Problèmes de Physique Nucléaire

Avec réponses et résumé du cours

Réda Attallah

Professeur à l'Université Badji Mokhtar

Annaba

مسائل في الفيزياء النووية

مع الأجوبة و ملخص الدرس

رضا عطاءالله

أستاذ بجامعة باجي مختار

عنابة

2013

When we have found how the nucleus of atoms is built up we shall have found the greatest secret of all — except life. We shall have found the basis of everything — of the earth we walk on, of the air we breathe, of the sunshine, of our physical body itself, of everything in the world, however great or however small — except life.

Ernest Rutherford (1871-1937)

L'objectif principal des sciences est de découvrir des façons de penser permettant de comprendre les phénomènes naturels, et d'en tirer des prédictions justes et des applications fonctionnelles. La seule manière d'apprendre de nouvelles façons de penser, c'est de s'exercer à penser soi-même. **Se contenter de lire et de retenir ne sert pratiquement à rien**. Au lieu d'apprendre par cœur des équations, il est plus avantageux pour l'étudiant d'apprendre des types de raisonnements. En ce sens, les exercices et problèmes sont certainement l'un des meilleurs moyens pour atteindre ce but. Ils permettent à l'étudiant d'assimiler les concepts théoriques de base, de contrôler ses connaissances et d'apprendre à penser comme un véritable physicien.

Ce recueil de problèmes couvre plusieurs domaines connus de la physique nucléaire. En plus des exercices et des réponses aux questions, il donne au début de chaque chapitre un rappel des principaux résultats du cours. Bien qu'il soit le fruit de nombreuses années d'enseignement au département de physique, les étudiants des autres disciplines scientifiques et techniques peuvent en tirer profit.

إن الهدف الرئيسي من العلوم هو اكتشاف أساليب تفكير تسمح بفهم الظواهر الطبيعية و استنباط تنبؤات صحيحة و تطبيقات عملية . الطريقة الوحيدة لتعلم أساليب تفكير جديدة هي التمرن على التفكير بأنفسنا . **فالاكتفاء بالقراءة و الحفظ لا جدوى منه** . بدلا عن حفظ المعادلات عن ظهر قلب ، يجدر بالطالب أن يتعلم الطرق الاستدلالية . في هذا السياق ، التمارين و المسائل هي بكل تأكيد خير وسيلة لبلوغ هذا الهدف . فهي تسمح للطالب باستيعاب المفاهيم النظرية الأساسية و التحقق من معارفه و تعلم التفكير كفيزيائي حقيقي .

هذه المجموعة من المسائل تغطي عدة مجالات معروفة من الفيزياء النووية . بالإضافة إلى التمارين و أجوبة الأسئلة ، يعرض هذا الكتيب في بداية كل فصل مراجعة لأهم نتائج الدرس . و بالرغم من أنه ثمرة سنوات عديدة من التدريس بقسم الفيزياء ، إلا أن الطلاب الجامعيين من الشعب الأخرى ، العلمية و التقنية ، بإمكانهم الانتفاع به .

1. Introduction

1. مقدمـــــة

La **physique nucléaire** a pour objet l'étude du **noyau atomique**. Elle date du début du 20ème siècle, quand les physiciens ont réalisé que l'atome est doté d'une structure interne, et que comprendre cette structure pourrait être important. Cette discipline moderne de la physique possède de nombreuses applications importantes dans différents domaines de la science et de la technologie.

تهتم **الفيزيـــاء النوويـــة** بدراسة **النـــواة الذريـــة** ، و يرجع تاريخها إلى بداية القرن العشرين حين اكتشف العلماء أن الذرة لها بنية داخلية و أن فهم هذه البنية قد يكون مهما . هذا الفرع الحديث من الفيزياء له العديد من التطبيقات المهمة في ميادين مختلفة من العلم و التكنولوجيا .

A) Structure atomique de la matière

أ) التركيـــب الـــذري للمـــادة

La théorie moderne de la **structure atomique de la matière**, appelée aussi **modèle de Rutherford** de l'atome, se résume aux points suivants :

- L'atome est constitué d'un **noyau** autour duquel tournent des **électrons** à des distances très grandes en comparaison avec le diamètre du noyau ;
- Le noyau se compose de **protons** et de **neutrons**, appelés ensemble **nucléons**. Le nombre de protons, noté Z, est appelé **nombre atomique**. Le nombre de neutron est noté N. Le nombre de nucléons, noté A (A = Z + N), est appelé **nombre de masse**.
- Le nombre d'électrons est égal au nombre de protons, ce qui assure la neutralité électrique de l'atome.

النظرية الحديثة **للتركيـــب الـــذري للمـــادة** ، تسمى أيضا **نمـــوذج « روذرفـــورد »** للذرة ، تتلخص في النقاط التالية :

- تتركب الذرة من **نـــواة** تدور حولها **إلكترونـــات** على مسافات كبيرة جدا مقارنة بقطر النواة .
- تشمل النواة الذرية عددا من **البروتونـــات** و **النوترونـــات** التي تجمعها كلمة **نُويَّـــات** . يعرف عدد البروتونات **بالرقـــم الـــذري** و يرمز له بالحرف Z ، و يرمز لعدد النوترونات بالحرف N . يرمز لعدد النويات بالحرف A ($A = Z + N$) و يدعى **الرقـــم الكتـــلي** .
- يساوي عدد الإكترونات عدد البروتونات ، مما يضمن تعادل الذرة .

Chaque valeur de Z représente un **élément chimique**, distingué par un nom et un symbole différents. Chaque couple (Z, N) désigne un **nucléide**. En pratique, un nucléide se présente sous la forme :

تمثل كل قيمة من Z **عنصـــرا كيميائيـــا** . يتميز كل عنصر باسم و رمز مختلفين . كل زوج من العددين Z و N يمثل **نكليـــدا** . عمليا يعطى كل نكليد على الشكل التالي :

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

où X représente le symbole de l'élément. Il existe 118 éléments chimiques, 340 nucléides naturels dont 255 stables, et environ 3000 nucléides artificiels.

حيث يرمز X إلى العنصر المدروس . يوجد 118 عنصرا كيميائيا ، و 340 نكليدا طبيعيا منها 255 مستقرا ، و حوالي 3000 نكليدا اصطناعيا .

Les nucléides de même nombre atomique Z mais de nombres de masse A différents sont dits **isotopes**. Les nucléides de même nombre de neutrons N sont dits **isotones** et ceux de même nombre de masse A sont dits **isobares**.

النكليدات التي لها نفس الرقم الذري Z و تختلف في الرقم الكتلي A تسمى **نظائـــرا** . النكليدات بنفس العدد N تسمى **متساويـــات النوترونـــات** ، و التي لها نفس العدد الكتلي A تسمى **متساويـــات الكتلـــة** .

B) Equivalence masse-énergie

ب) تكافـــؤ الكتلـــة و الطاقـــة

La masse m et l'énergie E sont deux grandeurs équivalentes liées par la **relation d'Einstein** :

الكتلة m و الطاقة E مقداران متكافئان تربط بينهما **علاقة « أينشتايـــن »** :

$$\boxed{E = m\,c^2}$$

où c représente la vitesse de la lumière dans le vide. Toute variation de masse Δm pour un système physique est toujours accompagnée d'une variation d'énergie ΔE tel que :

حيث تمثل c سرعة الضوء في الفراغ . كل تغير في الكتلة (Δm) لنظام فيزيائي يصحبه دائما تغير في الطاقة (ΔE) بحيث :

$$\Delta E = \Delta m\, c^2$$

Par ailleurs, l'énergie E est liée à la quantité de mouvement p et la masse au repos m_0 par une seconde relation d'Einstein :

من جهة أخرى ، هناك علاقة ثانية لِـــ « أينشتاين » تربط بين الطاقة E و كمية الحركة p و كتلة السكون m_0 هي :

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

C) Unités et dimensions

ج) وحـــدات و أبعـــاد

En physique nucléaire, on utilise souvent le **femtomètre**, au lieu du mètre (m), comme unité de longueur. Il est aussi connu sous le nom de fermi, de symbole fm :

في الفيزياء النووية ، نستعمل **الفِمْتومتـــر** كوحدة للطول بدلا عن المتر (m) ، و هي تعرف أيضا بالفَرْمي (fermi) و رمزها fm :

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

On utilise le mégaélectronvolt (MeV) comme unité d'énergie au lieu du joule (J) :

و نستعمل لقياس الطاقات ، بدلا عن الجول (J) ، وحدة **الميغـــا إلكتـــرون فلـــط** و رمزها MeV :

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} \quad ; \quad 1 \text{ eV} = 1.602\times10^{-19} \text{ J}$$

On utilise l'**unité de masse atomique**, de symbole u, comme unité de masse au lieu du kilogramme (kg). Elle est égale, par convention, au douzième de la masse du nucléide ${}^{12}_{6}\text{C}$:

و نستعمل لقياس الكتلة – بدلا عن الكيلوغرام (kg) — **وحـــدة الكتلـــة الذريـــة** ، رمزها u ، و هي اصطلاحا جزء من 12 من كتلة النكليد ${}^{12}_{6}\text{C}$:

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} m\left({}^{12}_{6}\text{C}\right) = \frac{1}{N_A} = 1.660\times10^{-27} \text{ kg} = 931.5 \text{ MeV/c}^2$$

N_A est le nombre d'Avogadro. Notons que la masse du proton (m_p) et celle du neutron (m_n) sont sensiblement égales à 1 u.

N_A هو عدد « آفوغادرو » . تجدر الإشارة إلى أن كتلة البروتون (m_p) و كتلة النوترون (m_n) تساويان على وجه التقريب 1 u .

Problèmes

مسائـــل

1 *

Quel est le nombre de protons, de neutrons, de nucléons et d'électrons des nucléides suivants :

ما هو عدد بروتونات و نوترونات و نويات و إلكترونات النكليدات التالية :

$^{32}_{16}S$; $^{108}_{47}Ag$; $^{137}_{56}Ba$

2 *

Soient quatre nucléides (A, B, C et D), possédant chacun un certain nombre de protons (Z) et un certain nombre de neutrons (N) suivant le tableau suivant :

لدينا أربع نكليدات (A, B, C, D) ، تحتوي كل منها على عدد معين من البروتونات (Z) و من النوترونات (N) كما هو مبين في الجدول التالي :

	A	B	C	D
Z	36	37	38	38
N	48	51	48	50

Désigner parmi ces nucléides les isotopes, les isobares et les isotones.

عين من بين هذه النكليدات النظائر و المتساويات الكتلة و المتساويات النوترونات ؟

3 **

Le bore naturel est en fait un mélange des deux isotopes :

البور الطبيعي هو في الواقع مزيج من النظيرين :

$^{10}_{5}B$; $^{11}_{5}B$

La masse moyenne d'un atome de bore naturel est égale à 10.81 u.

a) Quelle est la composition numérique de chaque isotope ?

b) Quelle est la composition massique de chaque isotope ?

الكتلة المتوسطة لذرة واخدة من البور الطبيعي تساوي 10.81 u .

أ) ما هي النسبة العددية لكل نظير ؟

ب) ما هي النسبة الكتلية لكل نظير ؟

<u>Réponse</u> : **a)** 19% et 81% ; **b)** 17.6% et 82.4%.

4 **

La masse volumique du fer est égale à 7.8 g/cm^3. Sachant que le diamètre du noyau atomique est 10000 fois plus petit que le diamètre de l'atome, calculer la masse volumique du noyau de fer ?

تساوي الكتلة الحجمية للحديد 7.8 g/cm^3 . إذا علمت أن قطر النواة الذرية أقل 10000 مرة من قطر الذرة ، احسب الكتلة الحجمية لنواة الحديد .

<u>Réponse</u> : 10^{13} g cm^{-3}.

5 **

Un noyau d'uranium ^{235}U libère 200 MeV au cours de sa fission. Quel est son pourcentage à l'énergie totale disponible ?

تحرر نواة اليورانيوم ^{235}U ، عندما تنشطر ، 200 MeV . ما هي نسبتها المئوية إلى الطاقة الإجمالية المتوفرة ؟

<u>Réponse</u> : 0.1%.

6 **

Une particule possède une énergie totale $E = 6\times10^3$ MeV et une quantité de mouvement $p = 3\times10^3$ MeV/c. Quelle est sa masse au repos ?

تملـــك جسيمـــة طاقـــة كليـــة $E = 6\times10^3$ MeV و كمية حركـــة $p = 3\times10^3$ MeV/c . ما هي كتلتها في حالة السكون ؟

Réponse : 5.6 u.

7 **

Montrer que la masse d'un noyau atomique exprimée en unités de masse atomique (u) est la même que la masse atomique exprimée en grammes.

بين أن كتلة النواة الذرية المعبر عنها بواسطة وحدة الكتلة الذرية (u) هي نفسها الكتلة الذرية المعبر عنها بواسطة الغرام.

2. Noyau atomique

2. النـــواة الذريـــة

La description du noyau atomique peut être limitée à un ensemble de grandeurs physiques telles que le rayon nucléaire, la masse, l'énergie de liaison nucléaire, le spin nucléaire… Ces grandeurs qui sont déterminées expérimentalement sont tabulées et à la portée de tous.

