

TIPE CONCOURS 2002 : NOYAUX ET PARTICULES

Première partie : Particules de grande énergie.

L'essentiel.

La relativité restreinte postule l'invariance, lors d'un changement de référentiel galiléen :

- de la célérité c de la lumière dans le vide,
- de la forme des lois physique,
- de la masse.

Définitions de mécanique relativiste, avec $\beta = v/c \leq 1$ et $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2} \geq 1$:

- quantité de mouvement relativiste : $\mathbf{p} = \gamma m \mathbf{v}$
- énergie cinétique relativiste : $E_c = (\gamma - 1) m c^2$
- énergie totale : $E = \gamma m c^2$
- énergie de masse ou énergie au repos : $E_0 = m c^2$.

D'où les relations utiles: $E = E_c + E_0$ et $E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$.

Energies en MeV (1 MeV = $10^6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}$ J); p en $\text{MeV} \cdot c^{-1}$; m en $\text{MeV} \cdot c^{-2}$, unité de masse atomique: $1u = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$.

Particule non relativiste : $1 < \gamma < 1,1$; relativiste : $1,1 < \gamma < 10$; ultrarelativiste : $\gamma > 10$ (alors $v \approx c$ et $E = pc$).

Au cours d'un choc relativiste on a :

- conservation de la charge,
- conservation de la quantité de mouvement,
- conservation de l'énergie totale.

Le choc est *élastique* si la nature des particules est conservée, alors $\Delta E = 0 \Rightarrow \Delta(E_c + E_0) = 0 \Rightarrow \Delta E_c = 0$ (car $\Delta E_0 = 0$).

Le choc est *inélastique* sinon, alors $\Delta E \neq 0 \Rightarrow \Delta(E_c + E_0) \neq 0 \Rightarrow \Delta E_c = -\Delta E_0$:

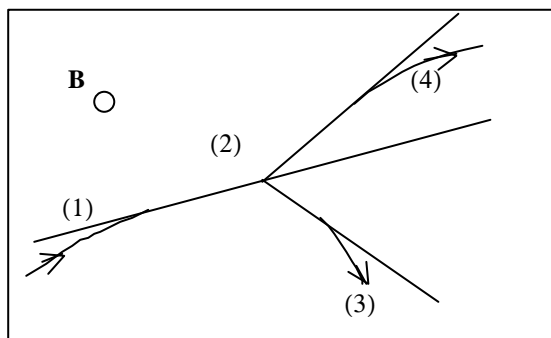
- une perte de masse correspond à une création d'énergie cinétique,
- une création de masse correspond à une perte d'énergie cinétique.

Dans une chambre à bulle, si $\mathbf{v}_0 \perp (\mathbf{B} = c\mathbf{te})$ la trajectoire d'une particule est un cercle de rayon $R = \frac{p}{|q|B}$ (conservé en relativité).

Exercice 1.

Grâce à l'enregistrement obtenu dans une chambre à bulles où règne un champ magnétique uniforme \mathbf{B} , on étudie le choc inélastique d'un proton (1) sur un proton immobile (2). La figure (non à l'échelle) représente la trajectoire de la particule incidente et des particules chargées résultant du choc (3) et (4), ainsi que leurs tangentes au point d'impact. Les valeurs des rayons de courbure et des angles entre les tangentes sont respectivement :

$R_1 = 430 \text{ cm}$; $p_1 = 2033 \text{ MeV} \cdot c^{-1}$; $\alpha_1 = 0$ (référence) ; $R_3 = 113 \text{ cm}$; $\alpha_3 = 55^\circ$; $R_4 = 185 \text{ cm}$; $\alpha_4 = 27^\circ$.



1.a) \mathbf{B} étant perpendiculaire au plan de figure, indiquer son sens sur le schéma.

1.b) Déterminer le signe des charges des particules enregistrées après le choc.

1.c) Calculer les quantités de mouvement p_3 et p_4 des particules (3) et (4) dans l'hypothèse où $|q_1| = |q_2| = |q_3| = |q_4|$.

1.d) Une particule (5) est apparue lors du choc. Calculer sa quantité de mouvement p_5 (résolution graphique avec, pour échelle, 1 cm pour $200 \text{ MeV} \cdot c^{-1}$).

