

Physique nucléaire

une introduction

1. Bref historique

- 1911 : Rutherford met en évidence l'existence du noyau de l'atome (voir explication ci-dessous).
- 1919 : Rutherford réalise la première transmutation (transformation d'un élément en un autre) : azote 14 \longrightarrow oxygène 17.
- 1942 : Enrico Fermi fait fonctionner le premier réacteur nucléaire, à fission.
- 1945 : Explosion de la première bombe "atomique" (fission).
- 1952 : Explosion de la première bombe H (fusion).

L'expérience de Rutherford (1911) :

Au début du XX^{ème} siècle, on pensait que la matière était composée d'objets positifs et d'autres négatifs. Ceux-ci, des particules baptisées électrons, avaient été déjà découverts récemment. Par contre, on ne savait rien sur la composante positive de la matière. Une des idées était que la matière était globalement positive, parsemée de grains négatifs, comme peuvent l'être les raisins secs (les électrons) dans la pâte positive d'un cake. Une autre idée était que la matière est formée d'atomes qui ressembleraient à des systèmes solaires : les électrons tourneraient autour d'un noyau positif. Comme cette idée paraissait intéressante, il s'agissait alors de la tester expérimentalement, ce qu'entrepris Ernest Rutherford et son équipe aux Etats-Unis.

Il prit une très mince feuille d'or - non pas parce qu'il était riche mais parce que l'or, d'abord doit être formé d'atomes très lourds et ensuite parce que c'est un métal qui se lamine facilement, jusqu'à avoir des feuilles de l'ordre de quelques millièmes de mm d'épaisseur. Puis il bombarda cette feuille avec des particules alpha - qu'on su plus tard être des noyaux d'hélium - émises par une source radioactive, genre d'objet que la science commençait à fabriquer (Marie Curie et son radium) et à utiliser.

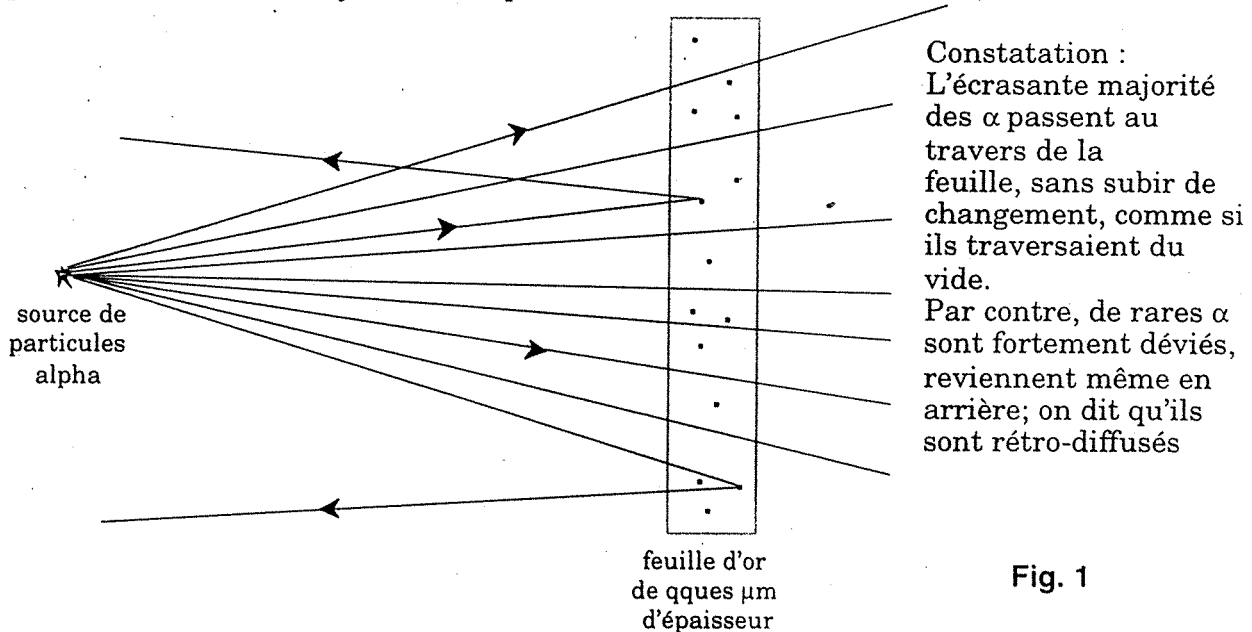


Fig. 1

La conclusion fut simplement que de la matière aussi dense que de l'or est en fait constituée presque exclusivement de vide, avec un tout petit peu de matière par endroits. Cette expérience fut cruciale car elle confirmait l'existence des atomes comme étant faits d'un noyau chargé positivement, très petit et très massif, capable de dévier notablement les particules alpha, et d'électrons "gravitant" autour, très légers, se faisant facilement bousculer par les particules alpha; tout cela se trouvant dans un vide absolu. En effet, que pourrait-il y avoir d'autre que le noyau et son cortège d'électrons ?

Une telle méthode d'analyse, par bombardement de la matière au moyen de particules énergétiques, est devenue très courante en physique nucléaire. Elle est pratiquement la seule possible pour sonder la matière dans son intimité: l'examen attentif de la façon dont sont déviées les particules incidentes donne beaucoup d'informations sur ce qui les a dévié.

Composition du noyau :

Le noyau est ainsi mis en évidence, il est positif, donc constitué de particules positives, pense-t-on; on les nomme *protons* suite à la première *transmutation* nucléaire, réalisée en 1919, aussi par Rutherford. Une transmutation est, vieux rêve des alchimistes qui voulaient changer le plomb en or, la transformation d'un noyau en un autre. Rutherford bombarda de l'azote avec des particules α . Il en résulta un noyau d'oxygène et un proton selon la réaction : ${}^{14}_7\text{N} + \alpha \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + \text{p}$.

Puis, en 1932, l'américain Chadwick fait une démonstration expérimentale qui montre que le noyau contient aussi d'autres particules, semblables aux protons par leur masse, mais neutres, les *neutrons*. Depuis quelques années auparavant, on se doutait que les protons ne devaient pas être les seuls constituants du noyau pour deux raisons au moins, la première étant simplement que la masse du noyau excédait beaucoup celle de l'ensemble de ses protons, la deuxième invoquait le fait que les protons ayant tous la même charge, ils devraient se repousser électriquement fortement et empêcher la cohésion du noyau. Et en effet, les neutrons ont un effet "d'adhésif" grâce à la force nucléaire forte, auxquels sont soumis tous les *nucléons*, c'est-à-dire les protons et les neutrons.

Dans années 1960-70, on commence à comprendre que cette force nucléaire est due aux *quarks*, particules considérées aujourd'hui comme élémentaires. Il suffit de deux sortes de quarks, le *up* et le *down*, pour avoir protons et neutrons, chacun étant formé de trois quarks, soit deux up et un down, soit un up et deux down. Les théories et les expériences montrent que les nucléons ne peuvent pas se scinder en leurs quarks, comme le noyau peut se scinder en ses nucléons.

A consulter absolument: <http://www.webelements.com>

2. Caractéristiques du noyau

La neutralité de l'atome impose que leur nombre ^{de protons} est égal à celui des électrons et que leur charge électrique est *exactement* égale, mais de signe opposé à celle des électrons.

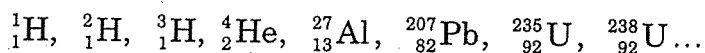
Un paramètre essentiel pour distinguer un atome d'un élément d'un atome d'un autre élément est sa masse. Plutôt que d'utiliser le kg comme unité de masse, physiciens (et chimistes) ont convenu que l'*unité de masse atomique*, abrégé **uma**, serait égale à 1/12 de la masse de l'atome (neutre) de carbone 12. C'est une définition stricte. Voyons ce que vaut, en kg, 1 uma :

Une mole de ${}^{12}_6\text{C}$ a, par définition de la mole, une masse de 12 g = 0,012 kg; elle contient le nombre d'Avogadro d'atomes, $N_A = 6,02213 \cdot 10^{23}$. Par conséquent :

$$1 \text{ uma} = 1/6,02213 \cdot 10^{23} = 1,66054 \cdot 10^{-24} \text{ g} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Remarque : il s'agit bien de l'unité de masse *atomique*, autrement dit la masse des électrons est prise en compte. Elle n'est pas bien grande, comme le montre le tableau ci-après, mais il est parfois nécessaire d'en tenir compte, comme on le verra sous peu.

Notation : Pour désigner un noyau, on utilise le symbole de l'élément du tableau périodique auquel son atome appartient et on lui ajoute à gauche deux chiffres. Ainsi, à l'élément X, on désigne le noyau par ${}^A_Z\text{X}$ où Z est le nombre de protons et A est le nombre total de nucléons (protons + neutrons). Par exemple :



Trois noyaux d'hydrogène figurent dans cet exemple. Ce sont les trois *isotopes* existant de cet atome. Les différents isotopes d'un même type d'atome comportent le même nombre de protons (ici un seul) mais des nombres différents de neutrons (ici zéro, un ou deux). Précisons : ${}^1_1\text{H}$ est l'hydrogène proprement dit, dont l'abondance terrestre est de 99,985 %. ${}^2_1\text{H}$ est le deutérium, noyau d'hydrogène comportant un neutron en plus du proton, ce noyau est stable et son abondance naturelle est de 0,015 %, ce qui n'est pas négligeable si on considère l'énorme quantité d'hydrogène de l'eau des océans. Le troisième isotope existant de l'hydrogène est le tritium : deux neutrons cohabitent avec le proton. Ce noyau n'est pas stable, le tritium est radioactif, il a tendance à se désintégrer (voir chapitre ultérieur). Deux isotopes très importants, voir § 7, de l'uranium ont aussi été cités.