وصف النواة الذرية يمكن حصرها في مجموعة من المقادير الفيزيائية ، على غرار نصف القطر النووي و الكتلة و طاقة الربط النووي و السبيـــن النووي ... هذه المقادير التي يتم تعيينها تجريبيا مجدولة و في متناول الجميع .

A) Rayon nucléaire

أ) نصـــف القطـــر النـــووي

En supposant que le noyau atomique est de forme sphérique, le **rayon nucléaire** est donné par :

بافتراض أن النواة الذرية كروية الشكل ، يعطى **نصـــف القطـــر النـــووي** بالعلاقة :

$$\boxed{R = r_0\ A^{1/3}}$$

où A est le nombre de masse et r_0 une constante (≈ 1.2 fm).

حيث يمثل A الرقم الكتلي و r_0 ثابتا (≈ 1.2 fm) .

B) Energie de liaison nucléaire

ب) طاقـــة الربـــط النـــووي

L'énergie de liaison nucléaire $B(A, Z)$ est l'énergie dégagée quand on forme un noyau à partir de ses nucléons séparés. C'est aussi l'énergie nécessaire pour désagréger le noyau atomique. Nous avons :

طاقـــة الربـــط النـــووي $B(A, B)$ هي الطاقة التي تخرج عند تكوين النواة الذرية انطلاقا من مكوناتها الأصلية من البروتونات و النوترونات ، و هي أيضا الطاقة التي تلزم لتفكيك النواة إلى مكوناتها الأصلية . لدينا :

$$B(A,Z) = \left[Zm_p + (A-Z)m_n - m(A,Z)\right]c^2$$

où A est le nombre de masse, Z le numéro atomique, m_p la masse du proton, m_n la masse du neutron et $m(A, Z)$ la masse du noyau.

حيث يمثل A الرقم الكتلي و Z الرقم الذري ، و m_p كتلة البروتون ، و m_n كتلة النوترون ، و $m(A, Z)$ كتلة النواة .

L'excès de masse $\Delta(A, Z)$ d'un nucléide est la différence entre sa masse $m(A, Z)$ exprimée en unités de masse atomique (u) et son nombre de masse A :

زيـــادة الكتلـــة $\Delta(A, Z)$ لنكليد معين هي الفرق بين كتلته $m(A, Z)$ المعبر عنها بوحدة الكتل الذرية (u) و رقمه الكتلي A :

$$\Delta(A,Z) = m(A,Z) - A$$

En utilisant le concept d'excès de masse, l'énergie de liaison nucléaire peut être réécrite sous la forme :

باستخدام مصطلح زيادة الكتلة ، يمكن إعادة صياغة طاقة الربط النووي على الشكل :

$$B(A,Z) = \left[Z\Delta p + (A-Z)\Delta n - \Delta(A,Z)\right]c^2$$

où Δp et Δn sont les excès de masse du proton et du neutron.

حيث تمثل Δp و Δn زيادتي الكتلة للبروتون و النوترون .

L'énergie de séparation du proton (S_p) est l'énergie nécessaire pour extraire un proton à un nucléide ${}^{A}_{Z}X$:

طاقـــة فصـــل البروتـــون (S_p) هي الطاقة اللازمة لفصل بروتـــون من نكليد ${}^{A}_{Z}X$:

$$S_p({}^{A}_{Z}X) = B({}^{A}_{Z}X) - B({}^{A-1}_{Z-1}Y)$$

L'énergie de séparation du neutron (S_n) est l'énergie nécessaire pour extraire un neutron à un nucléide ${}^{A}_{Z}X_N$:

طاقـــة فصـــل النوتـــرون (S_n) هي الطاقة اللازمة لفصل نوتـــرون من نكليد ${}^{A}_{Z}X$:

$$S_n({}^{A}_{Z}X_{N}) = B({}^{A}_{Z}X_{N}) - B({}^{A-1}_{Z}X_{N-1})$$

Le degré de stabilité des noyaux atomiques peut être évalué à travers **l'énergie de liaison nucléaire par nucléon** (B/A) qui représente l'énergie moyenne nécessaire pour séparer un nucléon d'un noyau donné. Le noyau est d'autant plus stable que B/A est élevée.

يمكن تقدير مدى استقرار النوى الذرية من خلال **طاقـــة الربـــط النووي لكل نويـــة** (B/A) ، فهي تمثل القيمة المتوسطة اللازمة لفصل نوية واحدة من نواة معينة . كلما كان B/A أكبر ، كلما كانت النواة أشد استقرارا .

C) Spin nucléaire

ج) السبيـــن النـــووي

Le **spin nucléaire J** d'un nucléide est la somme des moments orbitaux (**L**) et des spins (**S**) de tous les nucléons qui le composent :

عـــزم اللـــف الـــذاتي (السبيـــن) النـــووي J لنكليد معين هو حاصل جمع العزوم المدارية (**L**) و الذاتية (**S**) لكل النويات التي يتركب منها :

$$\mathbf{J} = \mathbf{L} + \mathbf{S}$$

La **parité** est :

النديـــة هي :

$$\pi = (-1)^{L}$$

Le spin nucléaire J et la parité π sont des constantes du mouvement, c'est-à-dire que leurs valeurs ne varient pas avec le temps. L'état quantique d'un nucléide s'écrit J^{π}.

عزم اللف الذاتي النووي J و الندية π من ثوابت الحركة ، أي أن قيمتيهما لا تتغير مع الزمن . الحالة الكمية لنكليد تكتب على شكل J^{π} .

D) Moment dipolaire magnétique

د) العـــزم ثنـــائي القطـــب المغناطيـــسي

Chaque nucléide est caractérisé par un **moment dipolaire magnétique** :

يتميز كل نكليد **بعـــزم ثنـــائي القطـــب مغناطيـــسي** :

$$\boldsymbol{\mu} = g\mathbf{J}\mu_N$$

où g est une constante lié au nucléide et μ_N le **magnéton nucléaire** :

حيث يمثل g ثابتا خاصا بكل نكليد و μ_N **المغنيطـــون النـــووي** :

$$\mu_N = e\hbar/2m_p = 3.1524\times10^{-14} \ \text{MeV/T}$$

E) Moment quadripolaire électrique

ه) العـــزم ربـــاعي القطـــب الكهربـــائي

Chaque nucléide est aussi caractérisé par un **moment quadripolaire électrique** :

كما يتميز كل نكليد **بعـــزم ربـــاعي القطـــب كهربـــائي** :

$$Q = \frac{1}{\mathrm{e}}\int_V (3z^2 - r^2)\,\rho(\mathbf{r})\,d\mathbf{r}$$

où $\rho(\mathbf{r})$ est la densité de charge électrique. En supposant que le noyau atomique est un ellipsoïde de petit axe a et de grand axe b, Q peut être écrite sous la forme :

حيث تمثل $\rho(\mathbf{r})$ كثافة الشحنة الكهربائية . بافتراض أن النواة الذرية لها شكل إهليجي ثلاثي الأبعاد نصف قطره الصغير a و الكبير b ، تكتب Q على شكل :

$$Q = \frac{2Z}{5}(b^2 - a^2)$$

Problèmes | مسائــل

1 *

a) Calculez le rayon nucléaire *R* des nucléides :

أ) احسب نصف القطر النووي *R* للنكليدات :

$$^{2}_{1}H,\ ^{56}_{26}Fe,\ ^{238}_{92}U$$

b) Comparez *R* au rayon des électrons internes *r* des mêmes nucléides :

ب) قارن *R* مع نصف قطر الإلكترونات الداخلية *r* لنفس النكليدات :

$$r \approx 0.529/Z \quad (Å)$$

2 **

Quel est le nucléide naturel dont le rayon nucléaire est égal au tiers de celui du nucléide $^{243}_{94}Pu$?

ما هو النكليد الطبيعي الذي يعادل نصف قطره النووي ثلث نصف قطر النكليد $^{243}_{94}Pu$ ؟

Réponse : $A = 9$; $Z = 5$.

3 **

Les valeurs expérimentales des masses atomiques de l'hydrogène H et du deutérium D ($^{2}_{1}H$) sont :

القيم التجريبية للكتلتين الذريتين للهيدروجين H و الدوتريوم D ($^{2}_{1}H$) هي :

$$M_H = 1.00782 \text{ g} \; ; \; M_D = 2.01410 \text{ g}$$

Par ailleurs, l'énergie de liaison nucléaire du deutérium est égale à :

من جهة أخرى ، تساوي طاقة الربط النووي للدوتريوم :

$$B = 2.220 \text{ MeV}$$

Et la masse du neutron est égale à :

و تساوي كتلة النوترون :

$$m_n = 1.674927 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Quelle est la valeur du nombre d'Avogadro qu'on peut déduire de ces mesures ?

ما هي قيمة عدد « آفوغادرو » التي يمكن استنتاجها من هذه القياسات ؟

4 **

La masse atomique du nucléide $^{12}_{6}C$ est égale par convention à 12 g. Calculez l'énergie de liaison nucléaire et l'énergie de liaison nucléaire par nucléon de ce nucléide. Nous avons :

الكتلة الذرية للنكليد $^{12}_{6}C$ تساوي اصطلاحا 12 g . احسب طاقة الربط النووي و طاقة الربط النووي لكل نوية لهذا النكليد . لدينا :

$$\Delta p = 7.289 \text{ MeV/c}^2 \; ; \; \Delta n = 8.071 \text{ MeV/c}^2$$

Réponse : 92.2 MeV ; 7.7 MeV/nucléon

5 **

Calculez l'énergie de liaison nucléaire des nucléides suivants puis déterminer lequel est le plus stable.

احسب طاقة الربط النووي للنكليدات الآتية ثم عين أيها أشد استقرارا .

$$^{16}_{8}O , \; ^{57}_{26}Fe , \; ^{176}_{71}Lu$$

	$^{16}_{8}O$	$^{57}_{26}Fe$	$^{176}_{71}Lu$	p	N
m(u)	15.994915	56.934939	175.942679	1.007825	1.008665

Réponse : 127.6 MeV ; 500.3 MeV ; 1418.4 MeV

6 **

a) Calculez S_n pour le nucléide $^{17}_{8}O$ et S_p pour le nucléide $^{17}_{9}F$. Que déduire ?

b) Calculez maintenant S_p pour les deux nucléides $^{16}_{8}O$ et $^{17}_{8}O$. Que déduire ?

أ) احسب S_n بالنسبة للنكليد $^{17}_{8}O$ و S_p بالنسبة للنكليد $^{17}_{9}F$. ماذا تستنتج ؟

ب) احسب الآن S_p بالنسبة للنكليدين $^{16}_{8}O$ و $^{17}_{8}O$. ماذا تستنتج ؟

	$^{17}_{8}O$	$^{16}_{8}O$	$^{17}_{9}F$	$^{15}_{7}N$	$^{16}_{7}N$
m(u)	16.999131	15.994945	17.002095	15.000109	15.994945

Réponse : **a)** 4.2 MeV ; 0.6 MeV ; **b)** 12.1 MeV ; 3.4 MeV.

7 **

L'état quantique des nucléides $^{9}_{4}Be$ et $^{9}_{5}B$ est $3/2^+$. En supposant que seuls les nucléons de valence solitaires contribuent au spin nucléaire J et à la parité π du noyau atomique, déterminez l'état quantique du nucléide $^{10}_{5}B$.

الحالة الكمية للنكليدين $^{9}_{4}Be$ و $^{9}_{5}B$ هي $3/2^+$. بافتراض أن السبين النووي J و الندية π للنواة الذرية لا تساهم فيهما إلا نويات التكافؤ المنفردة ، عين الحالة الكمية للنكليد $^{10}_{5}B$.

Réponse : $\{0^+, 1^+, 2^+, 3^+\}$

8 **

Le deutéron ${}_{1}^{2}H$ existe dans la nature dans les deux états quantiques ${}^{3}S_1$ et ${}^{3}D_1$. Son moment dipolaire magnétique vaut 0.8574376 μ_N. Calculez le pourcentage numérique de chaque état sachant que le moment magnétique du premier (${}^{3}S_1$) est égal à 0.879804 μ_N et celui du second (${}^{3}D_1$) 0.320644 μ_N

الدوترون ${}_{1}^{2}H$ متوفر في الطبيعة في الحالتين الكميتين ${}^{3}S_1$ و ${}^{3}D_1$ و يعادل عزمه ثنائي القطب المغناطيسي 0.8574376 μ_N . احسب النسبة العددية لكل حالة علما أن عزم الدوترون المغناطيسي في الحالة الأولى (${}^{3}S_1$) يساوي 0.879804 μ_N و في الثانية (${}^{3}D_1$) 0.320644 μ_N .

Réponse : 96% ; 4%.

9 **

On suppose que le noyau atomique a la forme d'un ellipsoïde de petit axe a et de grand axe b et que son rayon moyen R satisfait l'équation :

نفترض أن النواة الذرية لها شكل قطع مكافئ ثلاثي الأبعاد محوره الصغير a و الكبير b و أن نصف قطرها المتوسط R يحقق المعادلة :

$$R^3 = a^2 b$$

En écrivant :

بكتابة :

$$b = R + \delta R \qquad (\delta R << R)$$

calculez le rapport $\delta R/R$ du nucléide ${}_{71}^{176}Lu$ sachant que son moment électrique quadripolaire Q vaut 8.0 b.