2. Considérer les différentes hypothèses possibles sur la nature des particules émises après le choc :

1^{ère} hypothèse : $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$; seconde : $p + p \rightarrow p + \pi^+ + n$; troisième : $p + p \rightarrow \pi^+ + p + n$.

Pour chaque hypothèse, calculer : $\Delta E = E_3 + E_4 + E_5 - (E_1 + E_2)$. En déduire l'hypothèse la plus probable.

Données : $m_p = 938 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$; $m_n = 939 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$; $m_{\pi^0} = 135 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$; $m_{\pi^+} = 139 \text{ MeV} \cdot c^{-2}$.

Deuxième partie : Noyaux atomiques.

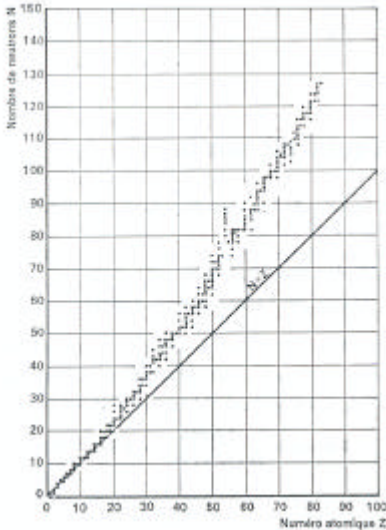
L'essentiel.

Un nucléide est l'ensemble des noyaux ayant même nombre de charge Z et même nombre de masse A : ${}^A_Z X$.

Au cours d'une réaction nucléaire on a :

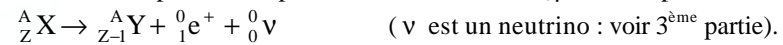
- conservation du nombre de charge Z ,
- conservation du nombre de nucléons A ,
- conservation de la quantité de mouvement,
- conservation de l'énergie totale : $\Delta(E_c + E_0) = 0 \Rightarrow \Delta E_c = -\Delta E_0$.

Stabilité des noyaux :

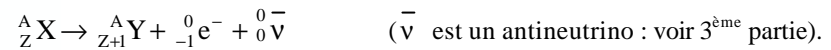


Les nucléides instables se désintègrent spontanément : c'est la radioactivité. (On compte environ 60 nucléides instables sur 350 nucléides naturels, tous les nucléides artificiels sont instables.)

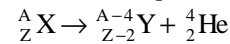
Nucléides trop riches en protons : **émetteurs β^+** (β^+ est un positon e^+) :



Nucléides trop riches en neutrons : **émetteurs β^-** (β^- est un électron) :

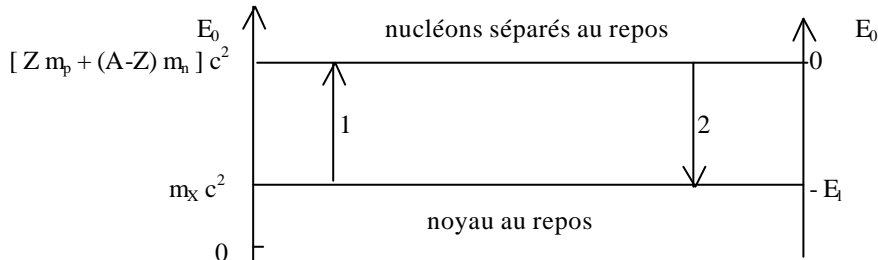


Nucléides trop lourds : **émetteurs α** (α est un noyau d'hélium) :

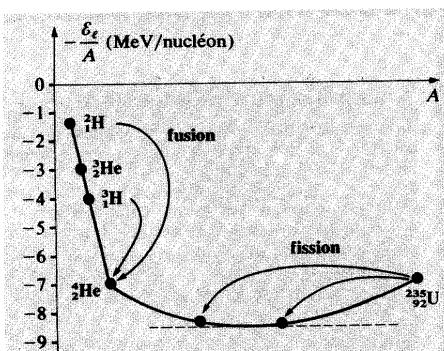


Vocabulaire : X noyau père ; Y noyau fils.

