إعداد : مولود أوراغ
مفتش التربية الوطنية

المتميز

بطاقات منهجية

في

الفيزياء

التحوّلات النووية

Transformations nucléaires

3AS

Physique

BAC

1 التحوّلات النووية

Transformations Nucléaires

النشاط الإشعاعي : Radioactivité

تم اكتشاف ظاهرة النشاط الإشعاعي صدفة من طرف الفيزيائي الفرنسي هنري بيكرال Henry Becquerel سنة 1896 حيث لاحظ أن أملاح الأورانيوم الموضوعة داخل درج مغلق تترك أثرا على لوحات فوتوغرافية موجودة إلى جانب هذه الأملاح كما لو تعرضت لضوء الشمس، فاستنتج من ذلك أن هذه الأملاح تصدر تلقائيا إشعاعا غير مرئي.

و تواصلت دراسة النشاط الإشعاعي على يد العالمين بيار و ماري كوري (Pierre et Marie Curie) باكتشاف عنصرين مشعين هما الراديوم و البولونيوم. و قد تُوّجت نتائج أبحاثهم بالحصول على جائزة نوبل (Nobel) سنة 1903.

النشاط الإشعاعي هو ظاهرة نووية تمس أنوية الذرات حيث أن النواة المشعة (النواة الأم) تتفكك تلقائيا لتعطي نواة جديدة (النواة البنت) مرفوقة بإصدار جسيمة و إشعاع كهرومغناطيسي.

و تنقسم الجسيمات الصادرة عن النواة المشعة حسب أنواع التفككات الحادثة التالية :

تفكك من النوع α	تصدر خلاله جسيمة α و هي عبارة على نواة الهيليوم ${}^4_2He$. يتم طرد هذه الجسيمات من النواة بسرعة كبيرة ($20000km.s^{-1}$)، فتخترق المادة بانتزاع الإلكترونات منها، فهي جسيمات مُؤيّنة تحمل شحنة كهربائية موجبة.
تفكك من النوع β^-	يصدر خلاله إلكترون ${}^0_{-1}e$. الجسيمات β^- هي إلكترونات يتم طردها من النواة، شحنتها سالبة.
تفكك من النوع β^+	يصدر خلاله بوزيتون (positon) ${}^0_1e$. الجسيمات β^+ هي بوزيتونات يتم طردها من النواة، شحنتها موجبة.
تفكك من النوع γ	يصدر خلاله إشعاع كهرومغناطيسي γ، هو من نفس طبيعة الضوء و طول موجته قصير جدا. و يعتبر الإشعاع γ نافذا و خطيرا على الإنسان يجب تجنبه و الحماية منه.

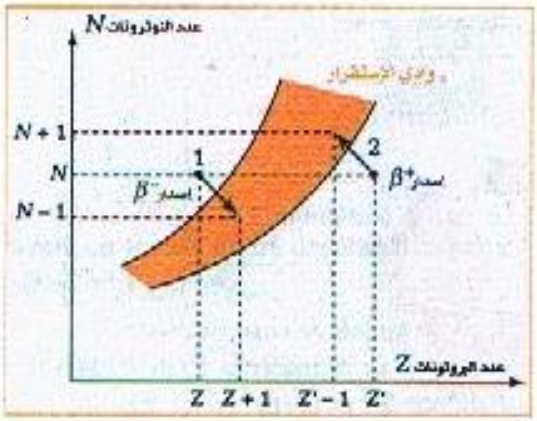
مجالات استقرار و عدم استقرار الأنوية : مخطط Segré (Z,N)

النواة المشعة (النواة الأم) هي نواة غير مستقرة يمكنها أن تتفكك تلقائيا لتعطي نواة أخرى (النواة البنت) مع إصدار دقيقة α أو β و إشعاع γ على العموم.

يحتوي المخطط (Z,N) على مجموع الأنوية المعروفة و قد تم تمثيل كل نواة على هذا المخطط بثنائية (Z,N).