احسب النسبة $\delta R/R$ للنكليد ${}_{71}^{176}Lu$ مع العلم أن عزمه رباعي القطب الكهربائي Q يعادل 8.0 b .

Réponse : 21%.

3. Modèles nucléaires

3. النمـــاذج النوويـــة

Le physicien nucléaire ne se contente pas seulement des études expérimentales, mais cherche aussi à lier théoriquement les résultats expérimentaux aux interactions ayant lieu entre les nucléons dans le noyau atomique. Au fur des années, les savants élaborèrent de nombreux modèles pour expliquer les différentes caractéristiques des noyaux atomiques. Nous en présentons dans ce chapitre deux, à savoir le modèle de la goutte liquide et le modèle en couches.

لا يكتفي الفيزيائي النووي بالدراسات التجريبية فقط ، بل يعمل أيضا على ربط النتائج التجريبية نظريا بالتفاعلات التي تحدث بين النويات داخل النواة الذرية . و لقد شكل العلماء على مر السنين نماذج عديدة لتفسير الخصائص المختلفة للنوى الذرية ، سنعرض منها في هذا الفصل اثنين ، هما أنموذج قطرة السائل و الأنموذج الغلافي .

A) Modèle de la goutte liquide

أ) أنموذج القطـــرة السائلـــة

En considérant l'énergie de liaison nucléaire, notamment l'énergie de liaison nucléaire par nucléon, le noyau atomique peut être représenté par une goutte liquide de forme sphérique, où les nucléons jouent le même rôle que les molécules. Ce modèle conduit à une **formule semi-empirique de la masse**, connue aussi sous le nom de **formule de Bethe-Weizsäcker** :

بالنظر إلى طاقة الربط النووي ، و لا سيما طاقة الربط النووي لكل نوية ، يمكن تمثيل النواة الذرية بقطرة سائلة كروية الشكل ، أين تلعب النويات نفس دور الجزيئات . هذا الأنموذج يؤدي إلى **صيغـــة نصـــف تجريبيـــة للكتلـــة** ، تعرف أيضا **بقانـــون « بـــات–فايزاكـــر »** :

$$B(A,Z) = a_\mathrm{v} A - a_\mathrm{s} A^{2/3} - a_\mathrm{c} \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_\mathrm{a} \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta$$

où $B(A, Z)$ est l'énergie de liaison, A le nombre de masse, Z le noyau atomique ; a_v, a_s, a_c et a_a sont des constantes :

حيث تمثل $B(A, Z)$ طاقة الربط النووي و A الرقم الكتلي و Z الرقم الذري .
a_v و a_s و a_c و a_a ثوابت تحدد قيمها تجريبيا :

a_v	a_s	a_c	a_a
15.5 MeV	16.8 MeV	0.72 MeV	23 MeV

Le premier terme de cette formule représente l'**énergie de volume**, le deuxième l'**énergie de surface**, le troisième l'**énergie coulombienne** et le quatrième l'**énergie d'asymétrie**. δ qui représente l'**énergie d'appariement** est donnée par :

يمثل الحد الأول **الطاقـــة الحجميـــة** ، و الحد الثاني **الطاقـــة السطحيـــة** ، و الثالث **الطاقـــة الكولوميـــة** ، و الرابع **طاقة عدم التناظر** . أما δ فهي **طاقـــة التـــزاوج** و هي تعطى بالعلاقة :

$$\delta = \begin{cases} +a_p A^{-3/4} & (Z \text{ et } N \text{ pairs}) \\ 0 & (A \text{ impair}) \\ -a_p A^{-3/4} & (Z \text{ et } N \text{ impairs}) \end{cases}$$

où a_p est une constante ($a_p \approx 34$ MeV).

حيث يمثل a_p ثابتا ($a_p \approx 34$ MeV) .

B) Modèle en couches

ب) الأنمـــوذج الغـــلافي

Au contraire du modèle de la goutte liquide, le **modèle en couches** traite les nucléons individuellement. Il se base sur la résolution de l'équation de Schrödinger, en plus du principe d'exclusion de Pauli. En choisissant un potentiel approximatif moyen approprié pour l'interaction nucléaire que subit chaque nucléon dans le noyau, et en tenant compte du couplage spin-orbite, on peut écrire les niveaux d'énergie des nucléons comme suit :

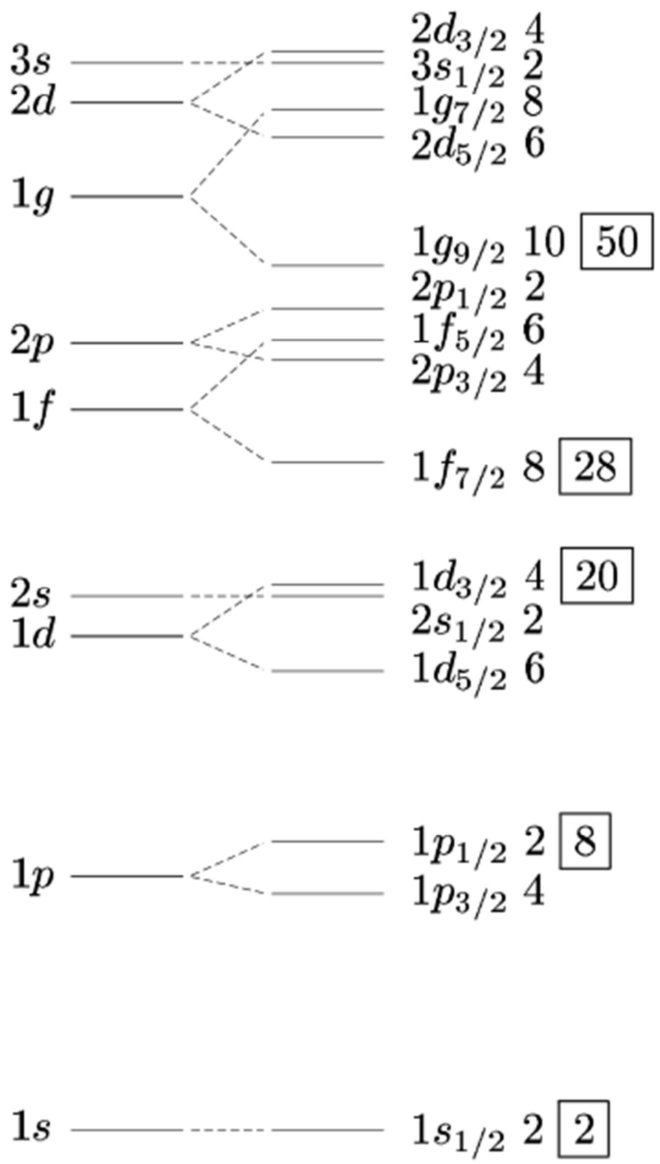
على عكس أنموذج القطرة السائلة للنواة الذرية ، يعالج **الأنمـــوذج الغـــلافي** النويات معالجة فردية معتمدا أساسا على حل معادلة « شرودنغار » بالإضافة إلى مبدأ « باولي » للاستبعاد . باختيار صيغة تقريبية متوسطة مناسبة للكمون النووي الذي تتعرض له كل نوية داخل النواة الذرية ، و اعتبار التقارن اللفي المداري ، يمكن أن نكتب المستويات الطاقية للنويات على النحو التالي :

$$\begin{cases} \varepsilon_{nlj=l-1/2} = E_{nl} + \frac{l+1}{2}\langle f(r)\rangle \\ \varepsilon_{nlj=l+1/2} = E_{nl} - \frac{l}{2}\langle f(r)\rangle \end{cases}$$

où n, l et j sont des nombres quantiques ($j = l \pm 1/2$) ; E_{nl} représente les niveaux d'énergie en l'absence de couplage spin-orbite ; $\langle f(r)\rangle$ est la moyenne d'une fonction qui ne dépend que de la distance r. Chaque niveau d'énergie est saturé avec $2j + 1$ protons où neutrons (voir figure). Le modèle en couches permet d'expliquer certaines caractéristiques du noyau atomique, tels que les états excités et les moments nucléaires, et, en particulier, les **nombres magiques** qui sont des nombres de protons ou de neutrons pour lesquels le noyau atomique est très stable. Ce sont les nombres :

حيث يمثل n و l و j أعدادا كمية ($j = l \pm 1/2$) ، و E_{nl} المستويات الطاقية في حالة عدم وجود التقارن اللفي المداري .أما $\langle f(r)\rangle$ فهي القيمة المتوسطة لدالة لا تتوقف إلا على المسافة r . يشبع كل مستوى طاقي بالعدد $2j + 1$ من البروتونات و النوترونات (انظر الشكل) . يسمح الأنموذج الغلافي بشرح بعض خصائص النواة الذرية ، كالحالات المثارة و العزوم النووية ، و خصوصا **الأعـــداد السحريـــة** ، و هي أعداد للبروتونات و النوترونات إذا احتوت عليها النواة أصبحت عالية الإستقرار . هذه الأعداد هي :

2 ; 8 ; 20 ; 28 ; 50 ; 82 ; 126 ; 184


3s
2d
1g
2p
1f
2s
1d
1p
1s
2d3/2 4
3s1/2 2
1g7/2 8
2d5/2 6
1g9/2 10 50
2p1/2 2
1f5/2 6
2p3/2 4
1f7/2 8 28
1d3/2 4 20
2s1/2 2
1d5/2 6
1p1/2 2 8
1p3/2 4
1s1/2 2 2

Problèmes

مسائـــل

1 **

a) Calculez l'énergie de répulsion coulombienne qui existe entre les deux protons du nucléide $^{3}_{2}He$ sachant que la distance qui les sépare est égale au rayon nucléaire.

b) Calculez la différence entre les énergies de liaison nucléaire des deux nucléides $^{3}_{2}He$ et $^{3}_{1}H$. Que conclure ?

أ) احسب طاقة التنافر الكولومية لبروتوني النكليد $^{3}_{2}He$ مع العلم أن المسافة التي تفصل بينهما تعادل نصف القطر النووي .

ب) احسب الفرق بين طاقتي الربط النووي للنكليدين $^{3}_{2}He$ و $^{3}_{1}H$. ماذا تستنتج ؟

	$^{3}_{2}He$	$^{3}_{1}H$	p	N
m(u)	3.016029	3.016049	1.007825	1.008665

Réponse : 0.8 MeV

2 **

Montrer que la différence entre les énergies de liaison nucléaire des deux nucléides $^{23}_{11}Na$ et $^{23}_{12}Mg$ provient du terme représentant l'énergie coulombienne dans la formule semi-empirique de masse, puis déduire la valeur du coefficient a_c de ce terme.

بين أن الفرق بين طاقتي الربط النووي للنكليدين $^{23}_{11}Na$ و $^{23}_{12}Mg$ ينتج عن الحد الذي يمثل الطاقة الكولومية للصيغة نصف التجريبية للكتلة ثم استنتج قيمة المعامل a_c لهذا الحد .

	$^{23}_{11}Na$	$^{23}_{12}Mg$
m(u)	22.989768	22.994124

Réponse : 0.6 MeV

3 **

Nous considérons les noyaux légers qui sont caractérisés par un nombre de proton égal au nombre de neutrons, c'est-à-dire :

نعتبر النوى الخفيفة التي يكون فيها عدد البروتونات مساويا لعدد النوترونات ، أي :

$$Z = N = A/2$$

Ecrire l'énergie de liaison nucléaire par nucléon en fonction du nombre de masse A (on néglige l'énergie d'appariement δ), puis calculer la valeur de A (puis Z) pour laquelle elle est maximale.

اكتب طاقة الربط النووي لكل نوية بدلالة العدد الكتلي A (نهمل طاقة التزاوج δ) ، ثم احسب قيمة A (ثم Z) التي تبلغ من أجلها ذروتها .

<u>Réponse</u> : $Z \approx 26$

4 **

Sur la base du modèle de la goutte liquide, calculer le numéro atomique Z du nucléide le plus stable pour une valeur donnée du nombre de masse A sachant que cette valeur est impaire.

<u>Application</u> :

بناء على نموذج القطرة السائلة ، احسب الرقم الذري Z للنكليد الأشد استقرارا بالنسبة لقيمة معينة للرقم الكتلي A مع العلم أنها فردية .

<u>تطبيـــق</u> :

A = 25 ; 43 ; 77.

<u>Réponse</u> : 12 ; 20 ; 34.

5 ***

Le tableau suivant nous donne les valeurs des masses nucléaires de quelques isobares ($A = 50$) :

يعطينا الجدول الآتي الكتل النووية لبعض المتساويات الكتلة ($A = 50$) :

$^{50}_{21}Sc$	$^{50}_{22}Ti$	$^{50}_{23}V$	$^{50}_{24}Cr$
49.952186	49.944792	49.947161	49.946046

Calculer la valeur du coefficient a_p du terme qui représente l'énergie d'appariement dans la formule semi-empirique de la masse.

احسب المعامل a_p للحد الذي يمثل طاقة التزاوج في الصيغة نصف التجريبية للكتلة .

Réponse : 29 MeV.

