هذان النوعان من الاضمحلال ليس لهما أهمية عملية في مجال الطب النووي، وعلى هذا سنمر بهما عابرا استكمالًا لموضوع الاضمحلال النووي.

تنطلق جسيمات ألفا من بعض الأنوية الثقيلة ($Z>81$) بطاقة عالية (2-8 Mev) وهي عبارة عن نواة ذرة هيليوم $^{4}_{2}H$ أي تحتوي على اثنين من البروتونات واثنين من النيوترونات، وهي بذلك جسيمات موجبة الشحنة، ومن ثم يمكن التحكم في مسارها وسرعتها باستخدام مجال كهربي أو مغناطيسي وعلى هذا يمكن تعجيلها لإكسابها طاقة حركة عالية باستخدام المعجلات النووية accelerators، وتعتبر جسيمات ألفا من الجسيمات النووية الثقيلة.

عند انطلاق جسيم α من نواة ذرة ينقص العدد الذري لها بمقدار 2 وينقص العدد الكتلي بمقدار 4 ويمثل ذلك التفاعل النووي كالآتي:

$$^{A}_{Z}X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}Y + ^{4}_{2}He + Q$$

وبالرغم من كونها جسيمات ذات طاقة عالية، فإن مداها قصير جدا، فعلى سبيل المثال يبلغ هذا المدى 40 ميكرون في الأنسجة، ومن ثم فليس لها القدرة على اختراق الجلد؛ ولذلك ليست هناك ثمة مخاطر كبيرة من التعرض لجسيمات ألفا المنطلقة من مصادر خارج الجسم، لكن أكثر ما يميز جسيمات ألفا هو قدرتها الكبيرة على إحداث التأين؛ فالسرعة الصغيرة نسبيا التي تخترق بها النسيج تسمح بقضاء بعض الوقت قريبا من ذراته، وكذلك الشحنة الكبيرة التي تحملها تساعدان في إتمام عملية انتقال الطاقة بين جسيمات ألفا وذرات الوسط مما يؤدي إلى حدوث التأين، ولذلك تمثل المواد المشعة التي تنبعث منها جسيمات ألفا خطرا كبيرا إذا ما تمكنت من الوصول إلى داخل الجسم. الشكل (11-2) يجمل التغيرات التي تطرأ على قيم Z وN لأنماط الاضمحلال المختلفة.



شكل (11-2). تغير قيم Z وN لأنماط الاضمحلال المختلفة

3- العمر النصفي الفيزيائي والنشاط

Physical half-life time and Activity

بعد أن تعرضنا بشيء من التفصيل للأنماط المختلفة التي تضمحل (تتفكك)[1] بها الأنوية المشعة صار من الضروري تناول العلاقات الرياضية التي تفسر الجوانب الفيزيائية الخاصة بذلك.

من المعروف أن **معدل التفكك rate of decay** للأنوية المشعة والذي يُعرف بأنه: عدد مرات التفكك disintegration التي تتم في وحدة الزمن يقل بمرور الزمن، وأن ليست ثَمة وسيلة لتسريع عملية التفكك النووي أو إعاقتها أو إيقافها.

عملية التفكك، كما أسلفنا عملية تلقائية spontaneous ، بمعنى أنه لا يمكن على وجه الدقة تحديد اللحظة التي تبدأ فيها النواة الاضمحلال إلى نواة أخرى أكثر استقرارا أو إلى حالة أخرى أكثر استقرارًا. يتم إذن التعامل رياضيًّا مع ظاهرة تفكك الأنوية المشعة من منظور احتمالات، وعلى هذا يُفترض في هذه المعالجة الرياضية التعامل مع عدد كبير من الأنوية المشعة.

إذا كان لدينا عينة تحتوي على N من الأنوية المشعة المتماثلة (في الواقع ذرات أنويتها مشعة)، وبفرض أن فرصة تفكك أية نواة عند لحظة ما لا يتوقف على حالة الأنوية المشعة الأخرى ومستقل عنها تماما، وأن عملية التفكك تتم بين هذه الأنوية دون مفاضلة بينها فإن عدد الأنوية التي تتفكك في وحدة الزمن عند لحظة ما t يتوقف بالطبع على عدد الأنوية المشعة N المتاح لعملية التفكك عند هذه اللحظة، فإذا فرضنا مثلا أننا ضاعفنا عدد الأنوية الموجودة، فإننا نتوقع مضاعفة عدد الأنوية التي تتفكك في وحدة الزمن. والآن، بفرض تفكك جزءً من هذه الأنوية المشعة dN خلال الفترة الزمنية dt. يتوقف إذن متوسط معدل التفكك النووي $\frac{dN}{dt}$ على عدد الأنوية الموجودة N:

(1) لا بأس من استخدم كلمتي التفكك disintegration والاضمحلال decay كمترادفتين وإن كانت الأولى أقرب للاستخدام عند التعامل مع عدد كبير من الأنوية المشعة بينما الثانية أوقع عند الكلام عن نواة واحدة.

obeikandi.com

$$- \frac{dN}{dt} \propto N$$

والإشارة السالبة في العلاقة السابقة تعني أننا بصدد عملية تفكك، أي أن المعدل $\frac{dN}{dt}$ سالب، والذي يعني أن عدد الأنوية المشعة يتناقص مع الزمن.