الأنوية المستقرة : Noyaux stables

- من أجل $Z \leq 20$: يكون عدد البروتونات و عدد النوترونات متقاربين في الأنوية المستقرة، و تكون هذه الأنوية موجودة بجوار المستقيم $N = Z$ كما هو الحال مثلا بالنسبة لأنوية : $^{4}_{2}He$ ، $^{12}_{6}C$ ، $^{14}_{7}N$ ، $^{16}_{8}O$ ، $^{20}_{10}Ne$.



- من أجل $Z > 20$: يكون عدد النوترونات أكبر من عدد البروتونات. تتواجد الأنوية المستقرة فوق المستقيم $N = Z$، كما هو الحال مثلا بالنسبة لنواة $^{56}_{26}Fe$.

يسمى المجال الذي يحتوي على الأنوية المستقرة "وادي الإستقرار" (Zone de stabilité) .

الأنوية غير المستقرة : Noyaux instables

كل نواة عددها الشحني أكبر من 82 هي نواة غير مستقرة.

توجد ثلاث حالات ممكنة :

- النواة الأم موجودة فوق مجال الاستقرار، فهي تمتلك بذلك زيادة من النوترونات.

يتحوّل النوترون إلى بروتون مع إصدار إلكترون : النواة الأم مشعة تصدر جسيمة β^-.

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}p + {}^{0}_{-1}e$$

- النواة الأم موجودة تحت مجال الاستقرار، فهي تمتلك بذلك زيادة من البروتونات.

يتحوّل البروتون إلى نوترون مع إصدار بوزيتون : النواة الأم مشعة تصدر جسيمة β^+.

$$^{1}_{1}p \rightarrow {}^{1}_{0}n + {}^{0}_{1}e$$

- النواة الأم تحتوي على عدد كبير من النوكليونات (الأنوية الثقيلة حيث A>200).

تتفكك النواة الأم تلقائيا مع إصدار جسيمة α (نواة هيليوم).

معادلات التفاعلات النووية :

يمكن نمذجة التفاعل النووي بمعادلة تخضع إلى قانوني انحفاظ العدد الشحني و عدد النوكليونات. يعرف هذان القانونان بقانوني صودي.

الإصدار α	$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$ مثال : $^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He$
الإصدار β^-	$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$ مثال : $^{60}_{27}Co \rightarrow {}^{60}_{28}Ni + {}^{0}_{-1}e$
الإصدار β^+	$^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y + {}^{0}_{1}e$ مثال : $^{201}_{81}Tl \rightarrow {}^{201}_{80}Hg + {}^{0}_{1}e$
الإصدار γ	تتشكل النواة البنت عموما في حالة مثارة (متهيّجة) حيث تمتلك طاقة زائدة ناتجة عن الحركية الحرارية للنوكليونات. تتحرر هذه الطاقة الزائدة عند زوال الإثارة، فتصدر إشعاعا γ. $^{A}_{Z}Y^{*} \rightarrow {}^{A}_{Z}Y + \gamma$

ملاحظة : ترمز النجمة (*) إلى الحالة المثارة للنواة.

التناقص الإشعاعي: Décroissance radioactive

التفـكك التلقائـي (α ، β^- و β^+) لنواة غير مسـتقرة ${}^{A}_{Z}X$ هي ظاهرة عشـوائية تماما و لا تتأثر بالشروط الفيزيائية (الحالة، درجة الحرارة، الضغط).

و عليه فإنه يستحيل توقّع اللحظة التي يحدث فيها التفكك.

و بالمقابل، فإنه يمكن توقع التطور بدلالة الزمن للعدد N (t) من الأنوية المشـعة ${}^{A}_{Z}X$ الموجودة فـي العينـة إذا علمنا قيمة عدد الأنوية الإبتدائية N_0 في اللحظة $t = 0$. فإذا كان ΔN هو التغير في عدد الأنوية المشعة ${}^{A}_{Z}X$ بين اللحظتين t و $t + \Delta t$، فإن :

$\Delta N = N(t+\Delta t) - N(t)$ ، حيث : $\Delta N < 0$

و يكون ΔN متناسبا : - مع العدد N (t) للأنوية المشعة ${}^{A}_{Z}X$ الموجودة في العينة في اللحظة t.