6 **

Quelles sont les valeurs du spin nucléaire J et de la parité π prévues par le modèle en couches pour l'état fondamental des nucléides suivants :

ما هي قيم السبين النووي J و الندية π المتوقعة من الأنموذج الغلافي للحالة الأساسية للنكليدات التالية :

$$^{7}_{3}Li;\ ^{11}_{5}B;\ ^{15}_{6}C;\ ^{17}_{9}F;\ ^{31}_{15}P;\ ^{141}_{59}Pr$$

Réponse : $3/2^-$; $3/2^-$; $5/2^+$; $5/2^+$; $1/2^+$; $7/2^+$.

7 **

Quel est le spin nucléaire J et la parité π prévus par le modèle en couches de l'état fondamental des nucléides $^{24}_{11}Na$ et $^{26}_{11}Na$ sachant que les valeurs expérimentales sont 4^+ et 3^+ respectivement.

ما هو السبين النووي J و الندية π المتوقعة من الأنموذج الغلافي للحالة الأساسية للنكليدين $^{24}_{11}Na$ و $^{26}_{11}Na$ علما أن القيم التجريبية هي 4^+ و 3^+ .

Réponse : $\{0^+ ; 1^+ ; 2^+ ; 3^+ ; 4^+ ; 5^+\}$; $\{2^+ ; 3^+\}$

8 **

Les excès de masse des nucléides $^{15}_{8}O$, $^{16}_{8}O$ et $^{17}_{8}O$ sont :

زيادة الكتلة للنكليدات $^{15}_{8}O$ و $^{16}_{8}O$ و $^{17}_{8}O$ هي :

	$^{15}_{8}O$	$^{16}_{8}O$	$^{17}_{8}O$
Δ (MeV/c^2)	–0.809	–4.737	2.855

Calculer la différence en énergie entre les niveaux $1p_{1/2}$ et $1d_{5/2}$.

احسب الفرق في الطاقة بين المستووين $1p_{1/2}$ و $1d_{5/2}$.

Réponse : 11.52 MeV

4. Radioactivité

4. النشـــاط الإشعـــاعي

Les nucléides sont de deux types : des nucléides stables qui ne changent pas avec le temps et des nucléides instables. Ces derniers se transforment spontanément en d'autres nucléides tout en émettant des rayonnements nucléaires sous la forme de particules ou de photons de haute énergie. On dit qu'ils sont **radioactifs** et ce phénomène est connu sous le nom de **radioactivité**.

النكليدات صنفان : نكليدات مستقرة لا تتغير مع الزمن ، و نكليدات غير مستقرة تتحول تلقائيا إلى نكليدات أخرى مع بث إشعاعات نووية على شكل جسيمات أو فوتونات عالية الطاقة . نقول عن هذه الأخيرة أنها **مشعـــة** ، و تعرف هذه الظاهرة **بالنشـــاط الإشعـــاعي** .

A) Loi de désintégration radioactive

أ) قانـــون الانحـــلال الإشعـــاعي

Le taux de désintégration à l'instant t est toujours proportionnel au nombre de noyaux radioactifs existant à cet instant :

معدل الإنحلال في اللحظة t يتناسب دائما مع عدد النوى المشعة الموجودة في تلك اللحظة :

$$\boxed{\frac{\mathrm{d}\,N(t)}{\mathrm{d}\,t} = -\lambda\,N(t)}$$

λ qui représente la **constante de désintégration** ne dépend que de la nature du noyau initial. La résolution de cette équation conduit à la **loi de désintégration radioactive** :

λ هو **ثابـــت الإنحـــلال** و قيمته لا تتوقف إلا على طبيعة النواة الأصلية .
حل هذه المعادلة يقودنا إلى **قانـــون الانحـــلال الإشعـــاعي** :

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

où N_0 est le nombre de noyaux radioactifs à l'instant initial.

حيث يمثل N_0 عدد النوى المشعة في اللحظة الإبتدائية .

La **période** $t_{1/2}$ est le temps au bout duquel le nombre de noyaux radioactifs diminue de moitié :

عمـــر النصـــف $t_{1/2}$ هو المدة الزمنية اللازمة لتنقص نوى مشعة إلى نصف عددها نتيجة للتحلل الإشعاعي :

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

L'**activité** $\mathcal{A}$ d'un échantillon radioactif est égal au nombre de noyaux qui se désintègrent par unité de temps :

النشـــاط الإشعـــاعي $\mathcal{A}$ لعينة مشعة هو عدد النوى التي تتحلل في وحدة الزمن :

$$\mathcal{A}(t) = \left|\frac{\mathrm{d}N}{\mathrm{d}t}\right| = \lambda N(t) = \mathcal{A}_0\ \mathrm{e}^{-\lambda t}$$

où $\mathcal{A}_0$ représente l'activité à l'instant initial. L'unité de l'activité dans le système international est le **becquerel** (Bq) qui équivaut à une ésintégration par seconde. On utilise parfois le **curie** (Ci) :

حيث يمثل $\mathcal{A}_0$ النشاط الإشعاعي في اللحظة الإبتدائية . وحدة النشاط الإشعاعي في النظام العالمي هي **البكـــرال** ، رمزها Bq ، و هي تساوي تفككا واحدا في الثانية . و نستخدم أحيانا **الكـــوري** ، رمزها (Ci) :

$$1\ \mathrm{Ci} = 3.7\times10^{10}\ \mathrm{Bq}$$

B) Modes de désintégration radioactives

ب) أنمـــاط الانحـــلال الإشعـــاعي

La **désintégration α** est accompagnée par l'émission d'une particule α :

الانحـــلال الألفـــاوي يصحبه إصدار جسيم α :

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

La **désintégration β** est accompagnée par :

– soit l'émission d'une électron e^- (β^-) et d'un anti-neutrino électronique $\bar{\nu}_e$:

الانحـــلال البيتـــاوي يصحبه :

– إما إصدار إلكترون e^- (β^-) و نوترينو إلكتروني مضاد $\bar{\nu}_e$:

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y_{N-1} + {}^{0}_{-1}e^{-} + \bar{\nu}_e $$

– soit par l'émission d'un positron e^+ (β^+) et d'un neutrino électronique ν_e :

– و إما بوزترون e^+ (β^+) و نوترينو إلكتروني ν_e :

$$ {}^{A}_{Z}X_{N} \rightarrow {}^{A}_{Z-1}Y_{N+1} + {}^{0}_{+1}e^{+} + \nu_e $$

On ajoute à la radioactivité β un troisième phénomène, appelé **capture électronique**, de symbole ε, qui consiste à l'absorption par le noyau d'un électron de l'atome :

و يلحق بالإنحلال البيتاوي ظاهرة ثالثة ، تدعى **الأســـر الإلكتـــروني** ، رمزها ε ، تتمثل في امتصاص النواة لأحد إلكترونات الذرة المدارية :

$$ {}^{A}_{Z}X + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{A}_{Z-1}X' + \nu_e $$

La **désintégration γ** est la transition d'un noyau excité vers un état d'énergie plus bas avec émission d'un photon de haute énergie appelé **rayonnement γ** :

الانحـــلال الغامـــاوي هو انتقال النواة المثارة إلى مستوى طاقي أخفض مع انبعاث فوتون عالي الطاقة يدعى **الأشعـــة غامـــا** (γ) :

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

Problèmes

مسائـــل

1 **

Le nucléide ${}^{90}_{38}Sr$ se caractérise par une période $t_{1/2}$ égale à 28.8 années. Calculer :

a) La constante de désintégration λ.

b) L'activité à l'instant initial ($t = 0$) pour un échantillon de ce nucléide de masse égale à 1 mg.

c) La durée en temps nécessaire pour que la masse de l'échantillon diminue de 1 mg à 250 μg et l'activité à ce moment.

يتميز النكليد ${}^{90}_{38}Sr$ بعمر النصف $t_{1/2}$ قدره 28.8 سنة . احسب :

أ) ثابت الإنحلال λ .

ب) النشاط الإشعاعي في اللحظة الإبتدائية ($t = 0$) لعينة من هذا النكليد كتلتها 1 mg .

ج) المدة الزمنية اللازمة حتى تتقلص كتلة هذه العينة من 1 mg إلى 250 μg و النشاط الإشعاعي آنذاك .

Réponse : **a)** 7.63×10^{-10} s^{-1} ; **b)** 5.10×10^{9} Bq ; **c)** 57.6 a ; 1.27×10^{9} Bq.

2 **

Le samarium naturel renferme 15.1% de radio-isotope ${}^{147}_{62}Sm$. 1 g de samarium naturel donne 89 désintégrations par seconde. Calculer la période du radio-isotope ${}^{147}_{62}Sm$ sachant que la masse atomique du samarium naturel vaut 150.36 g.

يحتوي السماريوم الطبيعي على 15.1% من النظير المشع ${}^{147}_{62}Sm$. واحد غرام من السماريوم الطبيعي يعطينا 89 تفككا في الثانية الواحدة . احسب عمر النصف $t_{1/2}$ للنكليد ${}^{147}_{62}Sm$ مع العلم أن الكتلة الذرية للسماريوم الطبيعي تعادل 150.36 g .

Réponse : 149.2 Ga.

3 **

Le corps humain renferme environ 18% de carbone naturel. 1 g de carbone naturel donne 15.3 désintégrations par minute à cause du radio-isotope $^{14}_{6}C$ qu'il renferme. Calculer le nombre de désintégrations par seconde que produit un corps humain de masse égale à 70 kg.

يحتوي جسم الإنسان على حوالي 18% من الكربون الطبيعي . يعطينا واحد غرام من الكربون الطبيعي 15.3 تفككا في الدقيقة بسبب احتوائه على النظير المشع $^{14}_{6}C$. احسب عدد التفككات في الثانية التي يحدثها جسم إنسان وزنه 70 كلغ .

Réponse : 3.2 kBq.

4 **

Soit le nucléide $^{236}_{94}Pu$.

a) Montrer que la désintégration α pour ce nucléide est possible.

b) Calculer l'énergie cinétique des particules α émises.

c) Calculer l'énergie de recul du noyau fils.

نعتبر النكليد $^{236}_{94}Pu$.

أ) برهن أن الإنحلال الألفاوي لهذا النكليد ممكن .

ب) احسب الطاقة الحركية لجسيمات α الصادرة .

ج) احسب طاقة ارتداد النواة البنت .

	α	$^{236}_{94}Pu$	$^{232}_{92}U$
m (u)	4.002603	236.046071	232.037168

Réponse : **a)** 5.9 MeV ; **b)** 5.8 MeV ; **c)** 0.1 MeV.

5 **

La désintégration α du nucléide $^{242}_{96}Cu$ produit le nucléide $^{238}_{94}Pu$. Sachant que l'énergie cinétique maximale des particules α émises vaut 6112.9 keV, calculer dans ce cas la masse du noyau père $^{242}_{96}Cu$. On donne :

ينتج الإنحلال الألفاوي للنكليد $^{242}_{96}Cu$ النكليد $^{238}_{94}Pu$. إذا علمت أن الطاقة الحركية القصوى لجسيمات α الصادرة تساوي 6112.9 keV ، احسب في هذه الحالة كتلة النواة الأم $^{242}_{96}Cu$. لدينا :

$$m(^{238}_{94}Pu) = 238.049555 \text{ u}$$

Réponse : 242.057623 u.

6 **

La désintégration β du nucléide $^{6}_{2}He$ produit le nucléide $^{6}_{3}Li$. Sachant que l'énergie cinétique maximale des électrons émis vaut 1.983 MeV, calculer la masse du nucléide $^{6}_{2}He$. On donne :

الإنحلال البيتاوي للنكليد $^{6}_{2}He$ يؤدي إلى النكليد $^{6}_{3}Li$. إذا علمت أن الطاقة القصوى للإلكترونات الصادرة تساوي 1.983 MeV ، احسب كتلة النكليد $^{6}_{2}He$. لدينا :

$$m(^{6}_{3}Li) = 6.015121 \text{ u} \quad ; \quad m_e = 0.511 \text{ MeV/c}^2$$

Réponse : 6.017798 u.

7 *

Compléter les réactions de désintégration radioactive suivantes en précisant la particule (ou les particules) manquante et le mode de désintégration.

أكمل معادلات التفاعلات الإشعاعية التالية و ذلك بتعيين الجسيمة (أو الجسيمات) الناقصة و اذكر نمط الإنحلال :

$$^{28}_{13}Al \rightarrow ^{28}_{14}Si + \dots$$
$$^{237}_{93}Np \rightarrow ^{233}_{91}Pa + \dots$$
$$^{20}_{9}F^{*} \rightarrow \dots$$
$$^{34}_{18}Ar \rightarrow ^{34}_{17}Cl + \dots$$
$$^{118}_{51}Sb + \dots \rightarrow ^{118}_{50}Sn + \dots$$

8 ***

Un échantion de radium $^{255}_{88}Ra$, de masse initiale m_0 et de constante de désintégration λ, donne en se désintégrant l'actinium $^{255}_{89}Ac$. Ce dernier est lui-même radioactif, on désigne par λ' sa constante de désintégration. Soit x et y les nombre respectifs des noyaux de radium et d'actinium à l'instant t.

a) Etablir l'expression de la variation dy pendant un intervalle de temps dt et chercher les solutions de l'équation différentielle obtenue.

b) Calculer la masse d'actinium après 2 jours. On donne :

عينة من الراديوم $^{255}_{88}Ra$ ، كتلتها الإبتدائية m_0 و ثابت انحلالها λ ، تعطينا عندما تتفكك مادة الأكتنيوم $^{255}_{89}Ac$. هذه الأخيرة هي أيضا إشعاعية النشاط ؛ نرمز إلى ثابت انحلالها بالحرف λ' . ليكن x و y عدد نوى الراديوم و الأكتنيوم على التوالي في اللحظة t .