Tableau des masses

particule	m (kg)	m (uma)	m (MeV)
proton p^+	$1,672623 \cdot 10^{-27}$	1,007276	938,272
neutron n^0	$1,674929 \cdot 10^{-27}$	1,008665	939,566
électron e^-	$9,109390 \cdot 10^{-31}$	$5,48586 \cdot 10^{-4}$	0,511

Commentaires :

a) On a toujours prôné des valeurs numériques à trois chiffres au maximum et voilà qu'on en donne maintenant jusqu'à sept ! Il y a évidemment une bonne raison à cette exception, comme on le verra tantôt, à propos des énergies de liaison.

b) On observe que la masse de l'électron est beaucoup plus petite que celle d'un nucléon, environ 2000 fois. Par conséquent, la masse de l'atome n'est que de $1/4000^{\text{ème}}$ supérieure à celle du noyau. Ce n'est pas toujours négligeable, pour la même raison que ci-dessus.

c) La dernière colonne indique les masses en MeV, qu'est-ce que c'est que ça ? C'est en relation directe avec la fameuse formule (Einstein, 1905) : $E = m \cdot c^2$, qui exprime l'équivalence entre masse (en kg) et énergie (en J) si la vitesse de la lumière est $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ (à très peu de chose près). Ce n'est pas tout car MeV \neq joule, il faut encore savoir faire la conversion. Disons d'emblée que $1 \text{ MeV} = 10^6 \times 1,60 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$; on reconnaît le million pour le préfixe M (méga) et la charge élémentaire de $1,60 \cdot 10^{-19} \text{ coulomb}$. Dans un autre cours (électrostatique) sera examinée cette unité d'énergie, l'eV, dit *électron-volt*, qui n'est autre que l'énergie (cinétique) acquise par une charge élémentaire soumise à une tension de 1 volt. Ainsi, pour trouver que la

masse de l'électron est de 0,511 MeV (tableau), on prend sa masse en kg, on la multiplie par c^2 et on divise par $1,60 \cdot 10^{-13}$:

$$m = 9,1094 \cdot 10^{-31} \times 9 \cdot 10^{16} / 1,602 \cdot 10^{-13} = 0,511 \text{ MeV.}$$

Exemple de calcul :

L'uranium naturel contient 0,72 % de l'isotope de $A = 235$, le reste est l'isotope de $A = 238$. Quel est le nombre N d'atomes de 235 dans un gramme de minerai ?

Sol. : 0,72 % de 1 g donne 7,2 mg de ${}^{235}_{92}\text{U}$,

1 mole de cet isotope a une masse de 235 g (à peu de chose près),

la fraction de mole n vaut $0,0072 / 235 = 3,06 \cdot 10^{-5}$ mol,

donc $N = nN_A = 1,84 \cdot 10^{19}$ at.

Dimensions du noyau

Il sera supposé sphérique, ce qui est une simplification. De nombreuses expériences ont permis d'établir que le rayon d'un nucléon est $R_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$ m. Son volume est alors $V_0 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 = 7,24 \cdot 10^{-45}$ m³. Un noyau de volume V , donc de rayon R contient A nucléons qui se "touchent", puisque $V = AV_0 \Rightarrow R = R_0 A^{1/3}$. Par exemple :
 $({}^{235}_{92}\text{U}) = 1,2 \cdot 10^{-15} \times 235^{1/3} = 7,4 \cdot 10^{-15}$ m, à peine 6 fois plus que le rayon d'un proton.

3. Stabilité et énergie de liaison

Le tableau périodique des éléments en contient actuellement 109, la plupart sont naturels, d'autres, surtout les plus lourds, sont artificiels car ils ont été créés en laboratoires par bombardement. Ils ont souvent une durée de vie courte car ils se désintègrent spontanément, c'est bien pour cela qu'ils n'existent pas - en fait plus - dans la nature. Il existe par contre beaucoup plus d'isotopes stables: 280 puisqu'un même atome, tel l'hydrogène, le chlore et bien d'autres, peut posséder plusieurs isotopes stables. De plus, on a dénombré environ 1200 isotopes instables, certains comme le potassium 40 ou l'indium 115 ne sont pas stables mais pourtant naturels (voir F&T) car ont une durée de vie excédant celle de l'Univers.

A quoi tient cette stabilité ? Essentiellement à la proportion relative de neutrons et de protons. En règle générale, plus il y a de protons, plus il faut de neutrons pour garantir la cohésion et contrecarrer la répulsion entre protons. Notons $N = A - Z$ le nombre de neutrons, alors, assez grossièrement :

Les noyaux légers ($Z \leq 20$) sont stables si $N \approx Z$,

Les noyaux lourds ($Z \geq 20$) ne sont stables que si $N > Z$.

La courbe dite d'Ashton ci-dessous résulte de longs travaux expérimentaux. Elle est l'interpolation des points obtenus pour les 280 noyaux stables :

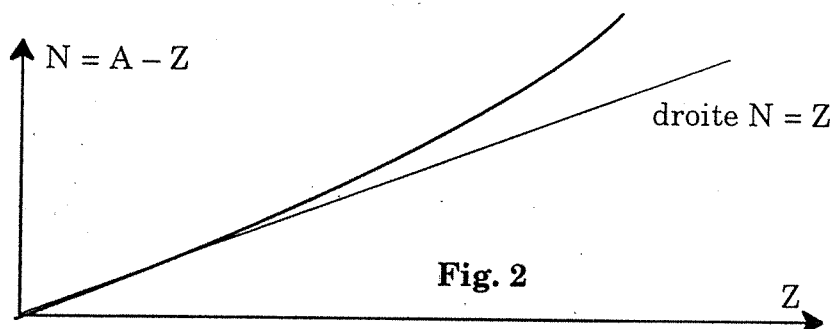


Fig. 2

D'où provient cette énergie de liaison ?

Faisons un petit calcul en prenant comme *exemple* illustratif, le noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$; on trouve dans les tables que sa masse atomique est 4,00260 uma. Si on veut connaître la masse nucléaire, il faut déduire la masse des deux électrons, c'est-à-dire $2 \times 5,5 \cdot 10^{-4}$ uma, ce qui donne :

$$m(\text{He}) = 4,00150 \text{ uma.}$$

D'autre part, on calcule la somme des masses des quatre nucléons :

$$2 \times m_p = 2 \times 1,007276 = 2,014552 \text{ uma}$$

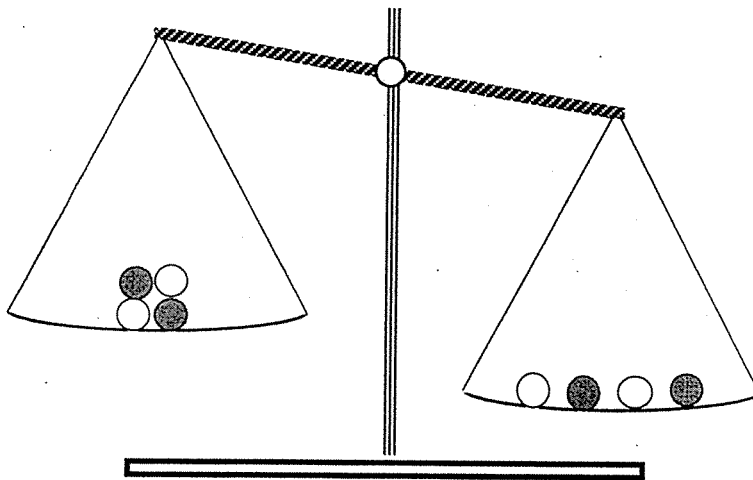
$$2 \times m_n = 2 \times 1,008665 = 2,017330 \text{ uma, ce qui donne :}$$

$$m(\text{les 4 nucléons}) = 4,03188 \text{ uma (arrondi à 5 chiffres après la virgule)}$$

et c'est nettement supérieur à la masse du noyau $m(\text{He})$, où les nucléons sont *liés*.

Cela ne doit pas manquer de surprendre; imaginons un cageot de pommes, on le pèse et on soustrait le poids du cageot vide, on trouve un poids P_1 . Ensuite on pèse toutes les pommes mais l'une après l'autre et on fait le total P_2 des poids trouvés. Surprise, ce dernier résultat est supérieur au premier: $P_2 > P_1$, compte tenu des inévitables incertitudes et imprécisions de la balance !

C'est pourtant vrai pour He. Mais ce qui est valable pour les noyaux atomiques et ne l'est pas pour les pommes est qu'il y a des forces d'attraction entre nucléons, et il n'y en a pas entre les pommes, n'est-ce pas ? Tout est là. Il est assez évident d'admettre que de l'énergie serait nécessaire pour rompre les liaisons, pour séparer complètement tous les nucléons les uns des autres. Cette énergie qui lie les nucléons, elle existe dans le noyau à l'état potentiel, c'est une énergie potentielle et elle est *négative*, comme l'est l'énergie potentielle de gravitation qui lie un satellite à son astre.



Sur le plateau de gauche,
le noyau d'hélium.

Sur le plateau de droite,
les quatre nucléons non
liés.

Fig. 3

Pour l'hélium 4, calculons le *défaut de masse* Δm qui n'est autre que cette bizarre différence : $\Delta m = m(\text{les 4 nucléons}) - m(\text{He}) = 4,03188 - 4,00150 = 0,03038$ uma.

On transforme ce résultat en kg et ensuite en MeV par $E = \Delta mc^2$:

$$0,03038 \text{ uma} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \times 0,03038 = 5,04 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

$5,04 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \rightarrow 4,54 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 28,4 \text{ MeV}$, donc environ 7 MeV par nucléon, énergie qu'il faut fournir pour extraire un proton ou un neutron de ce noyau.