L'énergie de liaison est l'énergie qu'il faut fournir au noyau au repos pour le séparer en ses constituants au repos (la masse d'un noyau est plus faible que celle de ses constituants) :



- Pour la réaction 1 : ${}^A_Z X \rightarrow Z p + (A-Z) n$: $E_1 = [Z m_p + (A-Z) m_n - m_X] c^2 = \Delta E_0 > 0$: consommation d'énergie et création de masse.
- Pour la réaction 2 : $Z p + (A-Z) n \rightarrow {}^A_Z X$: $-E_1 = [m_X - Z m_p - (A-Z) m_n] c^2 = \Delta E_0 < 0$: libération d'énergie et perte de masse.
- Un nucléide est d'autant plus stable que son énergie de liaison par nucléon E_l/A est grande (sur la figure l'origine des énergies est prise pour les nucléons au repos) :



Les noyaux moyens ($50 < A < 75$) sont les plus stables ($E_l/A \approx 8,7$ MeV/nucléon).

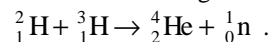
Dans une recherche de plus grande stabilité :

deux noyaux légers fusionnent pour donner un noyau « moyen », c'est la réaction nucléaire de **fusion** (bombe H, Soleil et étoiles) ;

un noyau lourd fissionne pour donner deux noyaux moyens, c'est la réaction nucléaire de **fission** (bombe A, centrales nucléaires).

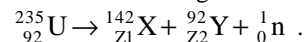
Exercice 2 : fusion et fission.

1. Calculer l'énergie libérée au cours de la fusion nucléaire suivante :



Les énergies de liaison par nucléon sont de 1,11 MeV pour le deutérium, 2,83 MeV pour le tritium et 7,07 MeV pour l'hélium.

2. Calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235 selon la réaction :

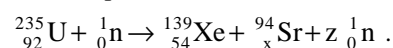


Les énergies de liaison par nucléon sont de 8,45 MeV pour le noyau X, 8,8 MeV pour le noyau Y et 7,7 MeV pour le noyau d'uranium.

Exercice 3 : fission contrôlée.

Un réacteur d'une centrale nucléaire fonctionne à l'uranium enrichi (3% d'uranium 235 fissile et 97% d'uranium 238 non fissile).

1. Par capture d'un neutron lent, le noyau ${}^{235}_{92}\text{U}$ subit la fission suivante :



1.a) Calculer x et z.

1.b) Calculer l'énergie libérée par la fission d'un noyau d'uranium 235. L'exprimer en joules et en MeV.

1.c) Quelle serait, en T.E.P. (tonne équivalent pétrole), l'énergie fournie par la fission d'une mole d'uranium 235 ?

2. L'uranium 238 non fissile du réacteur se transforme par capture d'un neutron lent en noyau radioactif. Ecrire l'équation de cette réaction nucléaire. Quel est ce noyau ?

Ce noyau radioactif subit deux désintégrations β^- pour arriver à un noyau fissile. Ecrire les équations représentant ces deux réactions nucléaires successives et identifier les noyaux formés (à ce titre l'uranium 238 est dit fertile).

Données : $c = 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$; $1 \text{ T.E.P.} = 42.10^{19} \text{ J}$; $e = 1,602.10^{-19} \text{ C}$; $1u = 1,66.10^{-27} \text{ kg}$.

Masses des noyaux participant à la réaction :

Noyaux	${}^{139}_{54}\text{Xe}$	${}^{94}_x\text{Sr}$	${}^{235}_{92}\text{U}$	${}^1_0\text{n}$
Masse (u)	138,888 2	93,894 6	235,013 4	1,008 7

Extrait de la classification périodique :

Z	90	91	92	93	94	95	96	97
Symbole	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk

Troisième partie : Réactions nucléaires spontanées: la radioactivité.

L'essentiel.

Les radioactivités α et β sont l'une et l'autre accompagnées de l'émission d'un rayonnement γ (photons de longueur d'onde dans le vide comprise entre 10^{-14} et 10^{-12} m).

Les particules α sont arrêtées par une feuille de papier.

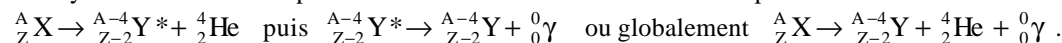
Les particules β sont arrêtées par 7 mm d'aluminium.

Les rayonnements γ sont arrêtés par 20 cm de plomb.

Ces réactions spontanées se font avec perte de masse : $\Delta E_c = -\Delta E_0 > 0$.