أ) عين صيغة التغير dy خلال المدة الزمنية dt ثم ابحث عن حلول المعادلة التفاضلية التي نحصل عليها .

ب) احسب كتلة الأكتنيوم بعد يومين . لدينا :

$$m_0 = 0.02 \text{ g} \; ; \; t_{1/2}(^{255}_{88}Ra) = T = 15 \text{ j} \; ; \; t_{1/2}(^{255}_{89}Ac) = T' = 10 \text{ j}$$

c) Soit z le nombre de noyaux fils que produit l'actinium en se désintégrant. Calculer z en supposant que ce noyau est stable. Calculer $x + y + z$.

ج) ليكن z عدد النوى البنات التي يعطيها الأكتنيوم عندما يتفكك . احسب z مع افتراض أن هذه النواة مستقرة . احسب $x + y + z$.

<u>**Réponse**</u> : **b)** 1.65 mg.

9 **

En raison du nucléide $^{14}_{6}C$ qu'il contient, un morceau de bois ancien donne 1.2 désintégrations par minute. Calculer l'age de ce morceau de bois sachant q'un morceau de bois similaire nouvellement coupé d'un arbre donne 5.3 désintégrations par minute (la période du nucléide $^{14}_{6}C$ est égale à 5730 a).

قطعة من الخشب القديم تعطينا – بسبب احتوائها على النكليد $^{14}_{6}C$ – 1.2 تفككا في الدقيقة . احسب عمر هذه القطعة مع العلم أن قطعة مماثلة مقطوعة حديثا من شجرة تعطينا 5.3 تفككا في الدقيقة (عمر النصف للنكليد $^{14}_{6}C$ يساوي 5730 سنة).

<u>Réponse</u> : 12279 a.

5. Rayonnements nucléaires

5. الإشعـــاعـــات النوويـــة

Quand un rayonnement nucléaire traverse un détecteur, il interagit avec les atomes de la matière qui le constitue et libère ainsi un nombre considérable d'électrons atomiques. Ces derniers, d'énergie généralement faible, sont collectés et transformés en un signal électrique dont la forme est liée au rayonnement nucléaire incident.

عندما يخترق إشعاع نووي كاشفا ، فإنه يتفاعل مع ذرات المادة المكونة له ، فيحرر بذلك عددا معتبرا من الإلكترونات الذرية التي غالبا ما تكون طاقتها ضعيفة . تجمَّع هذه الإلكترونات و تحول إلى تيار كهربائي يكون شكله مرتبطا بالإشعاع النووي الوارد .

A) Interaction rayonnement-matière

أ) تفاعـــل الإشعـــاع مع المـــادة

En traversant un milieu matériel, les particules chargées lourdes interagissent essentiellement avec les électrons et perdent leur énergie par ionisation et excitation des atomes et molécules du milieu. La perte d'énergie par ionisation est donnée par la **formule de Bethe** :

عند مرورها بوسط مادي ، تتفاعل الجسيمات المشحونة الثقيلة أساسا مع الإلكترونات الذرية ، مما يؤدي إلى خفض طاقتها في عمليات تأيين و إثارة ذرات و جزيئات الوسط . يعطى فقدان الطاقة بالتأين **بمعادلـــة « بات »** :

$$-\frac{dE}{dx}=\frac{e^4 N_A}{4\pi\varepsilon_0^2 m_e}\frac{\rho Z}{A}\frac{z^2}{v^2}\ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right)$$

où N_A est le nombre d'Avogadro, m_e la masse de l'électron, ρ la densité du milieu, Z son numéro atomique et A son nombre de masse, z la charge de la particule incidente et v sa vitesse, I l'énergie d'excitation moyenne. Cette relation est aussi connue sous le nom de **pouvoir d'arrêt du milieu**.

حيث يمثل N_A عدد « آفوغادرو » ، و m_e كتلة الإلكترون ، و ρ كثافة الوسط و Z رقمه الذري و A رقمه الكتلي ، و z شحنة الجسيم الساقط و v سرعته ، و $\bar{I}$ طاقة الإثارة المتوسطة . تعرف هذه العلاقة أيضا **بقـــدرة إيقـــاف الوسط** .

La distance R parcourue par la particule incidente dans le milieu avant de s'arrêter complètement s'appelle **parcours**. Elle est donnée par :

المسافة R التي يقطعها الجسيم الساقط في الوسط إلى أن يتوقف تماما تدعى **طـــول المســـــار** . لدينا :

$$R = \int_{E_0}^{0} \mathrm{d}x = \int_{0}^{E_0} \left(\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}x} \right)^{-1} dE$$

En plus de la perte d'énergie par ionisation $(-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x)_c$, les électrons, en traversant un milieu matériel, perdent aussi leur énergie par **rayonnement de freinage** ou **bremsstrahlung** $(-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x)_r$. Nous avons :

بالإضافة إلى خفض الطاقة بالتأين $(-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x)_c$ ، تفقد الإلكترونات طاقتها عند مرورها بوسط مادي عن طريق الإشعاع $(-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x)_r$ ، و هو ما يعرف **بأشعـــة الكبـــح** . لدينا :

$$\frac{(-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x)_r}{(-\mathrm{d}E/\mathrm{d}x)_c} \approx \frac{E\,Z}{1600 m_e c^2}$$

où E est l'énergie totale de l'électron incident et Z le numéro atomique du milieu. L'énergie pour laquelle la perte d'énergie par ionisation est égale à la perte d'énergie par rayonnement s'appelle **énergie critique**. Elle est donnée par :

حيث يمثل E الطاقة الكلية للإلكترون الساقط و Z الرقم الذري للوسط . الطاقة التي يكون عندها فقدان الطاقة بالتأين مساويا لفقدان الطاقة بالإشعاع تسمى **الطاقـــة الحرجـــة** و هي تعطى بالعلاقة :

$$E_c \approx \frac{1600\, m_e c^2}{Z} \approx \frac{817}{Z} \qquad \text{(MeV)}$$

Les interactions des photons de haute énergie avec la matière se résument à :

- l'**effet photoélectrique** qui consiste à l'éjection d'un électron lié de l'atome par le photon incident, l'énergie étant totalement cédée à l'électron ;

تتلخص تفاعلات الفوتونات العالية الطاقة مع المادة في :

- **الأثـــر الكهرضـــوئي** الذي يتمثل في طرد الفوتون الساقط لإلكترون ذري مقيد ، و فيها تنتقل طاقة الفوتون كلية للإلكترون .

- l’**effet Compton** qui est la diffusion élastique du photon incident par un électron libre de l’atome, le photon cédant seulement une partie de son énergie à l’électron ;
- la **création de paires** qui est la matérialisation du photon en une paire d’électron-positron au voisinage d’un noyau atomique :

- **أثر « كومبتـــن »** و هي الإستطارة المرنة للفوتون الساقط على إلكترون ذري حر ، و فيها ينتقل جزء فقط من طاقة الفوتون للإلكترون .
- **إنتـــاج الأزواج** و هو تحول طاقة الفوتون الساقط بجوار نواة ذرية إلى إلكترون و بوزيترون :

$$\gamma \rightarrow e^{-} + e^{+}$$

B) Types de détecteurs

ب) أصنـــاف الكواشـــف

Un détecteur de particules est un dispositif permettant de révéler le passage d’une particule, (ou d’un flux de particules), et d’en déduire quelques unes de ses caractéristiques. En physique nucléaire, ces appareils sont classés en :

- **Détecteurs à gaz** qui utilisent le phénomène de production d’ions et d’électrons au passage d’une particule incidente dans un gaz, ce qui induit un courant électrique mesurable ;
- **Scintillateurs** qui utilisent la scintillation produite dans un cristal déterminé par l’impact de la particule incidente ;
- **Détecteurs à semi-conducteurs** qui sont constitués d’un semi-conducteur, généralement un cristal unique de silicium (Si) ou de germanium (Ge).

الكاشف جهاز يمكن به الكشف عن مرور جسيم ما ، أو فيض جسيمات ، و استنتاج بعض خصائصها . في الفيزياء النووية ، تصنف عادة هذه الأجهزة إلى :

- **كواشـــف غازيـــة** تعتمد على تكون الإلكترونات و الأيونات نتيجة لسريان الجسيم الساقط في الغاز ، مما يولد تيارا كهربائيا قابلا للقياس .
- **كواشـــف وميضيـــة** تعتمد على الوميض الذي يحدث في بلورة من نوع معين عند مرور الجسيم الساقط خلالها ؛
- **كواشـــف شبه موصلـــة** و هي كواشف للجسيمات من شبه موصل ، يتكون عادة من بلورة وحيدة من السلسيوم (Si) أو الجرمانيوم (Ge) .

C) Radioprotection

ج) الوقايـــة من الإشعـــاع

Pour évaluer le risque sanitaire des rayonnements nucléaires, on a introduit la notion de **dose absorbée** D, qui est égale à l'énergie moyenne dε cédée à un volume élémentaire du milieu traversée divisée par la masse dm de ce volume :

لتقييم مدى خطورة الإشعاعات النووية على صحة الإنسان ، نستخدم عادة مصطلح **الجرعـــة المتصـــة** (dose absorbée) D ، و هي كمية الطاقة المتوسطة dε الممتصة من طرف حجم أولي للوسط المخترق مقسمة على كتلة هذا الحجم الأولي dm :

$$D = \frac{\mathrm{d}\varepsilon}{\mathrm{d}m}$$

L'unité de mesure de la dose dans le système international est le **gray** (Gy), mais il y a aussi une ancienne unité encore utilisée appelée **rad** :

وحدة قياس الجرعة في النظام العالمي هي **الغـــراي** ، رمزها Gy ، لكن هناك أيضا وحدة قديمة ما تزال متدوالة تدعى **الـــراد** (rad) :

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$$

Quand il s'agit de radioprotection, il est nécessaire de tenir compte des effets biologiques différents des rayonnements nucléaires. Pour ce faire, on associe à chaque type de rayonnement un facteur de pondération w_R, dont la valeur varie entre 1 et 20 (1 pour les photons et électrons et 20 pour les particules α). L'**équivalent de la dose** H est le produit de la dose absorbée D par le facteur de pondération w_R :

عندما يتعلق الأمر بالوقاية من الإشعاع النووي ، فإنه من الضروري أن نأخذ بعين الإعتبار الآثار البيولوجية المختلفة للإشعاعات النووية . لذلك نرفق كل صنف من الإشعاعات بعامل ترجيحي w_R ، تتراوح قيمته بين 1 و 20 (1 بالنسبة للفوتونات و الإلكترونات و 20 للجسيمات α) . **مكـــافئ الجرعـــة** H هو حاصل ضرب الجرعة الممتصة D في العامل الترجيحي w_R :

$$H = \sum_R D_R w_R$$

L'équivalent de la dose est donnée en **rem** quand la dose est donnée en rad. Cependant, quand on utilise l'unité du système international (Gy), elle est alors donée en **sievert** (Sv). On a :

يعطى مكافئ الجرعة بوحدة **الريـــم** (rem) عندما تعطى الجرعة الممتصة بوحدة الراد (rad) . لكن عندما نستعمل وحدة النظام العالمي (Gy) ، فإن مكافئ الجرعة يعطى حينها بوحدة **السيفـــرت** (Sv) . لدينا :

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

Problèmes

مسائـــل

1 **

Considérons la collision élastique frontale entre un électron au repos de masse m_e et une particule incidente lourde de masse M ($M >> m_e$), de vitesse **v** et d'énergie cinétique T. Calculer la vitesse v_e et l'énergie cinétique T_e acquises par l'électron après le choc.

نعتبر التصادم الرأسي المرن الذي يحدث بين إلكترون ساكن كتلته m_e و جسيمة ثقيلة كتلتها M ($M >> m_e$) و سرعتها **v** و طاقتها الحركية T . احسب سرعة الإلكترون v_e و طاقته الحركية T_e بعد الصدم .

2 **

En première approximation, le terme logarithmique de la formule de Bethe peut être négligé. Calculer le rapport des pouvoirs d'arrêts d'un matériau donné pour des particules α et des protons de même énergie cinétique $E_0 = 2$ MeV, d'abord sans tenir compte du terme logarithmique et, ensuite, en tenant compte de ce terme ($I = 120$ eV).

كتقريب أولي ، يمكن إهمال الحد اللوغاريتمي في معادلة « بات » . احسب النسبة بين قدرتي الإيقاف لوسط معين عند اختراقه من طرف جسيمات α و بروتونات بنفس الطاقة الحركية $E_0 = 2$ MeV ، أولا بإهمال هذا الحد ، ثم بأخذه بعين الإعتبار ($I = 120$ eV) .

__Réponse__ : 16 ; 10.

3 **

Un faisceau de particules α est incident sur une feuille d'aluminium d'épaisseur $d = 1$ µm. L'énergie cinétique de ces particules est égale à 10 MeV.

a) En supposant que le pouvoir d'arrêt est constant, calculer la perte d'énergie de ces particules lors de la traversée de la feuille.

b) Quelle épaisseur faut-il interposer pour ralentir les particules de 10 à 1 MeV.