Il se peut qu'un tel résultat numérique ne soit pas très parlant, calculons alors l'énergie nucléaire potentielle E contenue dans *une mole* d'hélium :

$$E = 4,54 \cdot 10^{-12} \times N_A = 2,72 \cdot 10^{12} \text{ J} = 2720 \text{ GJ} !$$

Cette fois c'est trop énorme pour être parlant, mais si transforme cela en kWh, on en obtient environ 750'000 ce qui peut coûter quelques 190'000 CHF puisque le prix du kWh électrique est voisin de 25 centimes. Autrement dit, une petite mole de ce gaz, d'une masse de 4 grammes *pourrait* alimenter en énergie électrique près de 2000 ménages moyens pendant un mois ! On a écrit "pourrait", un conditionnel pour marquer qu'une telle transformation d'énergie est, au moins actuellement, impossible, bien que nos centrales nucléaires fonctionnent sur le même principe: une très faible fraction de la masse des noyaux d'uranium a disparu au profit d'énergie cinétique des neutrons de fission. Ces neutrons ... mais c'est une autre histoire, voir § 7.

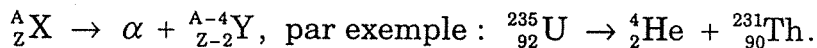
4. Radioactivité

La radioactivité est l'émission de particules plus ou moins énergétiques par des noyaux instables. Ayant émis une particule, le noyau peut retrouver la stabilité ou non, les exemples abondent, surtout pour les noyaux lourds. Il doit être étonnant d'apprendre que l'émission *d'une* particule par *un* noyau est un phénomène totalement imprévisible. En effet, ce n'est que si un très grand nombre d'atomes radioactifs est examiné, un petit morceau de matière comprenant facilement 10^{20} ou 10^{22} atomes, qu'il est possible de faire des prévisions précises en faisant usage de lois reposant sur de la statistique.

On connaît plusieurs types de radioactivités bien distinctes:

Radioactivité alpha :

Il s'agit de l'émission spontanée de noyaux d'hélium, dites alors particules α . Ce sont seulement les noyaux lourds qui provoquent ce genre de radioactivité, le plus léger étant le ${}_{60}^{144}\text{Nd}$. La particule α étant doublement chargée, le noyau émetteur se déplacera de deux crans dans le tableau périodique; de façon générale :



Très souvent, le noyau fille, ici le thorium 231, n'est lui-même pas stable, une succession de désintégrations (α et β^-) s'ensuit (voir F&T).

Il faut bien observer que la réaction conserve d'une part le nombre total de nucléons et d'autre part la charge électrique totale. Ces deux lois de conservation interviennent, avec d'autres dont nous parlerons (§ 6), dans toute réaction nucléaire.

Les particules α sont très ionisantes et par conséquent peu pénétrantes puisqu'elles perdent leur énergie en ionisant les atomes de la matière où elles pénètrent. Quelques centimètres d'air suffisent à les arrêter. En effet, un échantillon d'une telle matière posé sur la table ou même dans la poche n'est pas vraiment dangereux, par contre des poussières qui pourraient être respirées et entrer en contact direct avec les cellules pulmonaires y provoqueront des dégâts. Citons le danger du radon, le dernier des gaz rares, qui suinte de certains sous-sols.

Radioactivité bêta :

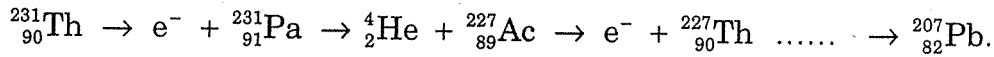
Elle n'est pas réservée aux noyaux lourds, des isotopes de tous les atomes du tableau périodique peuvent être concernés. On a cité (page 3) l'isotope le plus lourd de l'hydrogène, le tritium, émetteur β^- selon la réaction : ${}^3_1\text{H} \rightarrow e^- + {}^3_2\text{He}$.

On le voit, la radioactivité β^- est l'émission d'un électron par le noyau. Les émetteurs β^- se caractérisent par un excès de neutrons. En effet, un neutron, soit dans un noyau instable soit libre, se désintègre, se transformant en un proton et un électron

(et un anti-neutrino !). La réaction est: $n^0 \rightarrow e^- + p^+ + \bar{\nu}_e$.

Il y aurait bien des choses à dire à propos de cette dernière particule. Mentionnons simplement qu'elle est, comme son nom l'indique, neutre, et "quasiment" sans masse, ce qui préoccupe beaucoup les physiciens.

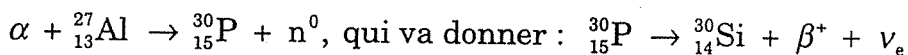
Un autre exemple de désintégration β^- peut être donné par le thorium 231, résultat instable de l'émission α de l'uranium 235 vue ci-dessus:



Le palladium 231 n'est lui-même pas stable et il s'ensuit une chaîne de désintégrations alpha et bêta, aboutissant finalement à l'un des isotopes stables du plomb.

Comme dernier exemple de radioactivité β^- , le potassium ${}^{40}_{19}\text{K}$; son abondance naturelle n'est que de 0,0012 % parmi le ${}^{39}_{19}\text{K}$ mais la durée de sa radioactivité est si longue, plus d'un milliard d'années, qu'il existe encore à l'état naturel, si bien que lorsqu'on mange de la nourriture contenant du potassium, et ce n'est pas rare, on absorbe de la radioactivité. Notre corps, à cause de cet isotope (et d'autres) est ainsi - très faiblement - radioactif!

Il existe aussi une autre forme de radioactivité β , c'est la radioactivité β^+ , où un proton se transforme en un neutron et en un positron (et un neutrino). Le positron (parfois appelé positon) n'est autre que l'antiparticule de l'électron, un anti-électron e^+ . Le proton étant une particule d'une stabilité d'une durée qu'on pense infinie, cette forme de radioactivité ne se produit pas naturellement, elle résulte de la désintégration de noyaux préalablement activés, qu'on a rendus (radio-)actifs par bombardement, tel :



Comme toute radioactivité, la radioactivité β présente un danger. La pénétration des électrons énergétiques (quelques MeV) dans la matière est nettement plus grande que pour les α à énergie égale; dans l'aluminium elle atteint 2 mm pour 1 MeV d'énergie cinétique et environ 2 cm pour 10 MeV (n'est pas linéaire pour autant!).

Radioactivité gamma :

Il s'agit de l'émission de photons très énergétiques, atteignant quelques MeV. On sait que les photons sont aussi les particules de lumière. Ils se comportent comme une onde, de très courte longueur d'onde pour les γ . Une relation, due à Einstein, relie l'énergie E du photon à sa fréquence f ou à sa longueur d'onde λ :

$$E = hf \text{ ou } E = hc/\lambda,$$

où h est la constante de Planck, intervenant dans presque toutes les formules de la physique atomique et nucléaire: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s et où c est évidemment la vitesse de la lumière mais plus précisément, la vitesse de toute onde électromagnétique (dans le vide), et le γ en est une.

Une telle émission peut être produite par des noyaux excités à la suite d'une désintégration α ou β ou d'un bombardement: on observe souvent qu'un γ est émis conjointement.

Il est clair que ni le nombre total A de nucléons ni le nombre de protons Z du noyau émetteur ne changent puisque qu'un γ est dépourvu de charge et de masse. Ainsi pour un noyau recevant un neutron : $n^0 \rightarrow {}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A+1}_Z\text{X}^* \rightarrow {}^{A+1}_Z\text{X} + \gamma$, l'astérisque signifiant l'état excité du noyau X , autre-ment dit, les nucléons doivent se réarranger dans le noyau pour trouver une configuration d'énergie minimum, l'excès a

donc été emporté par le γ .

Lorsque les énergies sont faibles, quelques dizaines de keV, les γ sont plutôt nommés rayons X, mais émis par des noyaux, ils ont volontiers des énergies de plusieurs MeV, voire beaucoup plus. Ils sont extrêmement pénétrants dans la matière, et en cela très dangereux. N'ayant pas de charge électrique, ils ne sont pas affectés par l'enveloppe électronique des atomes, ce ne sera que les noyaux qui pourront les arrêter. Il faut plusieurs centimètres de plomb pour se protéger efficacement contre ce type de rayonnement.

Quand il est nécessaire de se faire faire une radiographie, chez le dentiste ou le médecin, on a pu observer que celui-ci se protège des rayons X, avec, par exemple, un très lourd tablier, lesté de feuilles de plomb. Ce blindage de l'ordre du mm d'épaisseur, va protéger le praticien du rayonnement produit par l'appareillage. Il ne s'agit que de rayons X de quelques dizaines de keV, qu'on pourrait qualifier de γ très mous. Ils ne sont en fait pas produits par des noyaux excités mais par des électrons des couches profondes d'atomes moyennement lourds, tel le Fe.

Radioactivité de neutrons :

Elle se rencontre le plus souvent lors de phénomènes de *fission*, dont le plus banal est actuellement la fission de l'uranium 235, combustible de toutes les centrales nucléaires suisses. Un noyau est dit fissile ou fissible (les deux termes sont possibles) lorsqu'il est susceptible de se casser en deux sous-produits, deux noyaux de masse moyenne, auxquels s'ajoutent quelques neutrons énergétiques. Si le noyau initial se casse en deux, c'est souvent parce qu'il a été percuté par un neutron, provenant d'une fission précédente. Il peut ainsi y avoir *réaction en chaîne*, contrôlée (centrale) ou non (bombe dite atomique). Plus de détails au § 7. Mentionnons l'un des modes de fission de l'uranium 235 : $n^0 + {}^{235}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{95}_{38}\text{Sr} + {}^{139}_{54}\text{Xe} + 2n^0$. L'un de ces deux neutrons, un fois ralenti, pourra provoquer une autre fission, et ainsi de suite.

5. Loi de décroissance radioactive

Petit préalable mathématique :

La fonction la plus importante des mathématiques, de la physique, de l'économie, etc, est sans conteste la fonction *exponentielle*, de la forme $y = ae^{\pm bx}$ avec a et b quelconques et e est évidemment la fameuse constante d'Euler, nombre transcendant qui vaut 2,7182818... Pourtant, des phénomènes simples comme le ralentissement dû au frottement dans un fluide visqueux ou l'évolution spontanée de la température d'un corps qui se refroidit et d'autres qui seront examinés en électricité, sont exponentiels. L'accroissement d'un capital placé en banque ou l'évolution initiale d'une population de bactéries sont aussi exponentiels. Cette fonction représente souvent un phénomène *naturel* à tel point que la fonction réciproque de $y = e^{\pm x}$ est le *logaritme naturel* $y = \pm \ln(x)$.