التناسب الطردي بين كميتين، كما هو معلوم، يعني تزايد (أو تناقص) إحداهما بتزايد (أو تناقص) الأخرى، بحيث يكون خارج قسمتهما يساوي دائما مقدارا ثابتا، ثابت التناسب. في حالتنا هذه يُسمى هذا الثابت **ثابت الاضمحلال (التفكك)** λ decay (disintegration) constant

$$\therefore \; -\left(\frac{dN}{dt}\right) / N = \lambda \qquad (2-1)$$

وهذا الثابت له قيمة مميزة لنظير بعينه، وطبقًا لهذه المعادلة، فهو يمثل نسبة الأنوية المشعة التي تتفكك في وحدة الزمن، وعلى هذا تكون وحدته sec^{-1} وإذا ما قيل: أن $\lambda = 0.01\ sec^{-1}$ مثلا، فإن هذا يعني أنه في المتوسط، تتفكك 1٪ من الأنوية المشعة في الثانية.

بعض الأنوية يضمحل من خلال أكثر من نمط، فعلى سبيل المثال تضمحل 97% من أنوية النظير ^{18}F من خلال انبعاث β^-، وأن 3% يضمحل من خلال EC. لمثل هذا النوع من الاضمحلال المتشعب branching decay نَصف كل نمط بثابت اضمحلال $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, ...$، ويكون ثابت الاضمحلال الكلي $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + ...$

المعادلة (1-2) يمكن كتابتها أيضا على صورة الفروق difference:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \qquad (2-2)$$

الكمية $\frac{\Delta N}{\Delta t}$، متوسط معدل الاضمحلال the average decay rate، تُسمى أيضا **النشاط (الشدة) الإشعاعي activity** لعينة ما، وهي الفعل قياس لمدى النشاط الإشعاعي للعينة، وتقاس بعدد التفككات في الثاني disintegration per second (dps).

obeikandi.com

الوحدة العملية الأساسية للنشاط الإشعاعي هي الكوري curie (Ci) وهو يساوي[1] 3.7×10^{10} dps **وكمية النشاط المستخدمة عادة في مجال الطب النووي تكون في المدى من الملي كوري** (10^{-3} Ci) **إلى الميكرو كوري** (10^{-6} Ci)، و تُستخدم المشتقات الأكبر للكوري في ظروف خاصة، ذلك عند الحاجة إلى الاستخدام على مدى زمني أطول long term suplies، كما في حالة استخدام مصدر خارجي للعلاج external beam radiation source، ومثالًا لذلك عند استخدام أجهزة العلاج بالكوبلت therapy ^{60}Co units، حيث تُستخدم كميات تقاس بالكيلو كوري (10^{3} Ci). من ناحية أخرى، أقل الجرعات التي يمكن رصدها بأكثر النظم المستخدمة في مجال الطب النووي حساسية تصل إلى مستوى النانو كوري ($1\,nCi = 10^{-9}$ Ci).

بالرغم من أنه ما زال استخدام الكوري شائعا كوحدة للنشاط الإشعاعي توصي الأوساط العلمية باستخدام الوحدات العالمية SI units[2]، وهي مقلوب الثانية، sec^{-1} أي تفكك واحد لكل ثانية dps، ولقد أُعطيت هذه الوحدة المسمى بيكريل becquerel، ويُرمز لها بالرمز Bq أي أن 1 Bq = 1 dps، وعلى هذا يكون $1\,Ci = 3.7\times10^{10}\,Bq$.

من تعريف الشدة الإشعاعية A يمكن إعادة صياغة التعبير (2-2) ليكتب بوحدات النشاط:

$$A(Ci) = \lambda\ \ N/(3.7\times10^{10}) \qquad (2-3)$$

لاحظ أننا قسمنا على الرقم (3.7×10^{10}) لنصير الوحدات بالكوري.

يمكن فصل متغيرات المعادلة (2-1) لتكتب على الصورة:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda\ \ dt$$

---

(1) عُرف الكوري في البداية بأنه نشاط جرام واحد من Ra^{226}، ولكن قيمة ذلك تتغير قليلًا بمرور الوقت عند توفر طرق أدق لقياس معدل اضمحلال Ra^{226}؛ ولذلك استُبدل هذا التعريف بالقيمة الثابتة $3.7\times10^{10}\,dps$. على كل حال، هذه القيمة الأخيرة ليست بعيدة عن القيمة المسجلة حديثًا لمعدل اضمحلال واحد جرام من Ra^{226}، وهي: $3.656\times10^{10}\,dps$.