تسقط حزمة من جسيمات α على صفيحة من الألومينيوم سمكها 1 µm . تساوي الطاقة الحركية لهذه الجسيمات 10 MeV .

أ) بافتراض أن قدرة الإيقاف ثابتة ، احسب فقدان الطاقة لهذه الجسيمات عند اختراقها الصفيحة .

ب) احسب سمك الصفيحة اللازم لخفض طاقة جسيمات α من 10 إلى 1 MeV .

E_α (MeV)	$-dE/dx$ (MeV/cm)	R (µm)
10	1400	129.9
1	3423	7.8

Réponse : **a)** 140 keV ; **b)** 122.1 µm.

4 **

En première approximation, la perte d'énergie par bremsstrahlung est proportionnelle à Z^2E, où E est l'énergie totale de l'électron et Z le numéro atomique du milieu traversé, alors que la perte d'énergie par ionisation est proportionnelle à Z. Quand E est exprimée en MeV, le rapport des deux coefficients de proportionnalité est approximativement égal à $k = 1/800$. Calculer l'énergie critique E_c et le rendement de freinage pour :

كتقريب أولي ، يتناسب فقدان الطاقة بالإشعاع مع Z^2E ، حيث يمثل E الطاقة الكلية للإلكترون و Z الرقم الذري للوسط الذي يمر به ، و يتناسب فقدان الطاقة بالتأين مع Z . عندما نعبر عن الطاقة بالوحدة MeV ، تعادل النسبة بين معاملي التناسب $k = 1/800$. احسب الطاقة الحرجة E_c و مردود الكبح بالنسبة لِـــ :

أ) الرصاص $(Z = 82)$.

ب) الكربون $(Z = 6)$.

a) le plomb (Z = 82) ;

b) le carbone (Z = 6).

$E = 10$ MeV

Réponse : **a)** 10 MeV ; 50% ; **b)** 133 MeV ; 7%.

5 **

بين أن إنتاج زوج إلكترون – بوزترون من طرف فوتون لا يحدث :

أ) إلا إذا كانت طاقة الفوتون أكبر من $2m_ec^2$ حيث يمثل m_e كتلة الإلكترون في حالة السكون ؛

ب) إلا في جوار نواة ذرية .

Monter que la production d'une paire électron-positron par un photon ne peut avoir lieu :

a) que si l'énergie du photon est supérieure à $2m_ec^2$ où m_e est la masse de l'électron au repos ;

b) qu'au voisinage d'un noyau atomique.

6 **

النكليد المشع $^{131}_{53}I$ ينحل بإصدار الإشعاع β^- ليعطينا الزينون (Xe) . عمر النصف الإشعاعي لهذا العنصر يساوي 8 أيام . عندما يشرب شخص محلولا من هذا النكليد المشع ، 35% من هذا النكليد تستقر في الغدة الدرقية ، ثم تتخلص منه الغدة الدرقية بعد ذلك في زمن يتميز بعمر نصف قدره 5 أيام . لإجراء فحص الغدة الدرقية ، يشرب مريض محلولا من هذا النكليد نشاطه الإشعاعي يساوي 40 µCi .

Le radioélément $^{131}_{53}I$ se désintègre par émission β^- pour donner le xénon (Xe). Sa période radioactive est de 8 jours. Lorsqu'une personne ingère une solution contenant ce radioélément, 35% de ces radioéléments se fixent sur la thyroïde. Cette glande les élimine par la suite avec une période effective de 5 jours. Pour réaliser un examen thyroïdien, un patient ingère une solution de ce radioélément d'activité égale à 40 µCi.

a) Quelle masse de ce radioélément a-t-on utilisée ?

b) Quelle est l'activité de ce radioélément sur la thyroïde le jour de l'examen et 2 jours après.

c) La masse de la thyroïde est d'environ 40 g. Calculer la dose absorbée D et l'équivalent de la dose H au niveau de cette glande si l'énergie mayenne des β émis est 0.2 MeV.

أ) ما هي الكتلة المستعملة من هذا النكليد المشع ؟

ب) ما هو النشاط الإشعاعي لهذا النكليد المشع على مستوى الغدة الدرقية يوم الفحص و يومين بعد ذلك ؟

ج) كتلة الغدة الدرقية تساوي تقريبا 40 g . احسب الجرعة الممتصة D و مكافئ الجرعة H على مستوى هذه الغدة مع العلم أن الطاقة المتوسطة للإلكترونات β المنبعثة تساوي 0.2 MeV .

__**Réponse**__ : **a)** 2.1×10^{-12} g ; **b)** 14 µCi ; 11 µCi ; **c)** 0.26 Sv.

6. Réactions nucléaires

6. التفاعـــلات النوويـــة

La **réaction nucléaire** typique s'écrit sous la forme :

التفاعــل النـــووي النموذجي يكتب على الشكل التالي :

$$a + X \rightarrow Y + b$$

et sous forme condensée :

و بشكل مختصر :

$$X(a, b)Y$$

où a représente le **projectile** et X la **cible**. Y et b sont les **produits de la réaction**. En général, les noyaux X et Y sont lourds, et les noyaux a et b légers. Par ailleurs, le noyau b est généralement **détectable** au contraire du **noyau résiduel** Y.

حيث يمثل a **النـــواة القذيفـــة** ، و X **النـــواة المستهدفـــة أو الهـــدف** ، أما b و Y فهما **منتـــجا التفاعـــل** . عموما ، تكون النواتان X و Y ثقيلتين ، و النواتان a و b خفيفتين . من جهة أخرى ، تكون عادة النواة b **قابلـــة للكشـــف** على عكس **النـــواة المتبقيـــة** Y .

A) Lois de conservation

أ) قوانيـــن الحفـــظ

Soit une réaction nucléaire dans sa forme générale :

نعتبر تفاعلا نوويا في شكله العام :

$$(1) + (2) \rightarrow (3) + (4)$$

La charge électrique de ce système se conserve :

الشحنة الكهربائية لهذا لنظام تنحفظ :

$$q_1 + q_2 = q_3 + q_4$$

و كذلك كمية الحركة :

ainsi que la quantité de mouvement :

$$\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \mathbf{p}_3 + \mathbf{p}_4$$

و الطاقة الكلية :

et l'énergie totale :

$$m_1c^2 + T_1 + m_2c^2 + T_2 = m_3c^2 + T_3 + m_4c^2 + T_4$$

تمثل m_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ كتل مختلف النوى و T_i الطاقة الحركية . تعرف **القيمـــة Q للتفاعـــل** كالتالي :

m_i $(i = 1, 2, 3, 4)$ représente la masse des différents noyaux et T_i l'énergie cinétique. La **valeur Q de la réaction** est définie par :

$$Q = [(m_1 + m_2) - (m_3 + m_4)]c^2 = (T_3 + T_4) - (T_1 + T_2)$$

إذا كانت Q منعدمة ، كان التفاعل **مرنـــا** ، و إذا كانت غير منعدمة ، كان التفاعل **غير مـــرن** . عندما تكون Q موجبة ، يكون التفاعل **منتجـــا للطاقـــة** ، و عندما تكون سالبة ، يكون التفاعل **ماصـــا للطاقـــة** . هذا الأخير لا يحدث إلا بتوفير قدر من الطاقة . الحد الأدنى من طاقة القذيفة الحركية E_{th} اللازمة لإحداث تفاعل نووي ماص للطاقة يدعى **عتبـــة الطاقـــة** .

Si $Q = 0$, la réaction est **élastique**, sinon elle est **inélastique**. Si $Q > 0$, la réaction est **exo-énergétique**, et si $Q < 0$, elle est **endo-énergérique**. Dans ce dernier cas, la réaction n'est possible que si l'on fournit au système une certaine quantité d'énergie. L'énergie cinétique minimale E_{th} qu'il faut fournir au projectile pour qu'une réaction endoénergétique puisse avoir lieu est appelée **seuil d'énergie**.

B) Système du centre de masse

ب) نظـــام مركـــز الكتلـــة

Le **système du centre de masse** est le système qui se déplace avec le centre de masse. La quantité de mouvement totale dans ce système **inertiel** est nulle :

نظـــام مركـــز الكتلـــة هو هيكل الإسناد الذي يتحرك مع مركز الكتلة ، و هو نظام **عطـــالي** و كمية الحركة الكلية فيه منعدمة :

$$\mathbf{p}_1^* + \mathbf{p}_2^* = \mathbf{p}_3^* + \mathbf{p}_4^* = \mathbf{0}$$

C) Seuil d'énergie

ج) عتبـــة الطاقـــة

Pour calculer le seuil d'énergie E_{th} d'une réaction nucléaire endo-thermique $(1 + 2 \rightarrow 3 + 4)$, on suppose que l'énergie totale dans le système du centre de masse E^* est au moins égale à la somme des masses des produits $(E^* = m_3c^2 + m_4c^2)$, d'où :

لحساب عتبة الطاقة E_{th} لتفاعل نووي ماص للحرارة $(1 + 2 \rightarrow 3 + 4)$ ، نفترض أن الطاقة الكلية في نظام مركز الكتلة E^* يساوي على الأقل حاصل جمع كتل المنتجات $(E^* = m_3c^2 + m_4c^2)$ ، و منه :

$$\boxed{E_{\text{th}} = -\frac{M}{2m_2}Q}$$

où m_2 est la masse de la cible, au repos dans le système du laboratoire, et M la masse totale :

حيث تمثل m_2 كتلة الهدف الساكن في نظام المخبر ، و M الكتلة الإجمالية :

$$M = m_1 + m_2 + m_3 + m_4$$

D) Section efficace | د) المقطـــع الفعـــال

La **section efficace** σ exprime la probabilité d'une certaine interaction entre des noyaux incidents et des noyaux cibles. Nous avons :

يعبر **المقطـــع الفعـــال** σ عن احتمال تفاعل معين بين نوى ساقطة و نوى مستهدفة . لدينا :

$$\frac{\Delta N}{N} = \sigma\, n\, \mathrm{d}x$$

où $\Delta N/N$ est la proportion des particules incidentes interagissant par unité de temps (c'est aussi la probabilité de l'interaction), n la densité des noyaux dans la cible et dx l'épaisseur de la cible. Nous avons aussi :

حيث تمثل $\Delta N/N$ نسبة الجسيمات الساقطة التي تتفاعل في وحدة الزمن (و هي تمثل أيضا احتمال التفاعل) ، و n كثافة النوى التي تشكل الهدف ، و dx سمك الهدف . لدينا أيضا :

$$\sigma = \frac{R}{I}$$

où R est le nombre d'interactions par unité de temps pour chaque noyau cible et I le nombre de particules incidentes par unité de temps et de surafce. La section efficace σ dépend généralement de la direction du détecteur définie par les angles θ et φ, et de l'énergie E des particules incidentes. Homogène à une surface, elle est souvent exprimée en barns (b) :

حيث يمثل R عدد التفاعلات في وحدة الزمن لكل نواة مستهدفة و I عدد الجسيمات الساقطة في وحدة الزمن و المساحة . عموما يتوقف المقطع الفعال σ على اتجاه الكاشف المعرف بالزاويتين θ و φ و كذلك على الطاقة E للجسيمات الساقطة ، و هو متجانس مع المساحة و يعطى غالبا بوحدة البارن (barn) ، رمزها b :

$$1\ \mathrm{b} = 10^{-28}\ \mathrm{m}^2$$

E) Section efficace de Rutherford

ه) استطـــــارة « روذرفـــورد »

La **diffusion de Rutherford** exprime la diffusion des particules chargées par les noyaux atomiques, suite à l'interaction entre les charges. Dans ce phénomène, l'angle de diffusion θ est lié au **paramètre d'impact** b par la relation :

استطـــارة « روذرفـــورد » هي استطارة الجسيمات المشحونة عن النوى الذرية نتيجة للفعل المتبادل بين الشحنات . في هذه الظاهرة ، ترتبط زاوية الإنحراف θ **بمتغيـــر التصـــادم** b من خلال العلاقة :

$$\tan\frac{\theta}{2}=\frac{b_0}{b}\ ;\ b_0=\frac{q_1q_2}{4\pi\varepsilon_0\mu v_0^2}$$

où q_1 et q_2 sont les charges respectives de la particule incidente et du noyau cible, μ la masse réduite et v_0 la vitesse initiale de la particule incidente. La **section efficace différentielle** de cette interaction est donnée par :

حيث تمثل q_1 و q_2 شحنتي الجسيمة الساقطة و النواة المستهدفة على التوالي ، و μ الكتلة المختزلة ، و v_0 السرعة الإبتدائية للجسيمة الساقطة . **المقطـــع الفعـــال التفاضـــلي** لهذا التفاعل يعطى بالعلاقة :

$$\frac{d\sigma}{d\Omega}=\frac{b_0^2}{4\sin^4(\theta/2)}$$

Problèmes

مسائـــل

1 *

Déterminer les particules manquantes des réactions nucléaires suivantes :

عين الجسيمات الناقصة للتفاعلات النووية التالية :

$^{84}_{36}Kr(\ldots, n)^{84}_{37}Rb$; $^{52}_{24}Cr(\ldots, p)^{52}_{23}V$; $^{74}_{32}Ge(d, p)\ldots$; $^{32}_{16}S(\ldots, \gamma)^{36}_{18}Ar$

2 **

Un noyau de masse m_1 et de quantité de mouvement $\mathbf{p_1}$, parallèle à l'axe x'x, entre en collision avec un deuxième noyau, au repos dans le système du laboratoire, de masse m_2. On suppose que le choc est élastique et que les deux noyaux, après la collision, se déplacent parallèlement à l'axe x'x. Leurs quantités de mouvement sont alors $\mathbf{p_1'}$ et $\mathbf{p_2'}$.

a) Calculer l'énergie cinétique T_2' du deuxième noyau après le choc en fonction de l'énergie cinétique T_1 du noyau incident.

b) Etudier les cas suivants : $m_1 = m_2$; $m_1 >> m_2$; $m_2 >> m_1$.