Radioactivité α :

Le noyau fils est en réalité produit dans un état excité et se désexcite spontanément en émettant un photon γ :

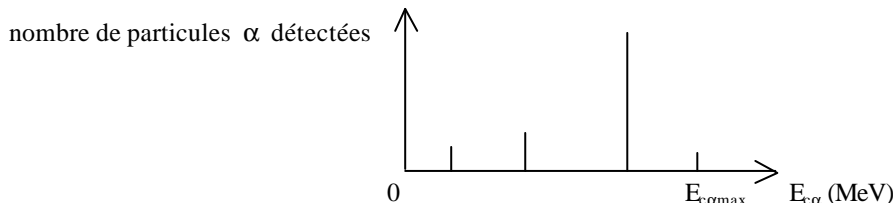


Le photon étant de masse nulle : $E_\gamma = E_c\gamma$, la conservation de l'énergie : $\Delta E_c = -\Delta E_0$ s'écrit, pour un noyau père au repos :

$E_{cY} + E_{c\alpha} + E_\gamma = E_{0X} - E_{0Y} - E_{0\alpha}$, et en négligeant l'énergie cinétique de recul du noyau fils (bien plus lourd que la particule α) :

$E_{c\alpha} + E_\gamma = E_{0X} - E_{0Y} - E_{0\alpha}$.

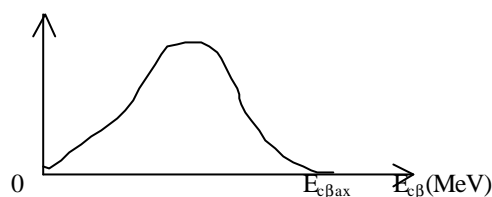
La quantification de E_γ entraîne celle de $E_{c\alpha}$:



Radioactivité β^- :

Ici encore, le noyau fils est en réalité produit dans un état excité et se désexcite spontanément en émettant un photon γ .
 Mais on observe un spectre continu des $E_{c\beta}$:

nombre de particules β^- détectées



Il faut admettre l'existence d'une particule de masse nulle et de charge nulle emportant une partie de l'énergie : le neutrino ou l'antineutrino.

Radioactivité β^+ : globalement : ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} Y + {}^0_1 e^+ + {}^0_0 \nu + {}^0_0 \gamma$ (ou : un proton se transforme en neutron).

Et en négligeant l'énergie cinétique de recul du noyau fils, la conservation de l'énergie $\Delta E_c = -\Delta E_0$ s'écrit :

$$E_{c\beta^+} + E_{\nu^+} + E_{\gamma} = E_{0X} - E_{0Y} - E_{0\beta^+}.$$

La quantification de E_{γ} entraîne celle de $(E_{c\beta^+} + E_{\nu^+})$ mais E_{ν^+} n'étant pas quantifié, $E_{c\beta^+}$ ne l'est pas.

Radioactivité β^- : globalement : ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e^- + {}^0_0 \bar{\nu} + {}^0_0 \gamma$ (ou : un neutron se transforme en proton).

Avec les mêmes remarques que pour β^+ .

Loi de décroissance radioactive :

Le nombre moyen N de noyaux radioactifs dans un échantillon à l'instant t est : $N(t) = N(t=0) \exp(-\lambda t)$.

λ est la constante de désintégration, caractéristique du nucléide, en s^{-1} .

La période ou demi-vie est le temps au bout duquel la moitié des noyaux s'est désintégré : $T = \ln(2) / \lambda$.

L'activité d'un échantillon est le nombre moyen de désintégrations par seconde : $A(t) = -dN/dt = \lambda N$ et se mesure en becquerel (1 Bq = $1 s^{-1}$) (ancienne unité : le curie : 1 Ci = $3,7 \cdot 10^{10}$ Bq : c'est l'activité d'1 g de radium).

La mesure de $A(t)$, λ ou T d'un échantillon permet de connaître son âge.

Exercice 4 : radioactivité α .

Le noyau de plutonium ${}^{238}_{94}Pu$ se désintègre par radioactivité α , en donnant un isotope de l'uranium.

1. Ecrire l'équation de cette désintégration.

2. Les masses des noyaux intervenant ayant les valeurs suivantes :

$$m_{Pu} = 238,0496 \text{ u} ; m_U = 234,0410 \text{ u} ; m_{\alpha} = 4,0026 \text{ u},$$

envisageant le cas où il n'y aurait pas d'émission de rayonnement γ , écrire les équations exprimant la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie totale. Le noyau de plutonium est supposé immobile ; les noyaux formés sont non relativistes donc l'énergie totale est la somme de l'énergie de masse et de l'énergie cinétique non relativiste.