- مع المدة الزمنية Δt .

و بذلك نكتب : $\Delta N = -\lambda . N(t) . \Delta t$ ، حيث : $\lambda > 0$

λ هو ثابت الإشعاع (أو ثابت التفكك) و يقدر بالوحدات التالية : an^{-1} ، $jour^{-1}$ ، h^{-1} ، min^{-1} ، s^{-1}.

ملاحظة : في العبارة $\Delta N = -\lambda . N(t) . \Delta t$ إذا كان λ مقدرا بـ (s^{-1})، فإن الحـد Δt يكون مقدرا بالثانية (s).

نعطي في الجدول التالي رتبة مقدار ثابت الإشعاع في بعض الأنوية المشعة :

النواة	${}^{14}_{6}C$	${}^{236}_{92}U$	${}^{222}_{86}Rn$	${}^{15}_{8}O$
ثابت الإشعاع (λ)	$1,21.10^{-4} an^{-1}$	$2,96.10^{-8} an^{-1}$	$0,18\ jour^{-1}$	$0,340\ min^{-1}$

يمكن كتابة العلاقة $\Delta N = -\lambda . N . \Delta t$ بالشكل التالي : $\frac{\Delta N}{\Delta t} + \lambda \cdot N = 0$

و في الحالة التي يكون فيها ΔN و Δt متناهيين في الصغر، فإن $\frac{\Delta N}{\Delta t}$ تكتب بالشكل $\frac{dN}{dt}$.

و بذلك نحصل على المعادلة التفاضلية التالية : $\frac{dN}{dt} + \lambda . N = 0$

و يعطي حلها قانون التناقص الإشعاعي التالي :

$$N(t) = N_0 . e^{-\lambda . t}$$

حيث N_0 هو العدد الإبتدائي للأنوية المشعة.

نشاط عينة مشعة :

يوافق نشاط عينة إلى عدد التفككات التي تخضع لها في الثانية الواحدة : $A = -\frac{dN}{dt}$

و منه : $A(t) = \lambda . N_0 . e^{-\lambda . t}$

أي أن : $A(t) = \lambda . N(t)$

و بوضع : $A_0 = \lambda . N_0$ ، نجد : $A = A_0 . e^{-\lambda . t}$

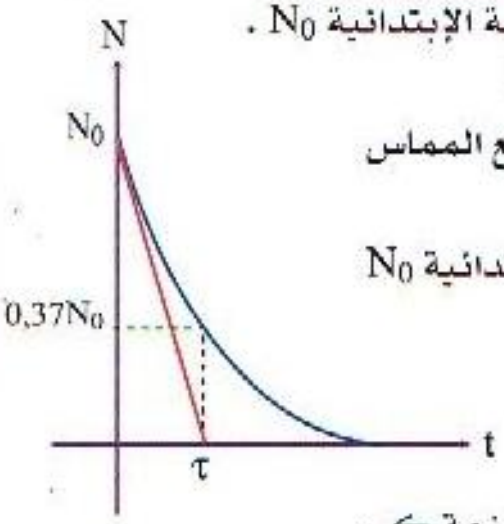
يقاس النشاط A بالبيكرال (Bq). و يعادل البيكرال إلى تفكك واحد في الثانية الواحدة.
نعطي في الجدول التالي القيم التقديرية لنشاط بعض المنابع الإشعاعية :

المنبع الإشعاعي	النشاط
1L من ماء المطر	1Bq
1L من الماء المعدني	10 Bq
رجل كتلته 70kg	1000 Bq
1g من البلوتونيوم	2.10^9 Bq