تصطدم نواة كتلتها m_1 و كمية حركتها $\mathbf{p_1}$ ، موازية للمحور $x'x$ ، بنواة ثانية ساكنة في نظام المخبر ، كتلتها m_2 . نفترض أن التصادم مرن و أن النواتين بعد الصـــدم تتحركان بالموازاة مع المحور x'x و أن كميتي حركتيهما تساويان $\mathbf{p_1'}$ و $\mathbf{p_2'}$.

أ) اكتب الطاقة الحركية T'_2 للنواة الثانية بعد الصدم بدلالة الطاقة الحركية T_1 للنواة الساقطة .

ب) ادرس الحالات التالية : $m_1 = m_2$ ؛ $m_1 >> m_2$ ؛ $m_2 >> m_1$.

3 **

Un noyau de masse m et d'énergie cinétique T_1 entre en collision avec un noyau identique au repos dans le système du laboratoire. En supposant que le choc est élastique, calculer l'angle θ entre les directions des deux noyaux après le choc.

تصطدم نواة كتلتها m و طاقتها الحركية T_1 بنواة مماثلة ساكنة في نظام المخبر . بافتراض أن التصادم مرن ، احسب الزاوية θ التي يصنعها اتجاها النواتين بعد الصدم .

Réponse : 90°.

4 **

Un noyau d'uranium de masse m, au repos dans le système du laboratoire, se désintègre en deux autres noyaux de masses m_1 et m_2. Calculer l'énergie cinétique de chaque noyau produit en fonction de la valeur Q de cette réaction.

تنشطر نواة كتلتها m ساكنة في نظام المخبر إلى نواتين أخريين كتلة الأولى m_1 و الثانية m_2 . احسب الطاقة الحركية لكل نواة منتجة بدلالة القيمة Q لهذا التفاعل .

$$m_1 = 90 \text{ u} \quad ; \quad m_2 = 140 \text{ u} \quad ; \quad Q = 190 \text{ MeV}$$

Réponse : 74 MeV ; 116 MeV.

5 **

On bombarde des noyaux de lithium ($^7_3$Li) avec des deutérons (d) d'énergie cinétique égale à 10 MeV. On suppose que les neutrons (n) produits dans cette réaction sortent en faisant un angle droit (90°) avec la direction des projectiles.

نقوم بقذف نوى من الليتيوم ($^7_3$Li) بنوى من الدوتريوم (d) تعادل طاقتها 10 MeV . النوترونات (n) الناتجة عن هذا التفاعل تصدر صانعة مع اتجاه ورود القذائف زاوية قدرها 90 درجة .

a) Ecrire l'équation de cette réaction.

b) Calculer l'énergie cinétique des neutrons produits.

c) Calculer l'énergie de recul des noyaux de béryllium ($^{8}_{4}$Be) produits dans cette réaction, ainsi que leur direction .

أ) اكتب معادلة هذا التفاعل .

ب) احسب طاقة النوترونات المنتجة .

ج) احسب طاقة ارتداد نوى البرليوم ($^{8}_{4}$Be) الناتجة عن هذا التفاعل ، و كذلك اتجاه حركتها .

	d	$^{7}_{3}$Li	$^{8}_{4}$Be	N
m (u)	2.014102	7.016003	8.005305	1.008665

__Réponse__ : **b)** 20 MeV ; **c)** 5 MeV, 45°.

6 *

Calculer la valeur Q et le seuil d'énergie E_{th} de la réaction nucléaire suivante sachant que la cible ($^{35}_{17}$Cl) est initialement au repos :

احسب القيمة Q ثم عتبة الطاقة E_{th} للتفاعل النووي التالي مع العلم أن الهدف ($^{35}_{17}$Cl) ساكن في البداية :

$$\alpha + {}^{35}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{38}_{19}\text{K} + \text{n}$$

	α	$^{35}_{17}$Cl	$^{38}_{19}$K	N
m (u)	4.002603	34.968853	37.969080	1.008665

__Réponse__ : −5.7 MeV ; 6.5 MeV.

7 ***

En 1919, Rutherford découvrit le proton en bombardant des noyaux d'azote au repos avec des particules α :

سنة 1919 م ، اكتشف « روذرفورد» البروتون عند قذف نوى آزوت ساكنة بجسيمات α :

$${}^{14}_{7}N(\alpha, p){}^{17}_{8}O$$

a) Montrez que cette réaction nucléaire est endothermique, puis calculez son seuil d'énergie E_s.

b) En supposant que l'énergie cinétique des particules α utilisées par Rutherford est égale à 6.25 MeV, calculez l'énergie cinétique T_p des protons produits sachant qu'ils sont émis dans une direction faisant un angle de 60° avec la direction d'incidence.

c) Calculer l'énergie des noyaux d'oxygène et leur direction.

أ) بين أن هذا التفاعل النووي ماص للحرارة ثم احسب عتبة الطاقة E_s لهذا التفاعل .

ب) بافتراض أن الطاقة الحركية لجسيمات α التي استخدمها « روذرفورد » تساوي 6.25 MeV ، احسب الطاقة الحركية T_p للبروتونات المنتجة علما أنها تصدر في اتجاه يصنع زاوية مع اتجاه الورود قدرها 60° .

ج) احسب طاقة ارتداد نوى الأكسيجين و اتجاه حركتها .

	p	α	${}^{14}_{7}N$	${}^{17}_{8}O$
m (u)	1.007825	4.002603	14.003074	16.999131

<u>Réponse</u> : **a)** –1.2 MeV ; ; **b)** 3.4 MeV ; **c)** 1.1 MeV ; 49° .

8 **

On considère la diffusion coulombienne d'un proton de masse m_p et de charge e par un noyau de masse $M \approx Am_p$ ou A est le nombre de masse ($A >> 1$) et de charge Ze. Soit E_k l'énergie cinétique initiale du proton.

a) Calculer la paramètre d'impact b correspondant à un angle de diffusion égale à 90°.

b) Calculer la section efficace des interactions ayant lieu avec un angle de diffusion supérieur à 90°.

نعتبر التفاعل الكولومبي بين بروتون كتلته m_p و شحنته e و نواة كتلتها $M \approx Am_p$ حيث يمثل A العدد الكتلي ($A >> 1$) و شحنتها Ze . لتكن E_k الطاقة الحركية الإبتدائية للبروتون .

أ) احسب متغير التصادم b الذي يؤدي إلى زاوية انحراف قدرها 90° .

ب) احسب المقطع الفعلي للتفاعلات التي تحدث بزاوية انحراف أكبر من 90 درجة .

$E_k = 10$ MeV ; $Z = 26$

<u>Réponse</u> : **a)** 1.9×10^{-15} m ; **b)** 11 b.

9 **

On bombarde une cible de calcium ($^{48}_{20}$Ca) constituée de 1.3×10^{19} noyaux/cm^3 avec un faisceau de particules dont l'intensité du courant électrique est égale à 10 nA. Un détecteur d'angle solide 2×10^{-3} sr mesure 15 protons par seconde. On supposant que la distribution angulaire est isotrope, calculer la section efficace de la réaction nucléaire $^{48}_{20}\mathrm{Ca}(\alpha, \mathrm{p})$.

نقوم بقذف هدف من الكالسيوم ($^{48}_{20}$Ca) مكون من 1.3×10^{19} نواة لكل cm^3 بحزمة من جسيمات α شدة تيارها الكهربائي تساوي 10 nA . كاشف زاويته الصلبة تساوي 2×10^{-3} sr يقيس 15 بروتونا في كل ثانية. بافتراض أن التوزيع الزاوي متناح ، احسب المقطع الفعال الكلي للتفاعل النووي $^{48}_{20}\mathrm{Ca}(\alpha, \mathrm{p})$.

<u>Réponse</u> : **a)** 1.9×10^{-15} m ; **b)** 11 b.

7. Energie nucléaire

7. الطاقـــة النوويـــة

L'**énergie nucléaire** est l'une des importantes applications de la physique nucléaire. Cette énergie libérée par le noyau atomique lors des réactions de **fission** ou de **fusion** nucléaires est exploitée dans la fabrication de bombes atomiques mais aussi dans la prodution d'électricité par les réacteurs nucléaires. C'est aussi l'énergie émise par le soleil et toutes les autres étoiles de l'Univers.

الطاقـــة النوويـــة من أهم تطبيقات الفيزياء النووية . هذه الطاقة التي تحررها النواة الذرية خلال تفاعلات **الانشطـــار** و **الانصهـــار** النوويين تستغل في صناعة القنابل النووية و كذلك في إنتاج الكهرباء من طرف المفاعلات النووية . و هي أيضا الطاقة التي تصدرها الشمس و مختلف النجوم الأخرى للكون .

A) Fission nucléaire

أ) الانشطـــار النـــووي

Quand un noyau lourd (A > 230) absorbe un neutron incident, il se forme parfois un noyau composé qui se casse en deux fragments nucléaires tout en emettant quelques neutrosn supplémentaires. Ce type de réaction constiue la fission nucléaire. Une réaction typique est :

عندما تمتص نواة ثقيلة نوترونا ساقطا ، فإنها تتحول أحيانا إلى نواة مركبة و تنشطر إلى شظيتين نوويتين مصدرة في نفس الوقت بعض النوترونات الإضافية . هذا النوع من التفاعلات يمثل **انشطـــارا نوويـــا** . التفاعل النموذجي هو :

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{A_1}_{Z_1}\mathrm{X} + ^{A_2}_{Z_2}\mathrm{Y} + \varepsilon\, ^{1}_{0}\mathrm{n}$$

où $Z_1 + Z_2 = 92$ et $A_1 + A_2 + \varepsilon = 236$ (ε est un entier).

بحيث $Z_1 + Z_2 = 92$ و $A_1 + A_2 + \varepsilon = 236$ (ε عدد صحيح) .

Le rapport des masses des fragments de fission est approximativement égal à 3/2. La valeur de ε varie de 2 à 3.

النسبة بين كتلتي الشظيتين في الانشطار تعادل تقريبا 3/2 . قيمة ε تتراوح بين 2 و 3 .

B) Fusion nucléaire

ب) الإنصهـــار النــــووي

Une **réaction de fusion** est une réaction au cours de laquelle deux noyaux relativement légers ($A < 20$) se combinent pour former un noyau plus lourd en libérant de l'énergie. Une réaction de fusion typique est la formation d'un deuton à partir d'un proton et d'un neutron, de même que la formation d'une particule α par la fusion de deux deutons :

الانصهار النووي تفاعل يحدث خلاله اتحاد نواتين خفيفتين نسبيا (A < 20) لتكونا نواة أثقل محررة في نفس الوقت كمية من طاقة . كتفاعل انصهار نووي ، نذكر تشكيل دوتون انطلاقا من بروتون و نوترون ، و كذلك تشكيل جسيمة بعد انصهار دوتونين :

$$ {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow {}^{2}_{1}\mathrm{H} \qquad (Q = 2.23\ \mathrm{MeV}) $$

$$ {}^{2}_{1}\mathrm{H} + {}^{2}_{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad (Q = 23.8\ \mathrm{MeV}) $$

Bien que ces énergies soient beaucoup moins élevées que celle libérée au cours d'une réaction typique de fission (de l'ordre de 200 MeV), l'énergie par unité de masse est bien plus élevée, compte tenu des masses plus petites des particules concernées.

بالرغم من أن هذه الطاقات أقل من الطاقة المحررة خلال تفاعل انشطار نووي ، فإن الطاقة في وحدة الكتلة أكبر بالنظر إلى الكتل الأصغر للجسيمات المتفاعلة .

Des réactions connues sous le nom de **cycle de carbone ou de Bethe** et **cycle proton-proton ou de Critchfield** sont supposées se produire à l'intérieur des étoiles.

نعتقد أنه يحدث بداحل النجوم تفاعلات انصهار نووي تعرف باسم **دورة الكربـــون** أو **دورة « بـــات »** و كذلك **دورة البروتـــون-بروتـــون** أو **دورة « كريتشفيلـــد »** .

Problèmes

مسائـــل

1 **

En moyenne, les neutrons perdent la moitié de leur énergie par collision avec des protons quasi-libres. Combien faut-il, en moyenne, de collisions pour réduire l'énergie d'un neutron de 2 MeV à une énergie thermique de 0.04 eV ?

تفقد النوترونات نصف طاقتها ، كقيمة متوسطة ، عند اصطدامها ببروتونات شبه حرة . ما هي القيمة المتوسطة للتفاعلات اللازمة لتقليص طاقة نوترون من 2 MeV إلى الطاقة حرارية 0.04 MeV .

Réponse : 26.