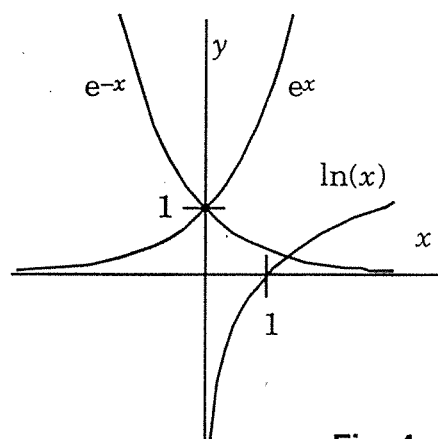


Fig. 4

Il est totalement impossible de savoir *quand* un noyau radioactif va se désinté-

grer. C'est un phénomène absolument aléatoire qui n'est pas dû à notre piètre connaissance de la nature, c'est une vraie manifestation du *hasard*. Il ne faut pourtant pas baisser les bras car on n'a jamais à faire à un seul noyau mais plutôt à une collection en rassemblant un nombre énorme, de l'ordre du nombre d'Avogadro, et c'est la statistique qui va permettre des lois précises.

C'est une exponentielle *décroissante* du genre e^{-kt} qui va intervenir dans ce cours, t étant le temps et k une constante pour l'instant quelconque.

Prenons un exemple de la vie courante. Plaçons un capital initial C_0 de 1000 Fr à un taux (imaginaire) de 10 % (!). Laissons ce capital fructifier et recevons un intérêt composé. Au cours des années t_i , il vaut C_i :

$$t_0 = 0 \text{ année : } C_0 = 1000.-$$

$$t_1 = 1 \text{ année : } C_1 = 1000.- + 100.- = 1100.-$$

$$t_2 = 2 \text{ années : } C_2 = 1100.- + 110.- = 1210.- \text{ et non } 1200.-$$

$$t_3 = 3 \text{ années : } C_3 = 1210.- + 112.1.- = 1331.- \text{ et non } 1300.-$$

etc.

Le taux est constant mais l'évolution n'est pourtant pas linéaire.

Revenons à nos noyaux et considérons un échantillon de matière radioactive contenant N_0 noyaux émetteurs en $t = 0$. Au cours du temps, ce nombre diminue; la diminution est de ΔN pour un intervalle de temps, supposé court, de Δt .

En un instant quelconque t , le nombre de noyaux non encore désintégrés est noté N . Il est alors assez évident que ΔN est proportionnel, d'une part au nombre N de noyaux restant, et d'autre part à l'intervalle de temps considéré Δt .

On sait que lorsqu'une grandeur physique est simultanément proportionnelle à plusieurs autres, elle est proportionnelle à leur produit, ainsi ici : $\Delta N \propto N \Delta t$.

Mettons un facteur de proportionnalité. Notons-le $-\lambda$. Le signe $-$ permet d'avoir $\lambda > 0$ puisque $\Delta N < 0$ car Δt ne peut être que ≥ 0 .

λ est appelé *constante de désintégration*, c'est une grandeur caractéristique de chaque substance radioactive, elle sera mise sous peu en relation simple avec une grandeur plus parlante. On a donc : $\Delta N = -\lambda N \Delta t$, qu'on écrit $\Delta N / \Delta t = -\lambda N$ puis on passe à la limite en faisant tendre Δt vers zéro, obtenant ainsi la *dérivée* de N par rapport au temps:

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

Question : quelle est la seule fonction qui est égale, à une constante près, à sa dérivée ? *Réponse* : la fonction exponentielle: si $y = e^{ax}$ alors $y' = ae^{ax}$. Par conséquent :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \text{ loi de la décroissance radioactive}$$

où $N_0 = N(t = 0)$, comme on le vérifie sans peine.

On définit la *demi-vie* $T_{1/2}$ d'un élément radioactif comme la durée nécessaire pour que $N(t = T_{1/2}) = N_0/2$: la quantité de noyaux non encore désintégrés ne soit plus que la moitié du nombre initial. Cela revient à dire que :

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

Prenant le logarithme de part et d'autre :

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

On définit aussi l'activité A d'une source radioactive comme le nombre de désintégrations qui se produisent en une seconde : $A = -dN/dt$ (on rappelle que dN/dt est < 0).

L'unité est en s^{-1} , mais en physique nucléaire, cela s'exprime en *becquerels* :

$[A] = \text{Bq} (= s^{-1})$. (Henri Becquerel, physicien français (1852 - 1908), découvreur de la radioactivité).

L'activité d'une source décroît au court du temps. Alors $A = -dN/dt = \lambda N$.

Exemples de calcul :

a) La demi-vie du célèbre Carbone 14 est de 5730 ans.

Soit un échantillon contenant $N = 1.10^{22}$ atomes de ^{14}C en t quelconque. Quelle est son activité à ce moment ?

Solution : $A = \lambda N$ et $\lambda = (\ln 2)/T_{1/2} = (\ln 2)/5730 \times 365 \times 24 \times 3600 = 3,84.10^{-12} s^{-1}$. Puis :

$A = 3,84.10^{-12} \times 1.10^{22} = 3,84.10^{10} \text{ Bq}$. Notons que les unités Bq et s^{-1} sont identiques puisque N est un nombre, donc sans unité.

b) Un compteur Geiger mesure l'activité d'un échantillon radioactif: $A = 3.10^{15} \text{ Bq}$. La mesure est refaite six mois plus tard, on trouve alors $A' = 1,2.10^9 \text{ Bq}$.

Quelle est la demi-vie de l'isotope en cause ?

Sol. : $A'/A = N'/N$, qu'on peut noter N/N_0 , alors $A'/A = e^{-\lambda t} = 1,2.10^9/3.10^{15} = 4.10^{-5}$.

$-\lambda t = \ln(4.10^{-5}) \Leftrightarrow \lambda t = \ln(2,5.10^4)$. Six mois $t = 0,5 \times 365 \times 24 \times 3600 = 1,57.10^7 \text{ s}$.

$\Rightarrow \lambda = \ln(2,5.10^4)/1,57.10^7 = 6,45.10^{-7} s^{-1}$ et $T_{1/2} = (\ln 2)/6,45.10^{-7} = 1,07.10^6 \text{ s}$, c'est-à-dire 12 j 11h environ.

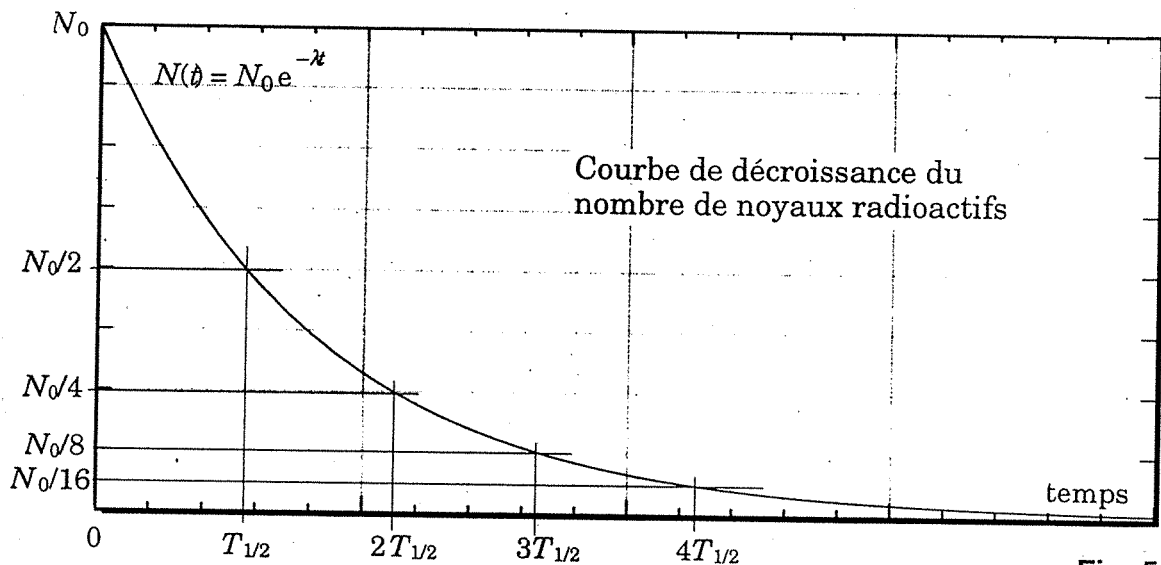


Fig. 5

6. Lois de conservation

Dans d'autres chapitres de ce cours de physique, l'importance des lois de conservation à déjà été évoquée. Elles sont véritablement le fondement de toute la physique.

En physique classique :

- Conservation de la masse (bien utile en chimie)
- Conservation de l'énergie mécanique (force conservatives)

- Conservation de l'énergie totale (Premier Pr. de la thermo)
- Conservation de la quantité de mouvement totale (examinée plus bas)
- Conservation du moment cinétique (étudiée en 3^{ème} année)
- Conservation de la charge électrique.

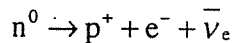
S'y ajoute en **physique nucléaire** :

- Conservation de la masse-énergie
- Conservation du nombre de baryons : particules lourdes, ici les nucléons
- Conservation du nombre de leptons : particules légères, ici les électrons et les neutrinos.

D'autres lois de conservations apparaissent à ceux qui font de la physique corpusculaire, à hautes énergies; trop subtiles, elles ne seront pas évoquées dans ce cours.