(2) اختصار System International.

obeikandl.com

وبتكامل هذه المعادلة مع الفرض بأنه عند $t = 0$ (والتي تعني بداية القياس، أو الملاحظة) كان عدد الأنوية المشعة المتاح لعملية التفكك N_0 ، نحصل على:

$$N(t) = N_0 \quad e^{-\lambda t} \qquad (2-4)$$

وهذا هو التعبير الرياضي الرئيس في وصف عمليات التفكك الإشعاعي. $N(t)$ تمثل عدد الأنوية المتبقية دون تفكك عند الزمن t وهي تساوي N_0 مضروبة في المعامل الأسي $e^{-\lambda t}$ (1) والذي يعبر عن نسبة الأنوية الغير مفككة عند الزمن t ($\frac{N(t)}{N_0} = e^{-\lambda t}$).

هذا المعامل يُسمى **معامل الاضمحلال** decay factor.

كما يمكن التعبير عن صيغة الاضمحلال (4-2) باستخدام الشدة الإشعاعية A، فبتفاضل هذه العلاقة وباستخدام تعريف الشدة الإشعاعية نحصل على:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N \qquad (2-5)$$

وهذه المعادلة الأخيرة يمكن كتابتها على الصورة:

$$A(t) = A(0)e^{-\lambda t} \qquad (2-6)$$

بمرور الزمن إذن يتناقص عدد الأنوية المشعة N في العينة (المعادلة (4-2)) وكذلك النشاط الإشعاعي أيضا (المعادلة (6-2)).

الشكل (11-2) يمثل عملية الاضمحلال الإشعاعي كدالة في الزمن ولإلقاء مزيد من الضوء على سلوك هذه الدالة، نفرض أننا بدأنا بعينة تحتوي على ألف نواة مشعة، أي أن $N(0) = 1000$ وأن ثابت الاضمحلال لهذه المادة المشعة $\lambda = 0.1 \ \sec^{-1}$، فإنه طبقًا للمعادلة (2-2) يكون متوسط عدد الأنوية المضمحلة خلال الثانية الأولى مساويًا $\lambda \ N = 0.1 \times 1000 = 100$، ويكون النشاط حينئذ $100 \, dps$ (المعادلة (5-2))، ويصير عدد الأنوية المتبقي دون اضمحلال 900، وخلال الثانية يكون النشاط $0.1 \times 900 = 90 dps$ وبعد ثانيتين تبقى 810 نواة دون اضمحلال وهكذا. والتعبيران (4-2) و(6-2) يقرران أنه أثناء عملية الاضمحلال يتناقص عدد الأنوية المشعة،

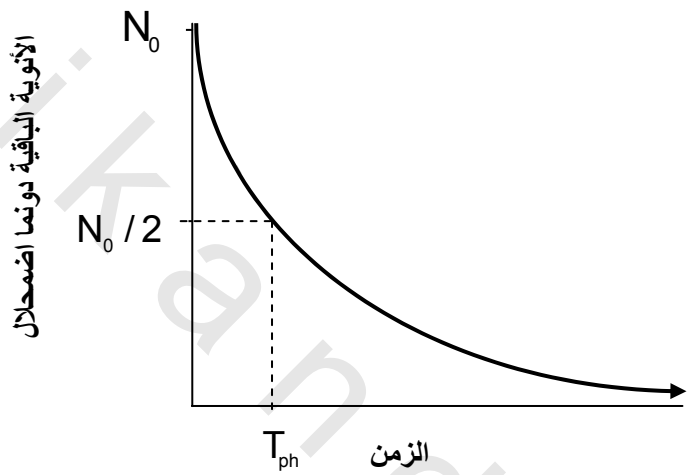
---

(1) e هي أساس اللوغريتمات الطبيعية، ....e=2.718.

obeikandl.com

وكذلك الشدة الإشعاعية أسيًّا، أي توصف عملية الاضمحلال رياضيًّا باستخدام الدالة الأسية، تلك الموضحة في الشكل (12-2).

يجب أن نعيد التأكيد أنه في المعالجات الرياضية السابقة نتعامل مع عدد كبير من الأنوية المشعة، حيث نتحدث عن عينة من مادة مشعة، ولا نعني نواة واحدة، فإن كل نواة مشعة (غير مستقرة) على حدة لابد وأن تتخلص من طاقة الاستثارة عند لحظة ما، بينما يقترب المنحنى الأسي الذي يمثل عدد الأنوية المتبقية دون تفكك أو النشاط (شكل (12-2)) من محور:



شكل (12-2). اضمحلال الأنوية المشعة

الزمن (المحور الأفقي في الشكل) بعد أمد طويل ويلتقيه في ما لا نهاية (∞)، وباختصار تتم المعالجة الرياضية السابقة في إطار إحصائي.