ثابت الزمن τ : Constante de temps

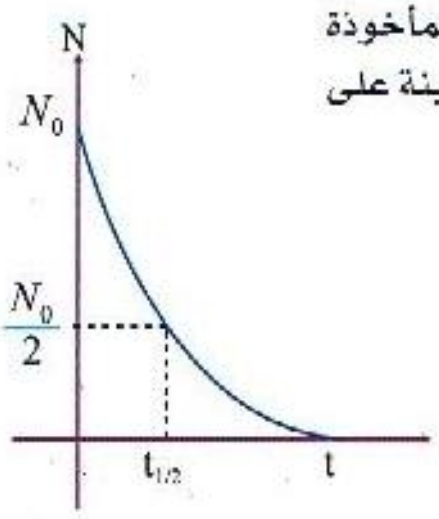
يعرف ثابت الزمن τ المميز لنواة مشعة بالعلاقة التالية : $\tau = \frac{1}{\lambda}$

و يمثل الزمن الموافق و اللازم لتفكيك 63% من الأنوية المشعة الإبتدائية N_0 .
يمكن تعيين ثابت الزمن τ بيانيا بإحدى الطريقتين التاليتين :
- هـو الزمن الموافق إلى فاصلة نقطة تقاطع محور الأزمنة مع المماس للمنحنى البياني N(t) (أو A(t)) في اللحظة t = 0.
- هو الزمن الموافق كي يبقى سوى 37% من عدد الأنوية الابتدائية N_0 اي $0,37\ N_0$.



نصف العمر $t_{1/2}$: Demi –vie

يوافـق نصـف العمر ($t_{1/2}$) لنواة مشـعة إلى المدة الزمنيـة اللازمة كي يتفكك نصـف عدد أنوية العينـة الموجودة في اللحظـة t=0 (المأخوذة كمبدأ للأزمنة) أو المدة الزمنية اللازمة كي يقسـم نشاط العينة على اثنين.



أي أن : $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$ أو $A(t_{1/2}) = \frac{A_0}{2}$

العلاقة بين $t_{1/2}$ و τ :

لدينا تعريفا : $N(t_{1/2}) = \frac{N_0}{2}$

و حيث أن : $N(t_{1/2}) = N_0 . e^{-\lambda . t_{1/2}}$

إذن : $N_0 . e^{-\lambda . t_{1/2}} = \frac{N_0}{2} \Rightarrow e^{-\lambda . t_{1/2}} = \frac{1}{2}$

و منه : $\ell n\left(e^{-\lambda . t_{1/2}}\right) = \ell n \frac{1}{2} \Rightarrow -\lambda . t_{1/2} = -\ell n 2$

إذن : $t_{1/2} = \frac{\ell n 2}{\lambda}$ أو : $t_{1/2} = \tau . \ell n 2$

يوضح الجدول التالي رتبة مقدار نصف عمر بعض العناصر المشعة :

العنصر المشع	نصف العمر
$^{239}_{94}Pu$	$2,4x10^4$ ans
$^{235}_{92}U$	$7,2x10^8$ ans
$^{14}_{6}C$	5730 ans
$^{137}_{55}Cs$	30 ans
$^{57}_{27}Co$	270 jours

نتائج و تطبيقات النشاط الإشعاعي :

1. الأفعال البيولوجية :

تُحدث الجسيمات α . β^+ و β^- و كذلك الإشعاعات γ عند اختراقها أجسامنا تأينات تتسبب في تحطيم و تخريب الخلايا و قد يؤدي ذلك إلى الموت، كما يمكن أن تؤدي الإشعاعات إلى تغيير الـ ADN و التي ينتج عنها تشوّهات جينية.

فكلما كان النشاط معتبرا كلما كانت الأخطار و الأضرار المنجرة عنه كبيرة و وخيمة.

2. التطبيقات :

للنشاط الإشعاعي تطبيقات واسعة في المجالات التالية : التأريخ في الجيولوجيا و علم الآثار، العلاج بالأشعة، التصوير الطبي و التعقيم.

التكافؤ كتلة – طاقة :

إن مفهوم علاقة التكافؤ بين الطاقة و الكتلة ضروري لفهم الظواهر النووية.