La loi de la *conservation de la masse-énergie* est apparue avec la théorie de la Relativité en 1905 et la fameuse équation $E = mc^2$ que nous avons déjà vue et utilisée dans ce cours. Prenons pourtant encore un exemple : des rayons γ sont émis lors d'une désintégration nucléaire. Les γ n'ont pas de masse mais portent de l'énergie. Si un γ est de plus que 1,02 MeV, il peut dans certaines conditions, se matérialiser en une paire électron-positron (antiparticule de l'électron) car chacun d'eux a une masse de 0,51 MeV. Avec cette énergie limite, les membres de la paire n'auront qu'une très faible énergie cinétique.

La réaction de *désintégration du neutron* est un exemple faisant apparaître un bon nombre de lois de conservation :



Tout d'abord la loi de conservation, ici évidente, de la charge électrique : la charge du neutron est nulle et celle de l'électron compense exactement celle du proton; celle du neutrino est, comme son nom l'indique, nulle.

Ensuite celle de la conservation du nombre de baryons : il y a un nucléon de chaque côté. Puis celle du nombre de leptons : il n'y en a pas à gauche et il y a, à droite, un lepton, c'est l'électron, et un anti-lepton, c'est l'antineutrino, qu'on symbolise avec une barre supérieure pour marquer son appartenance à l'antimatière.

Il n'y a pas conservation de la masse, comme on peut le calculer facilement; par contre, il y a conservation de la masse-énergie, le défaut de masse s'étant transformé en énergie cinétique des trois particules résultant de la désintégration du neutron.

La conservation de la quantité de mouvement totale mérite un examen un peu approfondi. Elle intervient dans la physique microscopique comme dans la macroscopique.

Conservation de la quantité de mouvement

La quantité de mouvement, abrégée qdm, d'une masse m animée d'une vitesse v est simplement :

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v}$$

c'est donc une grandeur **vectorielle**.

Abordons cela par un exemple : soit un objet quelconque, immobile, se partageant spontanément en deux parties. Cela pourrait être un noyau émettant une particule α , ou un pistolet tirant une balle ou encore un rocher explosant en deux morceaux :

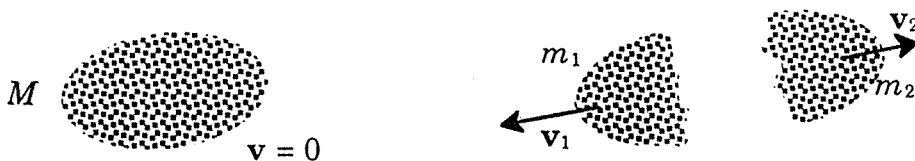


Fig. 6

Soit alors M la masse de l'objet, m_1 et m_2 les masses des deux morceaux, tels que $m_1 + m_2 = M$.

La qdm est initialement nulle puisque M est immobile; elle doit le rester, ce qui se traduit par :

$$\mathbf{0} = m_1 \mathbf{v}_1 + m_2 \mathbf{v}_2$$

les deux vecteurs qdm ont même norme mais sont de sens opposés.

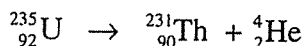
On peut même se permettre une démonstration de cette loi de conservation dans cette situation particulièrement simple. Pour cela, dérivons par rapport au temps l'expression ci-dessus. On obtient :

$$\mathbf{0} = m_1 \mathbf{a}_1 + m_2 \mathbf{a}_2, \text{ autrement dit : } \mathbf{F}_{2,1} = -\mathbf{F}_{1,2}$$

ce qui n'est rien d'autre que la 3^{ème} loi de Newton, celle des actions réciproques.

Revenons à nos noyaux en prenant deux exemples.

a) **Emission α :**



Supposons que le noyau d'uranium soit immobile : $m_U \mathbf{v}_U = 0$, la conservation de la qdm donne vectoriellement :

$$m_{\text{Th}} \mathbf{v}_{\text{Th}} = -m_{\text{He}} \mathbf{v}_{\text{He}}$$

et scalairement :

$$m_{\text{Th}} v_{\text{Th}} = m_{\text{He}} v_{\text{He}}$$

la vitesse de la particule α est donc plus grande que celle du noyau de thorium, comme attendu. Qu'en est-il de l'énergie cinétique ? Pour le voir, on élève au carré l'égalité ci-dessus, on la divise par 2 et par m_{Th} :

$$\frac{1}{2} m_{\text{Th}} v_{\text{Th}}^2 = \frac{1}{2} m_{\text{He}} v_{\text{He}}^2 \frac{m_{\text{He}}}{m_{\text{Th}}}$$

d'où le résultat important : c'est la particule la plus légère qui emporte le plus d'énergie cinétique. Cette dernière relation peut s'écrire :

$$E_{\text{cin}}(\text{Th}) = \frac{m_{\text{He}}}{m_{\text{Th}}} E_{\text{cin}}(\alpha)$$

b) **Collision proton-carbone 12 :**

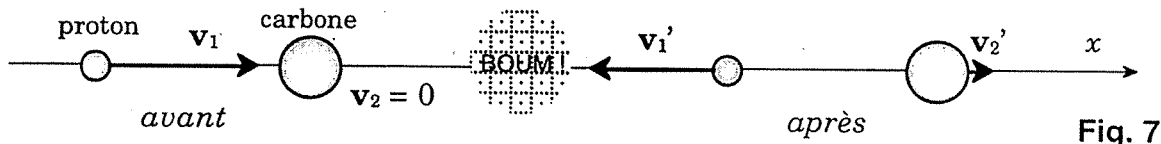


Fig. 7

Un proton vient percuter un noyau de ${}_{6}^{12}\text{C}$ immobile. Le choc est dit *central* parce que la direction du vecteur-vitesse du proton passe par le centre du noyau de ${}_{6}^{12}\text{C}$, il est dit *élastique* parce que l'énergie cinétique est aussi conservée.

La conservation de la qdm donne :

$$m \mathbf{v}_1 + 0 = m \mathbf{v}_1' + 12m \mathbf{v}_2' \quad (1)$$

Selon l'axe x :

$$m v_1 + 0 = -m v_1' + 12m v_2' \quad (2)$$

En fait, rien ne nous dit, si ce n'est une certaine intuition, que le proton doit revenir en arrière. Montrons que c'est bien le cas. Pour cela, exprimons la conservation de l'énergie cinétique en oubliant les facteurs 1/2 intervenant dans chaque terme :

$$m v_1^2 + 0 = m v_1'^2 + 12m v_2'^2 \quad (3)$$

Elevons au carré la relation (1) :

$$m^2 v_1'^2 = m^2 v_1'^2 + 144 m^2 v_2'^2 + 12 m^2 \mathbf{v}_1' \cdot \mathbf{v}_2' \quad (4)$$

on obtient ainsi que (3) = (4)/m; un calcul banal aboutit à :

$$-11 v_1'^2 = \mathbf{v}_1' \cdot \mathbf{v}_2' \quad (5)$$

ce qui montre que \mathbf{v}_1' et \mathbf{v}_2' sont bien de sens opposés. La suite du calcul, qui consisterait à chercher v_1' puis v_2' en fonction de v_1 , est laissée en exercice.

7. Production d'énergie

En chimie, une réaction qui produit de la chaleur est dite exothermique; si, par contre, elle nécessite de la chaleur pour se produire, elle est dite endothermique.

C'est assez pareil en physique nucléaire, mais on parle plutôt de réactions exoergiques (ou exoénergétiques) ou endoergiques (ou endoénergétiques) quoique ces dernières sont sans intérêt pour la production d'énergie.

En Suisse, le 40 % de l'électricité consommée est provient de centrales nucléaires, les 60 % restant sont dûs essentiellement aux centrales hydroélectriques. Un petit pourcentage, mais croissant provient de sources dites alternatives : solaires, éoliennes, géothermiques, biogaz ...

Centrales à fission

Lorsqu'un noyau de ${}^{235}_{92}\text{U}$ est percuté par un neutron lent, il devient excité sous la forme d'un noyau de ${}^{236}_{92}\text{U}^*$ à durée de vie très brève. Il se fragmente alors en deux noyaux accompagné de deux ou trois neutrons rapides :

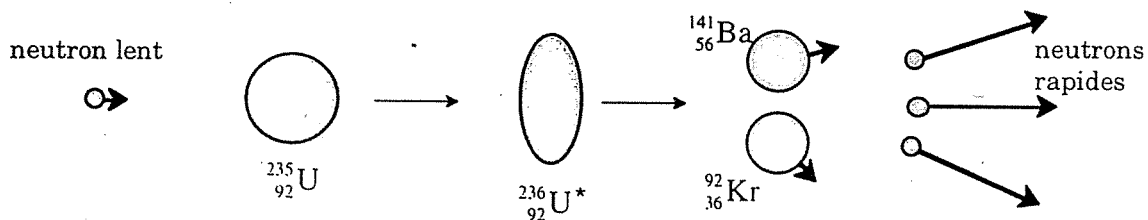


Fig. 8

Ci-dessus, un exemple de fission possible. Dans tous les cas, il y a deux fragments de fission qui sont des noyaux de A compris entre environ 80 et 110 pour l'un et entre environ 130 et 150 pour l'autre. Il faut évidemment que la somme des deux A donne 236, soustrait du nombre de neutrons rapides (deux ou trois) émis. De plus, tout aussi évidemment, il faut que la somme des Z des deux noyaux-fils soit égale à 92. D'autres fissions du ${}^{235}_{92}\text{U}$ peuvent donner entre autres aussi les couples ${}^{94}_{38}\text{Sr}-{}^{140}_{54}\text{Xe}$ ou ${}^{95}_{39}\text{Y}-{}^{138}_{53}\text{I}$. Tous ces noyaux-fils sont radioactifs car ils comportent un excès de neutrons. En effet, la courbe d'Ashton (page 4) montre que moins un noyau est lourd, moins il contient de neutrons relativement au nombre de protons. Ces produits de fission font partie des encombrants déchets nucléaires. Ils sont émetteurs α ou β de durée de vie parfois très longue.