En déduire l'énergie cinétique de la particule α émise et l'énergie cinétique de recul du noyau d'uranium formé.

3. En réalité l'énergie cinétique d'une particule α émise peut avoir l'une des valeurs suivantes :

$$E_1 = 5,50 \text{ MeV} ; E_2 = 5,46 \text{ MeV} ; E_3 = 5,36 \text{ MeV} ; E_4 = 5,20 \text{ MeV} ; E_5 = 5,00 \text{ MeV}.$$

Interpréter l'existence de ce spectre discontinu de valeurs.

$$\text{Données : } 1u = 931,5 \text{ MeV} \cdot c^{-2} \text{ et } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot s^{-1}.$$

Exercice 5 : radioactivité β^- .

Données :

$$\text{Energie de liaison par nucléon pour le nucléide } {}^{24}_{11}Na : E_{l1} = 8,06 \text{ MeV/nucléon}.$$

$$\text{Energie de liaison par nucléon pour le nucléide } {}^{24}_{12}Mg : E_{l2} = 8,26 \text{ MeV/nucléon}.$$

$$\text{Energie de masse de l'électron : } E_{0e} = 0,51 \text{ MeV}.$$

$$\text{Energie de masse du proton : } E_{0p} = 938,2 \text{ MeV}.$$

$$\text{Energie de masse du neutron : } E_{0n} = 939,5 \text{ MeV}.$$

$$\text{Célérité de la lumière dans le vide : } c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot s^{-1}.$$

Le nucléide ${}^{24}_{11}Na$ est radioactif β^- ; sa désintégration produit, entre autres particules, une particule appelée antineutrino $\bar{\nu}$ dont la masse est nulle.

1. Ecrire l'équation nucléaire de cette désintégration. Exprimer littéralement, en fonction des données, l'énergie de masse du nucléide de départ et celle du nucléide formé et en déduire la valeur de l'énergie libérée par la désintégration.

2. On constate, lors de cette réaction, l'apparition d'un rayonnement γ produisant un spectre de raies.

2.a) Expliquer brièvement l'existence de ce spectre de raies.

2.b) Dans le cas où l'énergie de l'antineutrino est négligeable et où le nucléide formé n'est pas excité, l'énergie cinétique de l'électron éjecté est maximale, la calculer en négligeant l'énergie cinétique de recul du noyau formé.

Exercice 6 : datation au carbone 14.

Dans les végétaux, lors de leur formation, le rapport du nombre d'atomes ^{14}C au nombre d'atomes ^{12}C (taux de ^{14}C) vaut 10^{-12} . A l'abri de l'air, ce rapport suit une loi de décroissance radioactive.

1. Quel serait, en fonction de la période radioactive, l'âge d'un végétal fossile pour lequel le taux de ^{14}C vaut $0,125 \cdot 10^{-12}$?

2. A l'aide d'un compteur électronique d'impulsions et en utilisant les lois statistiques sur un grand nombre de mesures, on trouve que le nombre d'atomes de ^{14}C diminue d'un millionième de sa valeur en 2,483 jours. Calculer la constante radioactive ainsi que la période radioactive du ^{14}C . En déduire l'âge effectif du végétal fossile.

Quatrième partie : Réactions nucléaires provoquées.

L'essentiel.

Ces réactions sont provoquées en bombardant des noyaux avec des projectiles (noyaux d'hélium, neutrons (insensibles à l'interaction électrique)).

Radionucléides artificiels.

Les nucléides obtenus artificiellement sont tous radioactifs (voir 2^{ème} partie). C'est ainsi qu'on a obtenu les 2 nucléides manquant au tableau des éléments : le technétium ($Z=43$) et le prométhium ($Z=61$).

Utilisation de la fission : les réacteurs nucléaires.

La réaction de fission n'est facile qu'avec l' $^{235}_{92}\text{U}$ (0,7 % de l'uranium naturel qu'il faut par conséquent enrichir en $^{235}_{92}\text{U}$).

Cette réaction est du type de celle de l'exercice 3 : l'uranium 235 fissionne après avoir capturé un neutron lent (neutron thermique).

Pour N neutrons de la première génération :

N_1 auront provoqué une fission chacun

N_2 auront été capturés par des noyaux

N_3 se seront enfuis à travers la surface limitant le cœur du réacteur.