بنى البير إنشتاين (Albert Einstein) سنة 1905 النظرية النسبية التي بموجبها كل جسيمة تمتلك طاقة فقط لأن لها كتلة.

علاقة إنشتاين : كل جملة تمتلك، حتى و لو كانت ساكنة، بفعل كتلتها طاقة تسمى "طاقة الكتلة" و التي تحسب من علاقة إنشتاين: $E = m \cdot c^2$

حيث c هي سرعة الضوء في الفراغ : $c = 3x10^8\ m.s^{-1}$

E طاقة الكتلة بالجول (J).

m الكتلة بالكيلوغرام (kg).

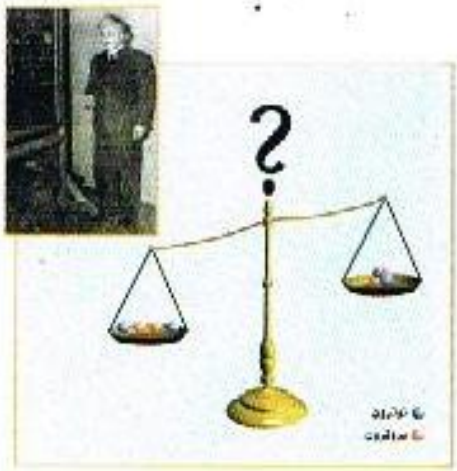
و تسمى علاقة إنشتاين أيضا علاقة التكافؤ بين الكتلة و الطاقة.

طاقة ربط النواة : Énergie de liaison

1. النقص في كتلة النواة :

تتكون النواة $^{A}_{Z}X$ من Z بروتونا و (A-Z) نوترونا.

نتوقع أن كتلة هذه النواة m_x تحقق المساواة التالية : $m_x = Z.m_p + (A-Z).m_n$



حيث : m_p و m_n هما كتلتا البروتون و النوترون على التوالي.
لكن الحقيقة تثبت غير ذلك، على اعتبار أن كتلة النواة تختلف عن مجموع كتل نيوكليوناتها المعزولة و الساكنة.
و بالتالي فإنه يوجد نقص في الكتلة Δm معرف على النحو التالي :

$$m = Z.m_p + (A-Z).m_n - m_x\Delta$$

2. طاقة الربط :

طاقة الربط E_ℓ لنواة هي الطاقة التي يجب تقديمها لنواة ساكنة ${}^A_Z X$ في مرجع معين، من أجل تفكيكها إلى مختلف نيوكلوناتها المعزولة و الساكنة.

و حسب قانون انحفاظ الطاقة، نكتب :

$$\underbrace{m_x.c^2}_{\text{طاقة كتلة النواة } {}^A_Z X} + E_\ell = \underbrace{Z.m_p.c^2}_{\text{طاقة كتلة البروتونات}} + \underbrace{(A-Z)m_n\,.\,c^2}_{\text{طاقة كتلة النوترونات}}$$

و منه نستنتج طاقة ربط النواة :

$$E_\ell = [\, Zm_p + (A-Z)m_n \,]\,.\,c^2 - m_x.c^2$$
$$E_\ell = \Delta m.\, c^2$$

3. وحدة الطاقة و الكتلة :

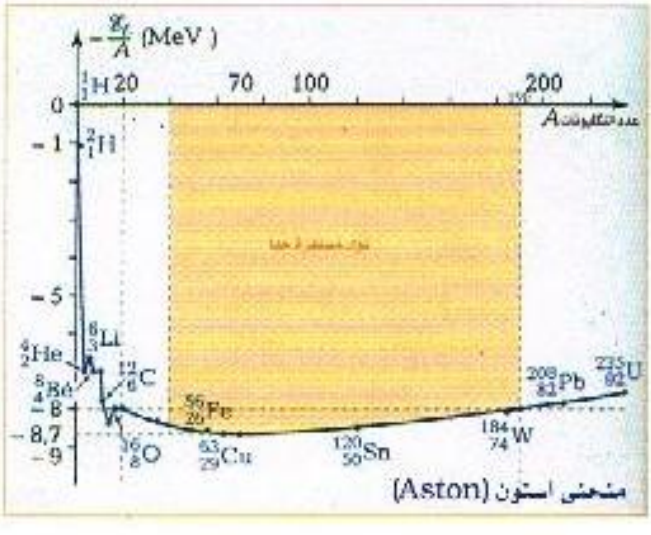
يستعمل في التبادلات الطاقوية على المستوى الذري وحدات أكثر ملاءمة لقياس الطاقة :