يتضح من شكل (12-2) أن الفترة التي يستغرقها عدد من الأنوية المشعة كي يصل إلى نصفه ثابتة، فإن الفترة الزمنية اللازمة لتفكك 50 نواة من أصل 100 هي نفسها الفترة اللازمة لتفكك 25 نواة من أصل 50 وهكذا. يُشار للفترة الزمنية التي يستغرقها تفكك نصف الأنوية (أو الفترة اللازمة للاضمحلال إلى نصف الشدة الإشعاعية الابتدائية) **بالعمر النصفي الفيزيائي** physical half-life time ونشير إليه بالرمز T_{ph}، ويمكن وصفه

رياضيًّا باستخدام التعبير (2-4) (أو التعبير (2-6))، حيث، $\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t}$، وأن T_{ph} هو الزمن اللازم لجعل $N = \frac{1}{2}N_0$ ، إذن:

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

$$\therefore \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{ph}}$$

وبأخذ اللوغريتمات لطرفي هذه المعادلة:

$$\therefore \quad \ln \frac{1}{2} = -\lambda \ T_{ph}$$

وبالتالي:

$$T_{ph} = 0.693 / \lambda \qquad (2-7)$$

وهذه العلاقة تقرر أن العمر النصفي T_{ph} يتناسب عكسيًّا مع ثابت الاضمحلال λ. للنظائر المختلفة، تتراوح قيمة العمر النصفي من الجزء من الألف من الثانية إلى ملايين السنين، ويتم قياسه عمليًّا بقياس الفترة الزمنية اللازمة لخفض النشاط (شدة الإشعاعات radiation intensity) المنبعث من المصدر المشع إلى النصف، ويتم ذلك برسم معدل العد count rate مستخدمين كشافًا إشعاعيًّا radiation detecor مناسب.

بالتعويض من المعادلة (2-7) في المعادلة (2-4):

$$\frac{N}{N_0} = e^{-0.693 \ t / T_{ph}} \qquad (2-8)$$

وعلى هذا يمكن حساب نسبة ما تبقى من الأنوية دون تفكك (أو النشاط الإشعاعي النسبي $\frac{A}{A_0}$) بعد زمن يساوي مضاعفات (أو كسور) العمر النصفي الفيزيائي، فعلى سبيل

obeikandl.com

المثال بعد ضعف العمر النصفي الفيزيائي ($t = 2T_{ph}$) يبقى 25% من الأنوية دون تفكك، وبصفة عامة تكون نسبة ما تبقى من أنوية دون تفكك (أو النشاط النسبي) بعد n من العمر النصفي ($n = \frac{t}{T_{ph}}$) هي:

$$\frac{A}{A_0} = (\frac{1}{2})^n \qquad (2-9)$$

نظرًا للأهمية التطبيقية للكميات الفيزيائية التي تناولناها نسوق العديد من الأمثلة الحسابية التوضيحية:

مثال 2-1:

إذا كان النشاط الإشعاعي لعينة من النظير I^{131} الآن هو 10mCi فكم يكون بعد 50 ساعة إذا كان العمر النصفي الفيزيائي للنظير 8.1 ساعة.

الحل:

من $A = A_0 e^{-\lambda t}$، ومن المعادلة (2-7) نحصل على $A = A_0 e^{-0.693\, t / T_{ph}}$ وبالتعويض عن $t = 50hr$ و $T_{ph} = 8.1 \times 24 = 194.4hr$ نحصل على:

$$A = 10.0 \times e^{-0.1782} = 8.368 \ mCi$$

مثال 2-2:

إذا كان العمر النصفي الفيزيائي للنظير Tc^{99m} هو ست ساعات. أحسب ثابت الاضمحلال لهذا النظير.

الحل:

$$\lambda = 0.693 / T_{ph} = 0.1155 \ \ hr^{-1}$$

مثال 2-3:

ما هو الزمن اللازم لخفض النشاط الإشعاعي للنظير Tc^{99m} إلى واحد في المائة من قيمته، علما بأن العمر النصفي له ست ساعات.

obeikandl.com

الحل:

$$\frac{A}{A_0} = e^{-0.693\ t / T_{ph}}$$

$$\therefore\ 0.01 = e^{-0.1155\ t}$$

$$\therefore\ \ln 0.01 = -0.1155\ t$$

$$\therefore\ t = -\frac{\ln 0.01}{0.1155} = 39.87\ hr$$

مثال 2-4:

إذا كان النشاط لعينة من ^{99m}Tc، الآن هو $40mCi$ الآن فكم يكون بعد أربع وعشرين ساعة ؟ إذا كان العمر النصفي لهذا النظير ست ساعات.

الحل:

باستخدام العلاقة (2-9):

$$\frac{A}{A_0} = (\frac{1}{2})^n$$

بعد 24 ساعة تكون: $n = 4$

$$\therefore A = 40 \times (\frac{1}{2})^4 = 40 \times 0.0625 = 2.5mCi$$

مثال 2-5 :

عبوة تحتوي على ^{99m}Tc مسجل عليها تركيزا للجرعة يساوي $2mCi/mL$ عند الساعة الثامنة صباحًا، ما هو الحجم الذي يمكن سحبه من هذه العبوة عند الساعة الرابعة من نفس اليوم لحقن مريض بجرعة مقدارها $1.5mCi$ علما بأن العمر النصفي الفيزيائي لهذا النظير هوست ساعات.