Où est donc l'énergie produite ? Car c'est bien là la question. Elle se trouve dans le défaut de masse Δm qu'on peut calculer par la différence de masse avant et après la fission. Ce Δm s'est converti en énergie grâce à la relation $E = \Delta mc^2$, et se retrouve essentiellement sous forme d'énergie cinétique des deux ou trois neutrons rapides. A ce stade, il faut à tout prix ralentir les neutrons rapides au moyen du modérateur qui est très souvent de l'eau, parfois de l'eau lourde (l'un des deux ${}^1_1\text{H}$ de la molécule d'eau est

remplacé par un ^2H) ou par du graphite (certaines centrales canadiennes). Il y a deux avantages à ralentir les neutrons : 1°) leur énergie cinétique s'y transforme tout simplement en chaleur par "frottements" dans l'eau; cette chaleur est récupérée et la centrale nucléaire est devenue une centrale thermique. 2°) L'un des deux ou trois neutrons rapides doit devenir un neutron lent pour provoquer la fission d'un autre noyau d'uranium et ainsi entretenir la réaction en chaîne. L'uranium naturel, qu'on extrait des mines ne contient que 0,7 % de 235, le reste est du 238 non fissile. Une si faible concentration de 235 est insuffisante pour que de l'uranium naturel soit tel quel introduit dans un réacteur, (sinon les mines d'uranium seraient des réacteurs!) il faut l'enrichir au moins jusqu'à 3 % environ, ce qui nécessite des traitements très complexes que seuls quelques nations peuvent mettre en oeuvre. La concentration en noyaux fissiles, du 235 en l'occurrence, doit être suffisante pour que le neutron lent résultant d'une première fission ait une chance de percuter un autre noyau de 235 et ne soit pas perdu parmi les 238. Si au contraire, la concentration en 235 est très élevée, la probabilité de rencontre entre neutrons et noyaux de 235 devient très grande et le réacteur se met à *diverger*, la réaction n'est plus contrôlée et le réacteur se transforme en bombe atomique !

La probabilité de rencontre dépend encore du *volume* d'uranium: il faut que le neutron puisse fissionner un noyau avant de sortir de la masse de combustible. Plus le volume est grand, plus la chance de trouver un noyau de 235 sur le chemin du neutron sera grande. On parle de *masse critique*. Si elle est dépassée, la divergence devient très probable. C'est ainsi qu'ont été amorcées les premières bombes atomiques (Hiroshima et Nagasaki): deux morceaux d'uranium - qqes kg - fortement enrichis étaient à une certaine distance l'un de l'autre. Chacun des morceaux n'avait pas la masse critique, par contre, elle était atteinte si les deux morceaux étaient rapprochés. Il suffisait donc de le faire rapidement, ce qui ne demandait qu'une charge d'explosif conventionnel bien placée.

La plus petite des centrales nucléaire suisse est celle de Mühleberg, entre Neuchâtel et Berne, elle a une puissance électrique de 355 MW. Fonctionnant à 90 % du temps, elle produit environ 2800 GWh = kWh. Comme une centrale nucléaire n'est finalement qu'une centrale thermique, son rendement n'atteint que 35 % au maximum. L'énergie nucléaire dégagée est donc de $2800 \cdot 0,35 = 980 \text{ GWh} = 8 \cdot 10^9 \text{ kWh} = 2,9 \cdot 10^{16} \text{ J} = 4,6 \cdot 10^{23} \text{ MeV}$.

Comme chaque noyau de $^{235}_{92}\text{U}$ brisé donne environ 200 MeV, ce sont donc $2,3 \cdot 10^{27}$ noyaux qui sont intervenus en une année. Une mole de $^{235}_{92}\text{U}$ contient $6 \cdot 10^{23}$ atomes, cela correspond à 3840 moles donc à $3840 \times 0,235 \approx 900 \text{ kg}$ de $^{235}_{92}\text{U}$ pur, mais à 30 t d'uranium enrichi à 3 %, ce qui est une bien faible masse de combustible. Avec du pétrole, une centrale thermique devrait en brûler plus de 660'000 tonnes pour produire la même énergie.

Centrales à fusion

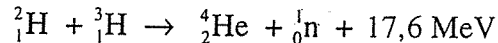
Elles n'existent pas encore! Pourtant des centaines de physiciens de par le monde s'emploient activement depuis des décennies à les rendre possibles. La fusion nucléaire est néanmoins réalisée dans beaucoup de centre de recherche mais l'énergie qu'il faut investir pour qu'elle se produise reste toujours et encore supérieure à l'énergie qu'elle dégage.

Le principe de la fusion est simple: au contraire de la fission qui consiste à casser un gros noyau, la fusion consiste à réunir deux petits noyaux pour n'en former qu'un.

L'énergie lumineuse rayonnée par le Soleil est le résultat de fusions se produisant en son centre. On sait que notre étoile, comme la plupart des autres, est constituée en majeure partie d'hydrogène et d'hélium et que la proportion d'hydrogène diminue lentement au cours du temps pour donner de l'hélium. Vu d'une façon simplifiée, ce

sont quatre ${}^1_1\text{H}$ qui fusionnent pour donner un ${}^4_2\text{He}$ (plus deux positrons et deux neutrinos). Qu'on se rassure: la quantité d'hydrogène est suffisante pour que le Soleil brille encore pendant environ 5 milliards d'années.

Dans les centres de recherche, c'est surtout la réaction de fusion deutérium-tritium qui est testée :



Les 17,6 MeV d'énergie produite sont sous forme cinétique des deux particules qui résultent de la fusion. Il s'agit alors de les freiner dans un modérateur qui va ainsi s'échauffer, cette chaleur sera transformée en électricité, comme dans toute centrale thermique.

Le problème majeur, non encore résolu, pour que le bilan énergétique soit positif, autrement dit que l'énergie produite soit supérieure à l'énergie introduite pour provoquer la fusion est tout simplement de pouvoir rapprocher suffisamment l'un de l'autre les deux noyaux, deutérium et tritium. Les forces en présence sont d'une part la force électrostatique, répulsive puisque les deux noyaux sont chargés positivement, et la force nucléaire forte, qui n'est attractive que sur une distance extrêmement faible. On sait que la répulsion électrostatique, qui décroît comme le carré de la distance, augmente fortement si cette distance diminue. Toute la difficulté est là. On calcule facilement que si on veut rapprocher l'un de l'autre un noyau de deutérium et un de tritium de façon à ce que la distance entre leur centre n'excède pas $4 \cdot 10^{-15}$ m, il faut une force de plus de 10 N ! On calculerait aussi l'énergie cinétique que doivent posséder ces noyaux pour se rencontrer. Le problème est de pouvoir leur donner cette énergie cinétique. C'est assez banal dans un accélérateur de particules mais la quantité de noyaux y est relativement dérisoire et ce n'est pas le bon instrument pour récupérer de l'énergie. Il faut chauffer un mélange de tritium et de deutérium de façon à leur donner d'énormes énergies d'agitation thermique. On parle de fusion *thermonucléaire*. On calcule encore que le mélange doit alors atteindre quelques milliards de degrés ! Deux méthodes sont à l'oeuvre dans quelques centres de recherche :

a) *Le confinement inertiel*: le mélange est soumis à des impulsions laser extrêmement puissantes et brèves qui poussent violemment les noyaux les uns contre les autres. Notons qu'à de telles températures, les atomes sont dépouillés de leurs électrons, quelques dizaines de milliers de degrés suffisent pour cela. La matière est dans son quatrième état, l'état de *plasma*, mélange de ions, de noyaux et d'électrons.

b) *Le confinement magnétique*: le plasma est maintenu dans un volume aussi faible possible pour favoriser les chocs entre noyaux. Il est bien sûr fait de particules chargées et peut ainsi être conduit par des champs électromagnétiques et chauffé en étant parcouru par d'énormes courants électriques (plusieurs millions d'ampères). De telles installations expérimentales portent le nom de Tokamak; il en existe un, relativement modeste à l'école polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL). Un grand projet à l'échelle planétaire est en construction à Cadarache, dans le sud de la France, il est baptisé ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor). Il est destiné, non seulement à la recherche sur la fusion, mais à la production d'énergie dans les années à venir, vers 2020, selon les prévisions.

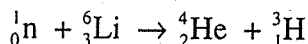
Comme déjà dit, les réactions de fusion se produisent dans ces installations mais pendant des durées de l'ordre de la seconde, voire de la minute seulement, pour s'arrêter ensuite, le plasma s'étant refroidi, alors qu'il faudrait qu'elles puissent se produire en continu, en permanence, pour que le bilan énergétique soit positif.

A consulter absolument (très complet): <http://www-fusion-magnétique.cea.fr>

Fission / fusion

Lorsque les réserves d'uranium seront en voie d'épuisement, les centrales à fission seront détruites et les centrales à fusion devront pouvoir prendre le relai. Pour ces dernières, le problème de l'approvisionnement en carburant se posera moins

puisqu'il s'agit d'isotopes de l'hydrogène: le deutérium se trouve en abondance dans l'eau même si le rapport ${}^2\text{H}/{}^1\text{H}$ n'y est que de $1,5 \cdot 10^{-4}$. Reste le tritium ${}^3\text{H}$, radioactif, émettant des β de faible énergie (0,019 MeV) donc très faciles à arrêter. Il est relativement simple de le fabriquer. Il est obtenu en bombardant des noyaux de lithium avec des neutrons selon la réaction:



Il s'agit du lithium 6 dont l'abondance naturelle est de 7,5 %, le reste étant du ${}^7\text{Li}$. Le lithium est un métal très léger, proche du sodium, et assez abondant dans la croûte terrestre pour satisfaire les besoins en énergie pendant plusieurs siècles. Notons qu'il est prévu que le neutron produit lors de la fusion deutérium-tritium puisse être utilisé sur le lithium pour produire du tritium.