- الإلكترون فولط : $1eV \approx 1{,}6 \times 10^{-19} J$
- الكيلو إلكترون فولط : $1KeV \approx 1{,}6 \times 10^{-16} J$
- الميغا إلكترون فولط : $1MeV \approx 1{,}6 \times 10^{-13} J$

كما تستعمل وحدة خاصة لقياس كتل الأنوية و الذرات هي وحدة الكتلة الذرية (u)، حيث :

$$1u = 1{,}66054.\,10^{-27}\,kg$$

4. طاقة الربط للنكليون : Énergie de liaison par nucléon



تكون طاقة ربط النواة كبيرة كلما كانت النواة أثقل.
و على سبيل المثال، تساوي طاقة ربط نواة الأورانيوم $^{235}_{92}U$ إلى 1743,5MeV بينما تساوي هذه الطاقة في نواة الحديد $^{56}_{26}Fe$ إلى 478,8MeV.
فيبدو من الوهلة الأولى أن نواة الأورانيوم $^{235}_{92}U$ هي أكثر استقرارا من نواة الحديد $^{56}_{26}Fe$.
لكن الحقيقة أن الحديد أكثر استقرارا من الأورانيوم !

للمقارنة بين استقرار أنوية مختلفة، يجب المقارنة بين طاقات الربط لكل نكليون في هذه الأنوية، أي : $\frac{E_l}{A}$

توجد الأنوية الأكثر استقرارا في الجزء السفلي من منحنى أستون.

تكون النواة أكثر استقرارا كلما كانت طاقة الربط لكل نكليون $\frac{E_l}{A}$ كبيرة في هذه النواة.

يسمح تحليل منحنى أستون بتوقع طريقتين للحصول على الطاقة من الأنوية : الإنشطار و الإندماج.

الانشطار النووي : La fission nucléaire

النوترونات هي جسيمات متعادلة كهربائيا تم اكتشافها من طرف العالم الإنجليزي جايمس شادويك سنة 1932. تستعمل النوترونات في قصف أنوية الأورانيوم للحصول على أنوية أخرى. فعندما يصطدم نوترون، محمل بطاقة مناسبة، بنواة الأورانيوم 235، فإن ذلك يؤدي إلى انشطار نواة الأورانيوم إلى نواتين خفيفتين مع تحرير عدد معين من النوترونات كما تبينه معادلتا الانشطار الممكنتان التاليتان :

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{135}_{53}I + {}^{91}_{39}Y + 3{}^{1}_{0}n + \gamma $$

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \rightarrow {}^{94}_{38}Sr + {}^{140}_{54}Xe + 2{}^{1}_{0}n + \gamma $$

الانشطار هو تفاعل نووي مفتعل يتم خلاله انشطار (انقسام) نواة ثقيلة إلىنواتين خفيفتين تحت تأثير صدمة النوترون بالنواة.

الاندماج النووي : la fusion nucléaire

الاندماج هو تفاعل نووي مفتعل يتم خلاله التحام نواتين خفيفتين لتشكيل نواة أثقل مع تحرير طاقة.

و يعتبر تفاعل اندماج نواتي ${}^{2}_{1}H$ (الديوتريوم) و ${}^{3}_{1}H$ (التريتيوم) هو التفاعل الأكثر دراسة في المخابر حاليا :

$$ {}^{3}_{1}H + {}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n $$