الحل:

$$\frac{A}{A_0} = e^{-0.693\ t / T_{ph}}$$

obeikandl.com

عند الرابعة مساءً تكون $t = 8hr$ وبالتالي يكون:

$\frac{A}{A_0} = e^{-0.693\times 8/6} = 0.397$ ، وتلك أيضا هي النسبة بين التركيز عند الساعة الثامنة صباحًا، والتركيز عند الرابعة مساءً، وعلى هذا يكون التركيز عند الرابعة مساءً مساويًا $2.0\times 0.397 = 0.794mCi/mL$، ونظرًا لأن التركيز يساوي خارج قسمة الجرعة على الحجم، وأن الجرعة المطلوب حقنها للمريض عند الرابعة هي $1.5mCi$. إذن الحجم المطلوب سحبه من العبوة وحقنه للمريض في الرابعة مساءً هو: $1.5/0.794 = 1.89mL$.

مثال 2-6:

عبوة تحتوي على ^{99m}Tc مسجل عليها الجرعة $3mCi$ عند الساعة الثالثة مساءً. كم كانت هذه الجرعة عند الثامنة من صباح ذات اليوم علما بأن $T_{ph} = 6hr$.

الحل:

في بعض الأحيان تُرسل العبوات الإشعاعية وهي معايرة سلفا لزمن في المستقبل ولتحديد شدتها الإشعاعية عند اللحظة الحالية يُحسب معامل الاضمحلال عند زمن قيمته (سالبة)؛ ففي المثال الحالي يُراد حساب الشدة الإشعاعية عند زمن سابق:

عند الثامنة من صباح ذات اليوم تكون $t = -7hr$ يكون:

$\therefore \frac{A}{A_0} = e^{+0.693\times 7/6} = 2.245$ ، ولذلك كان النشاط عند الثامنة من صباح ذات اليوم $3.0\times 2.245 = 6.735mCi$.

مثال 2-7:

عينة من ^{113m}In كتلتها $1\ \mu g$ والعمر النصفي الفيزيائي لها 1.7 ساعة احسب:

- عدد الذرات في هذه العينة.
- عدد الذرات بعد مرور أربع ساعات، وما هو نشاطها حينئذ، وكذلك نشاطها النوعي؟

obeikandl.com

الحل:

- عـــدد الـــذرات (الجزيئـــات) الموجـــودة في واحـــد مـــول يـــساوي عـــدد أفوجادرو 6.02×10^{23} وواحد مول من In تحتوي على g 113.

إذن عدد الذرات الموجود في μg 1 يساوي:

$$\frac{6.02\times10^{23}}{113}\times10^{-6}=5.3\times10^{15}$$

- لإيجاد عدد ذرات ^{113m}In بعد مرور أربع ساعات. من المعادلة (8-2) :

$$\therefore N=N_0e^{-0.693t/T_{ph}}=N_0e^{-0.693\times4/1.7}=1.05\times10^{15}$$

النشاط = λN، $\lambda=0.692/T_{ph}$

إذن النشاط بعد أربع ساعات:

$$\frac{0.693\times1.05\times10^{15}}{1.7\times3600}=1.2\times10^{11}\,dps=\frac{1.2\times10^{11}}{3.7\times10^{10}}=3.2Ci$$

النشاط النوعي: $3.2Ci/1\mu g=3.2\ \ Ci/\mu g$

4- العمر المتوسط

Average Lifetime

لا نستطيع أن نعرف متى تضمحل نواة ما منفردة على وجه اليقين، بعض الأنوية يضمحل حالًا، والبعض الآخر قد يمكث طويلًا دون اضمحلال (الشكل 12-2))، ومن هنا جاءت أهمية حساب القيمة المتوسطة للعمر النصفي τ ، وهي كمية محددة ومميزة للمادة المشعة، ومرتبطة بثابت الاضمحلال لها:

عند نهاية فترة زمنية ما t يتبقى لدينا N من الأنوية لم يضمحل بعد وفي الفترة الزمنية التالية dt يضمحل جزء dN من الأنوية المتبقية، ويتم حساب القيمة المتوسطة باستخدام المفهوم العام للمتوسط:

obeikandl.com

تجميع (تكامل) حواصل ضرب dN والزمن الذي تضمحل خلاله، ثم نقسم على العدد الكلي للأنوية، أي:

$$\tau = \frac{\int_0^{N_0} t \quad dN}{N_0} \qquad (2-10)$$

بتفاضل المعادلة (2-4):

$$dN = -\lambda \quad N_0 e^{-\lambda t} dt$$

وبالتعويض في (2-10):

$$\tau = \frac{-\lambda N_0 \int_{\infty}^{0} te^{-\lambda t} dt}{N_0}$$

لاحظ حدود التكامل، فعندما $t = 0$ تكون $N = N_0$، وعندما $t = \infty$ تكون $N = 0$، أي اضمحلت جميع الأنوية. والعلاقة السابقة إذن:

$$\tau = \lambda \int_0^{\infty} te^{-\lambda t} dt = 1/\lambda$$

$$\therefore \tau = 1/\lambda \qquad (2-11)$$

أي أن العمر المتوسط يساوي مقلوب ثابت الاضمحلال، وبمقارنة العلاقتين (2-7) و(2-11) يمكن الربط بين العمر النصفي والعمر المتوسط.