Un autre inconvénient de la fission est le gros problème des déchets. Il se posera beaucoup moins avec la fusion puisque les produits des réactions sont d'inoffensifs atomes d'hélium.

8. Propagation du rayonnement

Absorption dans la matière

En pénétrant dans la matière, les particules sont ralenties, voire stoppées. Le nombre de particules y entrant par unité de temps, ce qu'on nomme le flux I , aura été atténué et sera plus faible à la sortie, si l'épaisseur de matière n'était pas suffisante pour l'annuler complètement.

Soit un échantillon absorbant d'épaisseur d . Le flux de particule arrive perpendiculairement à sa surface. Plaçons un axe Ox dans le sens de ce flux. Sur une tranche d'épaisseur Δx , le flux $I(x)$ aura diminué de ΔI qui sera donc négatif.

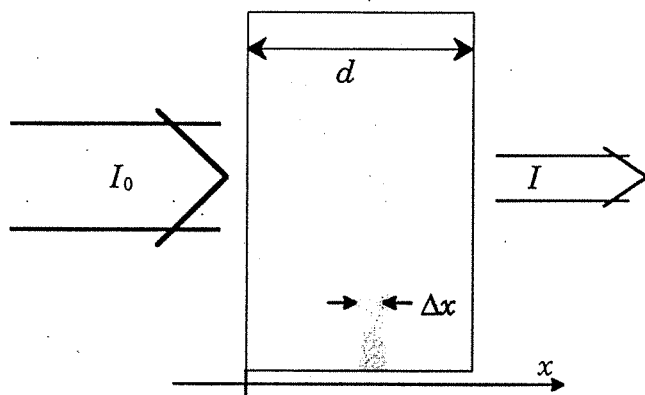


Fig. 9

Soit $I(x)$ le flux à l'entrée de la tranche et $I(x+\Delta x) = I(x) + \Delta I$ le flux à sa sortie. Il est naturel de poser que :

- 1° ΔI est proportionnel à $I(x)$, et
 - 2° ΔI est proportionnel à Δx , par conséquent
- ΔI est proportionnel au produit $I(x)\Delta x$.

Une constante de proportionnalité permet d'écrire l'égalité :

$$\Delta I = -\mu I(x)\Delta x.$$

Le signe "−" est nécessaire puisqu'il n'y a que ΔI qui soit négatif.

Cette constante μ est la caractéristique matérielle de la substance absorbante pour ce genre de processus, au même titre que la résistivité ρ est la caractéristique matérielle d'une substance en électricité. C'est le coefficient d'absorption, on en trouve des valeurs dans des tables spécialisées. Il dépend non seulement de la matière, mais

aussi du genre de particules et de leur énergie.

La relation ci-dessus s'écrit aussi :

$$\frac{\Delta I}{\Delta x} = -\mu I(x)$$

Il est intéressant de considérer une épaisseur Δx aussi petite qu'on veut, produisant une variation ΔI infiniment petite aussi. On fait donc un passage à la limite pour Δx tendant vers zéro; la relation ci-dessus s'écrit alors :

$$\lim(\Delta x \rightarrow 0) \frac{\Delta I}{\Delta x} = \frac{dI}{dx} = -\mu I$$

Le quotient différentiel dI/dx n'est autre que la *dérivée* de la fonction $I(x)$ par rapport à x , et cette dérivée, on le voit, est égale, à la constante μ près, à la fonction elle-même. La seule fonction qui soit égale à sa dérivée - à une constante multiplicative près - est la fonction exponentielle $e^{\pm ax}$, comme on le sait du § 5. Posons alors :

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

C'est ainsi que décroît le flux de particules traversant la matière. Pour s'en convaincre, il suffit de dériver $I = I_0 e^{-\mu x}$, ce qui donne $-I_0 \mu e^{-\mu x} = -\mu I$. On contrôle aussi que $I = I_0$ si $x = 0$ puisque $e^0 = 1$.

La pénétration dans la matière donnée par l'exponentielle ci-dessus est vraie pour tous les types d'ondes électromagnétiques, donc aussi bien pour les photons de la lumière visible et pour les photons γ de la radioactivité.

Par contre, pour la radioactivité β , la décroissance se comporte un peu différemment, le phénomène est plus compliqué, les particules étant chargées. Pour le rayonnement α , la situation est encore différente et n'est cette fois plus du tout représentée par une simple exponentielle. La théorie explicative présentant des difficultés, on se contentera de l'aspect expérimental en travaux pratiques pour les radioactivités α et β alors que pour le rayonnement γ , l'expérience devra pouvoir vérifier la théorie présentée ci-dessus.

Propagation dans le vide

Le but est maintenant de trouver comment diminue le flux de particules reçu sur le détecteur à mesure qu'on l'éloigne de la source.

Prenons une source ponctuelle, a priori de n'importe quoi, mais par exemple de particules ou de lumière, et émettant de façon isotrope, c'est-à-dire uniformément dans toutes les directions. Plaçons cette source au centre de deux sphères concentriques de rayons r_1 et r_2 (Fig. 10) :

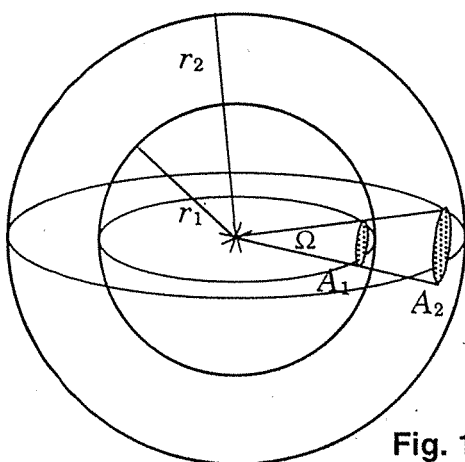


Fig. 10

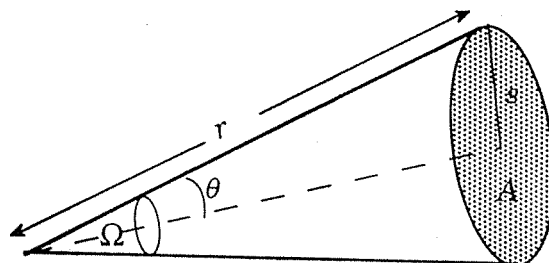


Fig. 11

On y voit un cône dont le sommet coïncide avec la source et dont l'intersection avec une sphère est un cercle de rayon s et d'aire $A = \pi s^2$.

L'angle solide défini par ce cône se note Ω et est le rapport de l'aire interceptée sur la sphère par le carré du rayon de cette sphère :

$$\Omega = \frac{A}{r^2} = \frac{\pi s^2}{r^2} \quad (*)$$

Il n'a évidemment pas d'unité physique mais se mesure en stéradians (sr). On se convainc que, par exemple, l'angle solide d'une demi-sphère est de 2π sr. Cela doit rappeler la définition d'un angle en radian. Regardons la figure 11 à droite. On y voit ce même cône d'angle solide Ω et de demi-angle au sommet θ . En radians il s'exprime comme le rapport de l'arc par le rayon, ici : $\theta = s/r$. La relation entre l'angle solide Ω et l'angle plan θ se trouve en calculant $s = \theta r \Rightarrow s^2 = \theta^2 r^2 \Rightarrow \Omega = \pi \theta^2$.

Revenons à la radioactivité. Le flux de particule arrivant sur la surface A_1 est le même que celui tombant sur A_2 , il est proportionnel à Ω , mais le nombre par unité de surface y est moindre, cette aire étant plus grande selon la Fig. 10. Or le flux par unité de surface est proportionnel à Ω/A qui vaut $1/r^2$, selon (*).

Voilà la relation cherchée : lorsque la distance r à la source augmente, l'aire du détecteur, vue de la source, diminue, la conséquence est que le nombre de particules y tombant décroît comme $1/r^2$.

Table des matières

1. Bref historique	1
L'expérience de Rutherford	
Composition du noyau	
2. Caractéristiques du noyau	2
Tableau des masses	
Commentaires	
3. Stabilité et énergie de liaison	4
4. Radioactivité	6
Radioactivité alpha	
Radioactivité bêta	
Radioactivité gamma	
Radioactivité de neutrons	
5. Loi de décroissance radioactive	8
Préalable mathématique	
Exemples de calcul	
6. Lois de conservation	10
Conservation de la quantité de mouvement	
7. Production d'énergie	13
Centrales à fission	
Centrales à fusion	
8. Propagation du rayonnement	16
Absorption dans la matière	
Propagation dans le vide	
Exercices	19

Exercices

§ 1. Bref historique

§ 2. Caractéristiques du noyau

1) Ajouter la masse de l'électron à celle du proton puis soustraire celle du neutron. Exprimer le résultat en keV. Discuter le résultat.

Rép: -783 keV.

2) Combien de neutrons pourrait-on aligner sur 1 mm s'ils avaient la densité de l'eau ?

Rép: env. 6,8 millions.

3) Quel serait le diamètre de la Terre si elle avait la densité d'un proton ?

Rép: 368 m.

4) Une balance de précision peut mesurer des masses de 1 mg. Combien cela fait-il en GeV ?

Rép: $5,6 \cdot 10^{20}$.

5) a) Quel pourrait être le noyau ayant un diamètre trois fois plus grand que celui de l'hélium 4 ?

b) Quel pourrait être le noyau ayant un diamètre quatre fois plus grand que celui de l'hélium 3 ?

Rép: a) ; b)

6) Ecrire en notation A_ZX l'atome: a) de silicium comportant 12 neutrons; b) d'argon comportant 21 neutrons; c) de palladium comportant 60 neutrons; d) de californium comportant 156 neutrons.

Rép: a) ; b) ; c) ; d)

§ 3. Stabilité et énergie de liaison


1) En consultant le F&T :

a) Quel est l'isotope naturel qui a le rapport A/Z le plus élevé, et combien vaut-il ?

b) Quel est celui qui a le rapport A/Z le plus faible, et combien vaut-il ?

c) Dans cette liste du F&T, quels sont les noyaux pour lesquels $A/Z = 2$?