2 **

La fission d'un noyau de $^{235}_{92}U$ par un neutron produit environ 185 MeV d'énergie utilisable. Si un réacteur nucléaire à $^{235}_{92}U$ a une puissance de 100 MW, combien lui faudra t-il de temps pour consommer 1 kg d'uranium ?

انشطار نواة $^{235}_{92}U$ من طرف نوترون يحرر حوالي 185 MeV من الطاقة القابلة للاستعمال . إذا كانت قدرة مفاعل نووي يعمل بالنواة $^{235}_{92}U$ تساوي 100 MW ، ما هو الوقت الازم لاستهلاك 1 kg من اليورانيوم ؟

Réponse : 9 j.

3 **

Quelle est l'énergie libérée quand 2 noyaux de deutérium donnent par fusion une particule α?

ما هي الطاقة المحررة عندما تنصهر نواتان من الدوتريوم لتشكيـــل جسيمة α ؟

$$m_d = 2.014102 \text{ u} \; ; \; m_\alpha = 4.002603 \text{ u}$$

Réponse : 24 MeV.

4 **

Calculer l'énergie libérée dans le cycle du carbone (Bethe).

احسب الطاقة المحررة في دورة الكربون (« بات ») .

$$p + {}^{12}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{13}_{7}\text{N}$$

$${}^{13}_{7}\text{N} \rightarrow {}^{13}_{6}\text{C} + e^{+} + \nu_e$$

$$p + {}^{13}_{6}\text{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\text{N}$$

$$p + {}^{14}_{6}\text{N} \rightarrow {}^{15}_{8}\text{O}$$

$${}^{15}_{7}\text{O} \rightarrow {}^{15}_{6}\text{N} + e^{+} + \nu_e$$

$$p + {}^{15}_{6}\text{N} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

On donne :

$$m_p = 1.007825 \text{ u} \; ; \; m_\alpha = 4.002603 \text{ u}$$

Réponse : 25 MeV.

Problèmes supplémentaires

مسائــــل إضافيــــة

1 ***

En supposant que le noyau atomique du nucléide $^{176}_{71}\mathrm{Lu}$ est un ellipsoïde de petit axe a et de grand axe b, calculer a et b sachant que le moment quadripolaire Q de ce nucléide vaut 8.0 b.

بافتراض أن النواة الذرية للنكليد $^{176}_{71}\mathrm{Lu}$ لها شكل قطع مكافئ ثلاثي الأبعاد نصف محوره الصغير a و الكبير b ، احسب a و b مع العلم أن العزم رباعي الأقطاب الكهربائي Q لهذا النكليد يساوي 8.0 b .

Réponse : 6 fm ; 8 fm.

2 **

Un proton de masse m_1 et de vitesse v_1 entre en collision de manière élastique avec une particule de masse m_2 au repos dans le système du laboratoire. Après le choc, le proton est dévié d'un angle $\theta = 60°$, alors que la particule cible fait un angle $\varphi = 30°$ avec la direction d'incidence.

a) En utilisant le principe de conservation de la quantité de mouvement, exprimer les vitesses v_1' et v_2' du proton et la cible après collision en fonction de v_1 et des masses m_1 et m_2.

b) Calculer le rapport m_1/m_2. Que déduire ?

يصطدم بروتون كتلته m_1 و سرعته v_1 بصورة مرنـــة بجسيم ساكن في نظام المخبر كتلته m_2 . بعد الصدم ، ينحرف البروتون بزاوية $\theta = 60°$ ، بينما يصنـــع الجسيم الهدف الزاوية $\varphi = 30°$ مع اتجاه الورود .

أ) باستخدام مبدإ حفظ كمية الحركة ، اكتب السرعة v_1' و v_2' للبروتون و الهدف بعد الصـــدم بدلالة v_1 و الكتل m_1 و m_2 .

ب) احسب النسبة m_1/m_2 . ماذا تستنتج ؟

$$\cos 60^\circ = \sin 30^\circ = \frac{1}{2} \;;\; \cos 30^\circ = \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

Réponse : **c)** 1.

3 ***

Un noyau (1) de masse m_1 et de vitesse $\mathbf{v_1}$ entre en collision élastique avec un noyau (2) de masse m_2 initialement au repos.

a) On se place tout d'abord dans le système du laboratoire. On appellera v'_1 et v'_2 les vitesses des noyaux (1) et (2) après la collision ; θ_1 et θ_2 les angles que font $\mathbf{v'_1}$ et $\mathbf{v'_2}$ avec l'axe Ox. Ecrire les équations de conservation. Peut-on résoudre le système d'équations obtenu?

b) On se place maintenant dans le système du centre de masse. Ecrire les vitesse V_1 et V_2 des noyaux (1) et (2) avant la collision ainsi que les vitesses V'_1 et V'_2 des deux noyaux après la collision en fonction de v_1 (On appellera θ l'angle que fait $\mathbf{V'_1}$ avec Ox).

c) Trouver la relation entre θ et θ_1.

d) Ecrire l'énergie cinétique E'_{k2} du noyau (2) après la collision dans le système du laboratoire en fonction de l'énergie cinétique E_{k1} du noyau (1) avant la collision dans le même système et l'angle θ.

نواة (1) كتلتها m_1 و سرعتها v_1 تصطدم بصورة مرنة بنواة (2) كتلتها m_2 ساكنة في البداية .

أ) نعتبر أولا نظام المخبر . ليكن v'_1 و v'_2 سرعتي النواتين (1) و (2) بعد الصدم ، و θ_1 و θ_2 الزاويتين اللتان تصنعهما $\mathbf{v'_1}$ و $\mathbf{v'_2}$ مع المحور Ox . اكتب قوانين الحفظ . هل من الممكن حل جملة المعادلات المتحصل عليها ؟

ب) نعتبر الآن نظام مركز الكتلة . اكتب السرعتين V_1 و V_2 للنواتين (1) و (2) قبل الصدم و كذلك السرعتين V'_1 و V'_2 للنواتين بعد الصدم بدلالة v_1 (تصنع السرعة $\mathbf{V'_1}$ الزاوية θ مع المحور Ox) .

ج) أوجد العلاقة التي تربط بين الزاويتين θ و θ_1 .

د) اكتب الطاقة الحركية E'_{k2} للنواة (1) بعد الصدم في نظام المخبر بدلالة الطاقة الحركية E_{k1} للنواة (1) قبل الصدم في نفس النظام و الزاوية θ .

4 ***

A : En 1930, le physicien allemand Bothe et son étudiant Becker remarquèrent, en bombardant des noyaux de béryllium (^9_4Be), au repos, avec des particules α, qu'il se forme un rayonnement inconnu, électriquement neutre. Croyant que ce dernier était le rayonnement γ, ils écrivirent la réaction nucléaire en question de la façon suivante :

أولا : عام 1930 م ، لاحظ الفيزيائي الألماني بُوث و طالبه بِيكَر أنه حين نقوم بقذف نوى البرليوم (^9_4Be) الساكنة بجسيمات α ، نحصل على إشعاع مجهول غير مشحون ، اعتقدا أنه الإشعاع غاما (γ) مما جعلهما يكتبان هذا التفاعل النووي على النحو التالي :

$$^4_2\alpha + {}^9_4Be \rightarrow {}^{13}_6C + {}^0_0\gamma$$

Sachant que l'énergie cinétique des particules α incidentes est égale à 5.30 MeV, calculer l'énergie maximale qu'on puisse communiquer aux photons γ dans cette réaction. On donne :

إذا علمت أن الطاقة الحركية لجسيمات α الساقطة تعادل 5.30 MeV ، احسب الطاقة القصوى التي يمكن أن تحصل عليها الفوتونات γ . لدينا :

	α	^9_4Be	$^{13}_6C$
m (u)	4.001506	9.012182	13.003355

B : En 1931, les deux physiciens français Joliot-Curie constatèrent que le rayonnement inconnu de la question précédente, en traversant une cible de paraffine au repos, produit des protons d'énergie cinétique maximale égale à 7.5 MeV. L'interaction ayant lieu ici est en réalité une diffusion élastique (en supposant que le rayonnement inconnu est toujours le rayonnement γ) :

ثانيـــا : سنة 1931 م ، لاحظ الفيزيائيان الفرنسيان جُولِيو-كوري أنه حين يخترق الإشعاع المجهول للسؤال الأول هدفا ساكنا من البرافين ، نحصل على بروتونات تعادل طاقتها القصوى 7.5 MeV . التفاعل الذي يحدث هنا هو في الواقع استطارة مرنة (بافتراض دائما أن الإشعاع المجهول هو الإشعاع γ) :

$$\gamma + p \rightarrow \gamma + p$$

Sachant que l'énergie cinétique des protons produits est maximale quand la collision est frontale, c'est-à-dire que les photons produits rebondissent en arrière en faisant un angle de 180° avec la direction d'incidence, calculer dans ce cas l'énergie des photons incidents. Que déduire ? On donne : m_p = 938.28 MeV/c^2

C : En 1932, le physicien anglais Chadwick supposa que le rayonnement inconnu de la première question était en fait composé de particules neutres de masse sensiblement égale à celle du proton, appelées par la suite neutrons. Répondre de nouveau aux questions A et B en utilisant cette hypothèse, c'est-à-dire qu'on remplace, dans les deux réactions le photon γ par le neutron n :

إذا علمت أن طاقة البروتونات الصادرة تكون قصوى في حالة ما إذا كان التصادم رأسيا ، أي أن الفوتونات الواردة ترتد تماما بعد التفاعل إلى الوراء صانعة زاوية قدرها 180° مع اتجاه الورود ، احسب في هذه الحالة طاقة الفوتونات الواردة . ماذا تستنتج ؟ لدينا : m_p = 938.28 MeV/c^2

ثالثــا : سنة 1932 م ، افترض الفيزيائي الإنجليزي شادويك أن الإشعاع المجهول للسؤال الأول هو في الواقع عبارة عن جسيمات محايدة ذات كتلة تعادل تقريبا كتلة البروتونات ، سميت فيما بعد النوترونات . أجب مجددا عن السؤالين الأول و الثاني باعتماد هذه الفرضية ، أي أننا نستبدل في التفاعلين الفوتون γ بالنوترون n :

Réponse : **A)** 15 MeV ; **B)** 63 MeV ; **C)** 18 MeV ; 7.5 MeV.

Références المراجـــع

M. Alonso and E. J. Finn, *Physics*, Addison-Wesley (1992).

W. N. Cottingham, *An introduction to nuclear physics*, Cambridge (2001).

R. Gautreau et W. Savin, *Physique moderne*, Série Schaum, McGraw-Hill (1981).

K. S. Krane, *Introductory nuclear physics*, John Wiley & Sons (1988).

L. Valentin, *Physique subatomique, noyaux et particules*, Hermann (1982).

Tables des matières — المحتويـــات

	Page / الصفحة	
1. Introduction	7	1. مقدمــة
2. Noyau atomique	13	2. النــواة الذريــة
3. Modèles nucléaires	21	3. النمــاذج النوويــة
4. Radioactivité	29	4. النشــاط الإشعــاعي
5. Rayonnements nucléaires	37	5. الإشعاعــات النوويــة
6. Réactions nucléaires	45	6. التفاعــلات النوويــة
7. Energie nucléaire	55	7. الطاقــة النوويــة
Problèmes supplémentaires	61	مسائــل إضافيــة
Références	65	المراجــع

Constantes physiques — الثوابت الفيزيائية

Constantes physiques		الثوابت الفيزيائية
Vitesse de la lumière dans le vide (c)	299 792 458 m/s ≈ 3×10^{8} m/s	سرعة الضوء في الفراغ (c)
Constante de Planck réduite (ħ)	1.054×10^{-34} J s	ثابت « بلانك » المختزل (ħ)
Charge élémentaire (e)	1.602×10^{-19} C	الشحنة الأولية (e)
Masse de l'électron (m_e)	0.511 MeV/c^2 = 9.109×10^{-31} kg	كتلة الإلكترون (m_e)
Masse du proton (m_p)	938.272 MeV/c^2 = 1.673×10^{-27} kg = 1.007276 u	كتلة البروتون (m_p)
Masse du neutron (m_n)	939.565 MeV/c^2 = 1.675×10^{-27} kg = 1.008665 u	كتلة النوترون (m_p)
Masse de la particule α (m_α)	3727.409 MeV/c^2 = 4.001506 u	كتلة الجسيمة α (m_α)
Unité de masse atomique (u)	931.5 MeV/c^2 = 1.660×10^{-27} kg	وحدة الكتلة الذرية (u)
Permittivité du vide (ε_0)	8.854×10^{-12} F/m	سماحية الفراغ (ε_0)
Perméabilité du vide (μ_0)	$4\pi\times10^{-7}$ N/A^2	نفاذية الفراغ (μ_0)
Magnéton de Bohr ($\mu_B = e\hbar/2m_e$)	5.788×10^{-11} MeV/T	مغنيطون « بور » ($\mu_B = e\hbar/2m_e$)
Magnéton nucléaire ($\mu_N = e\hbar/2m_p$)	3.152×10^{-14} MeV/T	المغنيطون النووي ($\mu_B = e\hbar/2m_p$)
Nombre d'Avogadro (N_A)	6.022141×10^{23} mol–1	عدد « آفوغادرو » (N_A)