$$\frac{\tau}{T_{ph}} = 1/0.693 = 1.443 \qquad (2-12)$$

أي أن العمر المتوسط للأنوية المشعة أكبر قليلا من عمرها النصفي؛ ذلك لأن نصف الأنوية يضمحل خلال العمر النصفي الفيزيائي T_{ph} والنصف الآخر يعيش أطول (إحصائيًّا طبقًا للمعالجة الرياضية السابقة والتي يلخصها الشكل (2-12)).

من الضروري أن نذكر أن أهمية العمر المتوسط لا تقتصر على المفهوم النظري الإحصائي ولكن تتعدى ذلك إلى الجانب التطبيقي حيث يُستخدم لحساب مقدار الجرعة الإشعاعية المناسبة، أي يستخدم في المعايرة الإشعاعية radiation dosimetry.

obeikandi.com

5- النشاط النوعي

Specific Activity

قد تتواجد المادة المشعة مع كمية أخرى من الأنوية المستقرة لنفس النظير في نفس العينة، فعلى سبيل المثال قد يحتوي اليود المشع I^{131} على قدر من اليود المستقر I^{127}. يعتمد ذلك على طريقة تحضير المادة المشعة، وقد يكون ذلك ضرورة ليتحقق توازن كيميائي. هذا النظير المستقر المتواجد في العينة يُسمى **الحامل** carrier ويُشار للعينة بأنها عينة بحامل with carrier أما إذا غاب النظير المستقر وكانت العينة خالصة مشعة يُقال: بأن العينة **حرة** carrier free.

يُعرف **النشاط النوعي** specific activity على أنه النشاط لوحدة الكتل من العنصر، وغالبا ما تأخذ الوحدات Ci/g (أو مشتقاته، مثل $\mu Ci/g$) وطبقًا لهذا التعريف تكون أعلى قيمة ممكنة للنشاط النوعي لنظير ما هي التي تختص بالعينات الخالية من الحوامل، أي: العينات الحرة carrier- free specific activity (CFSA).

يمكن حساب النشاط النوعي للعينات الحرة CFSA بطريقة مباشرة:

إذا كان لدينا مثلا عينة حرة عبارة عن واحد جرام من النظير المشع ^{A}X، وأن العمر النصفي لهذا النظير هو $T_{ph}\,(sec)$. الوزن الذري للنظير يساوي تقريبًا العدد الكتلي A. من المعروف أن عينة ما كتلتها A من الجرامات تحتوي على عدد من الذرات يساوي عدد أفوجادرو (1)، 6.023×10^{23} ذرة وعلى هذا تحتوي العينة التي كتلتها واحد جرام على $6.023\times10^{23}\times(\frac{1}{A})$ من الذرات. وبما أن معدل الاضمحلال:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t}(dps)=\lambda N=0.693\ N/T_{ph}$$

(1) عدد أفوجادرو: هو عدد الذرات (أو الجزيئات) الموجودة في واحد مول، وأن المول الجرامي يساوي عدديًا الوزن الذري (الجزيئي) بالجرامات، وهو ثابت فيزيائي يساوي 6.023×10^{23}.

obeikandl.com

فإن النشاط لهذه العينة الحرة التي هي واحد جرام من المادة المشعة (وبالتالي فهو النشاط النوعي) تساوي إذن:

$$CFSA\,(Ci/g) = (0.693\times 6.023\times 10^{23})/(A\times T_{ph}\times 3.7\times 10^{10})$$

$$\therefore CFSA\,(Ci/g) \approx 1.3\times 10^{8}/(AT_{ph}) \qquad (2-13)$$

مثال 2-7:

عينة من ^{113m}In كتلتها $1\ \mu g$ والعمر النصفي الفيزيائي لها 1.7 ساعة احسب:

- عدد الذرات في هذه العينة الآن.