2) Compléter cet utile tableau de conversion d'unités. On rappelle que $E = mc^2$ avec ici la valeur exacte de c .

	kg	uma	MeV
kg	1		$5,60958 \cdot 10^{29}$
uma	$1,66054 \cdot 10^{-27}$	1	
MeV			1

3) En calculant le défaut de masse, déterminer l'énergie moyenne de liaison par nucléon de l'uranium 238.

Rép: 7,59 MeV.

4) Dans les centrales expérimentales à fusion (voir § 7), les réactions suivantes se produisent : ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n} + 17,6 \text{ MeV}$. Cette énergie est sous forme cinétique des particules résultantes.

a) Calculer la masse atomique du tritium.

b) Au moyen de ce résultat, calculer son énergie de liaison par nucléon.

Rép: a) 3,01606 uma; b) 2,65 MeV.

§ 4. Radioactivité

1) Les noyaux suivants sont émetteurs alpha. Ecrire la réaction sous la forme : ${}^A_Z\text{X} \rightarrow \alpha + {}^A_Z\text{Y}$. a) Dysprosium 154; b) Platine 190; c) Plomb 204; d) Radium 226.

Rép: a) ; b) ; c) ; d)

2) La plupart des émetteurs alpha donnent plusieurs α d'énergies différentes. Le thorium 223, de 223,0209 uma en donne un seul. Calculer son énergie en MeV.

Rép: 7,73 MeV. *Remarque : L'expérience donne 7,55 MeV car une petite fraction de l'énergie cinétique a été prise par le noyau fils.*

3) Le strontium 90 est émetteur β^- , il devient du zirconium 90 stable par une deuxième émission β^- .

a) Ecrire les deux équations de réaction.

b) L'énergie emportée par chaque électron est respectivement de 0,546 MeV et 2,273 MeV. Sachant que la masse atomique du zirconium 90 est de 89,9043 uma, calculer la masse atomique du strontium 90.

Rép: b) 89,9084 uma.

4) L'uranium 235 est émetteur alpha donnant un autre élément instable. Il s'ensuit une succession d'émissions α et β^- aboutissant au plomb 207 stable.

Combien y a-t-il eu de noyaux intermédiaires ? *Indication* : compter les α émis puis les β^- .

Rép: dix.

§ 5. Loi de décroissance radioactive

1) Tracer le graphe de la fonction $y = e^{-x}$ pour $0 \leq x \leq 4$, les valeurs de x étant échelonnées tous les 0,4 (échelle : $e^0 \longleftrightarrow 10$ cm).

2) L'affaire Litvinenko en novembre 2006 a mis en évidence l'existence du polonium 210 et sa dangerosité. Cet isotope est émetteur alpha avec une demi-vie de 138,4 jours et en donnant du plomb 206 stable.

Calculer l'activité de 1 g de $^{210}_{84}\text{Po}$ en poudre fine.

Rép: $1,65 \cdot 10^{14}$ Bq.

3) Un élément radioactif a une demi-vie $T_{1/2}$ et un nombre N_0 de noyaux non désintégrés en $t = 0$. Quelle sera la fraction N/N_0 de noyaux restant après une, deux, ... six demi-vies ?

Rép: $1,56 \cdot 10^{-2}$ après $6T_{1/2}$.

4) Soit une mole d'un échantillon de matière radioactive. La demi-vie étant de 2 ans et 141 jours, calculer l'activité de cet échantillon.

Rép: $5,54 \cdot 10^{15}$ Bq.

5) Le carbone naturel, contenu dans les êtres vivants est essentiellement du $^{12}_6\text{C}$, avec tout petit peu de $^{13}_6\text{C}$ et des traces de $^{14}_6\text{C}$ radioactif, d'une demi-vie de 5730 ans. Un échantillon d'une mole d'un tel carbone donne une activité de 2,72 Bq. Calculer alors la proportion de $^{14}_6\text{C}/^{12}_6\text{C}$.

Rép: $1,18 \cdot 10^{-12}$.

6) Dans une fouille archéologique, on recueille un ossement contenant 1,2 g de carbone. Son activité est mesurée et donne 4,65 désintégrations par minute. Déterminer combien d'années avant la mesure l'animal est mort (utiliser l'ex. 5)).

Rép: 10'375 ans.

7) La matière radioactive d'un échantillon a une demi-vie de 3,01 s. Après combien de temps le nombre de noyaux initial aura-t-il diminué d'un facteur :

a) 10; b) 100; c) 1000; d) 10'000 ?

Rép: a) 10 s; b) 20 s; c) 30 s; d) 40 s.

8) Que vaut la constante de désintégration λ d'une substance radioactive si l'activité est A_0 en $t = 0$ et est $A' = A_0/20$ une année plus tard ?

Rép: $9,5 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$.

§ 6. Lois de conservation

1) **Billard**: Soient deux boules. Elles ont la même masse. L'une est immobile et l'autre se dirige vers elle à la vitesse \mathbf{v}_1 . Le choc est élastique et central, c'est-à-dire que tout va se passer selon une seule direction. Trouver \mathbf{v}_1' et \mathbf{v}_2' .

Rappel : Lors d'un choc, la qdm est toujours conservée; si de plus, le choc est élastique, l'énergie cinétique est aussi conservée.

2) **Billard, suite**: Même situation que ci-dessus, sauf que le choc n'est pas central, tout se passe dans un plan : \mathbf{v}_1' fait un angle de $26,6^\circ$ avec \mathbf{v}_1 .

a) Montrer que les vecteurs-vitesse des deux masses sont orthogonaux.

b) En se donnant un système d'axes Oxy , Ox dans le sens de \mathbf{v}_1 , trouver les relations entre v_1 et les deux nouvelles vitesses v_1' et v_2' .

3) Expliquer pourquoi, lors d'une désintégration alpha ou beta, l'énergie cinétique n'est pas conservée ?

4) Un proton ayant une vitesse $v_1 = 4 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ percute un noyau de ${}^3_2\text{He}$ immobile. Le choc est central et élastique. Calculer les nouvelles vitesses v_1' et v_2' .

Rép: $2 \cdot 10^7 \text{ m/s}$ pour les deux.

5) Même situation que ci-dessus mais la masse m_2 , initialement immobile est telle que $m_2 = km_1$, où m_1 est la particule incidente et $k \geq 1$ et entier.

Calculer les vitesses \mathbf{v}_1' et \mathbf{v}_2' . Contrôle au moyen des réponses des ex. 1) et 4).

Rép: $\mathbf{v}_1' = -(k-1)/(k+1)\mathbf{v}_1$, $\mathbf{v}_2' = 2/(k+1)\mathbf{v}_1$.

§ 7. Production d'énergie

1) En admettant qu'on puisse (mais on ne peut pas) extraire toute l'énergie de liaison des nucléons dans les noyaux, calculer quelle est l'énergie, en MeV, en joules et

en kWh, contenue dans 1 g de ${}^4_2\text{He}$ puis dans 1 g de ${}^{209}_{83}\text{Bi}$?

Rép: $4,1 \cdot 10^{24}$ MeV $\approx 6,5 \cdot 10^{11}$ J $\approx 180'000$ kWh; un peu plus pour ${}^{209}_{83}\text{Bi}$.

2) En admettant qu'on puisse (mais on ne peut pas encore) remplacer dans une voiture le réservoir d'essence, le carburateur, etc, par un *petit réacteur à fission*, quelle serait la quantité (en poids) nécessaire d'uranium enrichi à 3 % pour remplacer l'essence d'une voiture roulant 20'000 km en une année et brûlant en moyenne 10 litres d'essence aux 100 km ? *Indications* : a) Densité de l'essence : env. 0,8. b) Chaque fusion d'un noyau de ${}^{235}_{92}\text{U}$ donne env. 200 MeV.

Rép: env. 30 g.

3) Les ménages du futur disposeront peut-être d'un *petit réacteur à fission* pour leur eau chaude. Admettons que leur besoin quotidien est de 100 litres d'eau chauffée de 15 à 70 °C. Dans le réacteur est placé 10 g d'uranium naturel enrichi à 4 % de 235. Calculer combien de temps le réacteur pourra remplir son oeuvre.

Rép: un peu moins de 4 ans.

§ 8. Propagation du rayonnement

1) Pénétration des gamma dans la matière. Le coefficient d'absorption μ de l'expression $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$ est approximativement proportionnel au nombre de masse A des noyaux de la substance.

Sachant que la pénétration moyenne d'un faisceau de γ dans l'aluminium est de 2 cm, calculer sa pénétration moyenne dans le plomb.

Rép: 2,6 mm.

2) Un faisceau de γ d'intensité I_0 a traversé une épaisseur $x_1 = 1$ cm de matière, il en est ressorti avec une intensité $I_1 = I_0/5$. Ayant traversé x_2 de cette même substance, l'intensité fut de $I_2 = I_0/20$. Calculer la valeur de μ et celle de x_2 .

Rép: $1,61 \text{ cm}^{-1}$; 1,86 cm.

3) La puissance de rayonnement solaire reçue sur Terre, hors atmosphère, est de 1,39 kW sur chaque m^2 perpendiculaire aux rayons.

a) Calculer la puissance totale émise par le Soleil.

Le Soleil produit de l'énergie par des réactions de fusion nucléaire qui sont schématiquement la fusion de quatre noyaux de ${}^1_1\text{H}$ pour donner un noyau de ${}^4_2\text{He}$.

b) Ecrire la réaction.

c) Calculer le nombre de telles fusions se produisant chaque seconde pour produire la puissance de a).

d) Calculer la diminution de la masse solaire que cela provoque chaque seconde et la diminution *relative* de masse pour un million d'années.

Rép: a) $3,9 \cdot 10^{26}$ W; c) env. 10^{38} ; d) $4,4 \cdot 10^9$ kg/s; env. $7 \cdot 10^{-8}$.