- عدد الذرات بعد مرور أربع ساعات، وما هو نشاطها حينئذ وكذلك نشاطها النوعي ؟

الحل:

- عدد الذرات (الجزيئات) الموجودة في واحد مول يساوي عدد أفوجادرو 6.02×10^{23} وواحد مول من In تحتوي على $113\,g$

إذن عدد الذرات الموجود في $1\ \mu g$ يساوي:

$$\frac{6.02\times 10^{23}}{113}\times 10^{-6} = 5.3\times 10^{15}$$

- لإيجاد عدد ذرات ^{113m}In بعد مرور أربع ساعتين المعادلة (2-8) :

$$\therefore N = N_0 e^{-0.693t/T_{ph}} = N_0 e^{-0.693\times 4/1.7} = 1.05\times 10^{15}$$

النشاط = λN، $\lambda = 0.692/T_{ph}$

إذن النشاط بعد أربع ساعات:

$$\frac{0.693\times 1.05\times 10^{15}}{1.7\times 3600} = 1.2\times 10^{11}\,dps = \frac{1.2\times 10^{11}}{3.7\times 10^{10}} = 3.2Ci$$

النشاط النوعي: $3.2Ci/1\mu g = 3.2\ \ Ci/\mu g$

مثال 2-8:

ما هو النشاط النوعي لعينة حرة carrier- free specific activity من النظيرين ^{131}I و ^{99m}Tc .

obeikandl.com

الحل:

بالنسبة للنظير ^{131}I، الرقم الكتلي $A = 131$ والعمر النصفي الفيزيائي يساوي ثمانية أيام:

$$\therefore CFSA(^{131}I) = (1.3\times10^{8})/(131\times8) \quad = 1.24\times10^{5}\ Ci/g$$

بالنسبة للنظير ^{99m}Tc، الرقم الكتلي $A = 99$، والعمر النصفي الفيزيائي يساوي ستة ساعات، أي 0.25 يومًا

$$\therefore CFSA(99mTc) = (1.3\times10^{8})/(99\times0.25) \quad = 5.3\times10^{6}\ Ci/g$$

النظائر المشعة ذات الأعمار النصفية التي تقاس بالأيام والأسابيع نشاط نوعي عال، وأغلب النظائر المستخدمة في مجال الطب النووي هي من هذا النوع، وتلك تُعتبر ميزة في كثير من الأحيان، فهذا يعني تناول المريض لجرعة صغيرة من النظير تفي لتحقيق الغرض الطبي دون حدوث تأثيرات دوائية جانبية pharmacologic response قد يكون غير مرغوب فيها، فعلى سبيل المثال كبسولة تحتوي على $10\mu Ci(=10^{-5}\ Ci)$ من النظير ^{131}I الحر (بدون حامل) تحتوي فقط على $10^{-10}g$ من اليود (الكتلة = النشاط الإشعاعي/ النشاط النوعي) وتلك الكمية أقل كثيرًا مما قد يسببه اليود من تأثير غير مرغوب فيه كعنصر كيميائي iodine reaction، وبهذا المفهوم يمكن حتى استخدام النظائر ذات التأثير السمي العالي highly toxic، مثل الزرنيخ arsenic بطريقة آمنة.

في بعض الأحيان لا يمكن الحصول على النظير المطلوب بصورة حرة كما في حالة ^{99m}Tc الذي لا يمكن فصله عن النظير المولود المعمر ^{99}Tc (راجع مخطط الاضمحلال للنظير ^{99m}Tc – شكل (6-2)). لكن في أغلب التحضيرات تكون كمية التكنيشيوم المستخدم صغيرة بالقدر الذي لا تحدث معه أثر فسيولوجي physiological impact.

بالرغم مما تتمتع به النظائر الحرة من ميزات سبق ذكر بعضها، فإنه في بعض الأحيان يكون وجود الحامل جزء أساسي في الدراسة نفسها، كما في حالة استخدام المواد المشعة في عمليات الترقيم labeling، حيث يتم ربط ذرات نظير مشع ببعض الجزيئات المراد تتبعها أو دراسة سلوكها، وذلك برصد الإشعاعات الصادرة من هذه الذرات المشعة. لن نتطرق هنا لكيفية حساب الشدة الإشعاعية النوعية للنظائر غير الحرة non – carrier free.

6 - اضمحلال خليط غير مرتبط
Decay of a Mixture of Unrelated Species

تناولت المعالجات التي تمت حتى الآن عينة مشعة من نظير واحد. عندما تحتوي العينة على خليط من نظائر غير مرتبطة، أي أن الخليط ليس مبنى على علاقة والـدة ومولـودة parent-daughter relationship، وإنما خليط من أنوية مشعة مستقلة، تكون الشدة الإشـعاعية الكلية A_t (أي للخليط) عبارة عن مجموع الشدة لكل نظير على حدة:

$$A_t(t) = A_1(0)e^{-0.693\,t/T_{1/2}} + A_2(0)e^{-0.693\,t/T_{2/2}} + \ldots\ldots \qquad (2-14)$$

حيث $A_1(0)$ الشدة الإشعاعية الابتدائية للنظير الأول وأن T_{1ph} هو العمر النصفي له وأن $A_2(0)$ هي الشدة الإشعاعية الابتدائية للنظير الثاني وهكذا.

7- اضمحلال خليط مرتبط
Parents-Daughter Decay

إذا كانت العينة عبارة عن خليط من نظائر مشعة وهذا الخليط هو نتاج اضمحلال متسلسل، بمعنى أن تضمحل أنوية نظير مشع ليتولد نظير آخر وقد يكون هذا الآخر في حالة مستثارة فيضمحل مولدًا نظيرًا ثالثًا، وهكذا وصولا إلى حالة الاستقرار. تُسمى أنوية النظير الأول (الابتدائي) بالوالدات parents وأنوية النظير الثاني بالأنوية المولودة daughters، وأنوية الجيل الثالث بالأحفاد grand-daughters وهكذا. لتبسيط المعالجة الرياضية سنعتبر فقط وجود الجيلين الأولين.

المعادلة التي تعبر عن الشدة الإشعاعية للوالدات هي ببساطة المعادلة (6-2) وعلى هذا تكون المعادلة التفاضلية التي تصف معدل اضمحلال الأنوية الوالدة:

$$\frac{dN_p}{dt} = -\lambda_p N_p \qquad (2-15)$$

التذييل p يشير إلى كلمة parents.

المعادلة التفاضلية التي تصف اضمحلال الأنوية المولودة:

$$\frac{dN_d}{dt} = -\lambda_d N_d + \lambda_p N_p \qquad (2-16)$$

obeikandl.com

حيث d تشير إلى كلمة daughter. الطرف الأيمن للمعدلة السابقة يتكون من حدين؛ الأول: يمثل اضمحلال الأنوية المولودة، والثاني: يمثل تكونها نتيجة اضمحلال الوالدات، أي أن هناك حد عبارة عن اضمحلال وآخر يمثل نمو أو بناء buildu وهذا قد يؤدي بدوره إلى نوع من الاتزان المؤقت transient equilibrium، متوقفا ذلك على القيم النسبية للعمر النصفي لكل من الأنوية الوالدة والأنوية المولودة، ويتضح ذلك من فحص المعادلة التي تمثل الشدة الإشعاعية للأنوية المولودة $A_d(t)$، والتي يمكن الحصول عليها بحل المعادلة التفاضلية (16-2).

8 - العمر النصفي البيولوجي (الحيوي)
Biologic Half-Life

العمر النصفي البيولوجي (الحيوي) T_B هو الفترة الزمنية اللازمة لكي يتخلص الجسم بالطرق الطبيعية (تبول – تبرز – عرق – زفير) من نصف الجرعة التي تم تناولها. ولا يتوقف هذا الزمن على كون النظير مشعًّا أو مستقرًّا، ويُعتبر العمر النصفي البيولوجي عاملا أساسيًّا يجب أخذه في الحسبان عند تقدير الجرعة الداخلية (التي تدخل جسم الإنسان) للأغراض التشخيصية أو العلاجية، وعند تقدير الخطر الناجم عن تواجدها داخل الجسم. سنعود لمعالجة أكثر تفصيلا لمسألة العمر النصفي البيولوجي لاحقًا.

9- العمر النصفي الفعال
Effective Half-Life

نظرًا لأهمية كل من العمر النصفي الفيزيائي والعمر النصفي الحيوي في تقدير الجرعة الممتصة بواسطة وحدة الكتل من النسيج عند حساب الجرعة الداخلية، كان من الضروري الجمع بينهما في كمية فيزيائية بيولوجية واحدة، العمر النصفي الفعال T_e والذي يُعرف على أنه الزمن اللازم للتخلص من نصف الجرعة التي يتناولها المريض، وذلك عن طريق الاضمحلال الإشعاعي والطرق البيولوجية معًا.

تُستخدم الطرق التجريبية لقياس العمر النصفي الفعال، فمثلًا، في حالة امتصاص اليود-131 بواسطة الغدة الدرقية thyroid gland حيث وُجد أنه عند قياس الشدة الإشعاعية بواسطة عداد مناسب أن الشدة الإشعاعية تنقص إلى النصف بعد ستة أيام، بينما

العمر النصفي الفيزيائي لهذا النظير هو ثمانية أيام. الفرق إذن مرده تدخل الطرق البيولوجية في عملية التخلص وهذا أمر مُتوقع، أن يكون العمر النصفي الفعال أقصر من العمر النصفي الفيزيائي، حيث توجد وسيلتان لتناقص الشدة إشعاعية في العضو أو النسيج. بيد أن هناك بعض الحالات القليلة التي يتساوى فيها كلاهما تقريبًا، وذلك عندما يصعب التخلص من المادة المشعة بالطرق الحيوية كما في حالة امتصاص ^{99m}Tc بواسطة الكبد.

* * *

obeikandl.com

- James A. Sorenson and Michael E. Phelps, Physics in Nuclear Medicine, Grune & Stratton, NY (1980).
- Robley D. Evans, The Atomic Nucleous, McGraw-Hill Book Company, Inc, NY, 1955.
- Text book of Nuclear Medicine: Basic Science, A. F Rocha and G. C. Harbert, Lea& Febiger, Philadelphia, 1978.

❊ ❊ ❊

obeikandl.com