Le nombre moyen de neutrons résultant de la fission d'un $^{235}_{92}\text{U}$ étant 2,5, le rapport : $k = \frac{2,5 N_1}{N_1 + N_2 + N_3} = \frac{2,5 N_1}{N}$ est une

caractéristique essentielle du système (rôle des barres de contrôle en bore, matériau avide de neutrons, dans une centrale nucléaire) :

- $k > 1$: régime surcritique : le système diverge : bombe A ;
- $k = 1$: régime critique ou stationnaire : réaction en chaîne contrôlée : régime de fonctionnement du réacteur nucléaire,
- $k < 1$: régime sous-critique : le système converge : la réaction en chaîne s'arrête.

Les trois composantes d'une filière sont :

le combustible (par exemple uranium naturel ou enrichi à 3%),

le modérateur chargé de ralentir les neutrons sans trop les capturer (par exemple du graphite, de l'eau lourde ou de l'eau ordinaire)

le caloporteur (par exemple gaz carbonique, eau lourde ou eau ordinaire).

Les surrégénérateurs (à neutrons rapides, sans modérateur), aujourd'hui abandonnés pour des raisons techniques, produisent plus de combustible qu'ils n'en consomment (dans le cœur un mélange de $^{239}_{94}\text{Pu}$ et d'uranium enrichi à 15%, autour, de l'uranium appauvri obtenu après réaction dans une centrale classique, les neutrons rapides émis par le cœur transforment l' $^{238}_{92}\text{U}$ fertile en $^{239}_{94}\text{Pu}$ fissile).

Utilisation de la fusion thermonucléaire.

Pour vaincre la répulsion électrique lors de la réaction « proton + proton \rightarrow noyau d'hélium », il faut une température gigantesque (plusieurs millions de kelvin !).

C'est la réaction nucléaire du cœur des étoiles et donc du Soleil : $4 p + 2 e^- \rightarrow \alpha + 2 \nu$ (chaîne pp).

Dans les réacteurs expérimentaux (Tore-Supra au CEA Cadarache) on réalise ces températures pendant des temps très courts (de l'ordre de la minute) (nécessité du confinement magnétique du plasma).

Les bombes nucléaires.

A fission : **bombe A** ($k > 1$ est obtenu en mettant en contact deux masses dont la somme est supérieure à la masse critique (quelques kg), masse pour laquelle le nombre de neutrons produits en volume est supérieur à celui perdu en surface).

A fusion : **bombe H** (la haute température est obtenue par une "allumette à fission") : avec une enveloppe de $^{238}_{92}\text{U}$ on augmente la puissance explosive, sinon on favorise le rayonnement de neutrons : **bombe à neutrons**.

Danger des radionucléides.

Par irradiation, les cellules peuvent être détruites ou leur processus de division altéré.

La quantité d'énergie que cède un rayonnement à 1 kg de matière est la **dose absorbée** en **gray** ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J.kg}^{-1} = 100 \text{ rad}$).

A dose égale les effets biologiques des rayonnement dépendent de leur nature, caractérisée par l'E.B.R. (efficacité biologique relative) : on définit l'**équivalent de dose** en **sievert** :

équivalent-dose (Sv) = dose (Gy) x E.B.R. (avec $1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$).

Doses individuelles maximales admissibles :

due à la radioactivité naturelle (tellurique et cosmique) : $1 \text{ à } 5 \text{ mSv.an}^{-1}$

personnel de centrale nucléaire : 50 mSv.an^{-1}

dose entraînant la mort en quelques heures : 100 Sv .

Utilisation des radionucléides.

- Dans l'industrie : gammagraphie (contrôle des soudures des cuves de réacteurs), bêtagraphie (contrôle d'épaisseur d'objets minces).
- En médecine et biologie :
 Traitement des tumeurs par irradiation.
 Scintigraphie : les radionucléides sont utilisés comme traceurs (^{131}I pour étudier le métabolisme de la thyroïde).
- En agronomie et en agroalimentaire :
 Conservation des denrées par irradiation γ (destruction des insectes et des microorganismes).
 Utilisation de traceurs (atomes de phosphore radioactifs incorporés à un engrais).

Cinquième partie : les quarks.

L'essentiel.

Nous savons aujourd'hui que la matière est constituée à partir de deux familles de particules fondamentales, les leptons et les quarks, qui interagissent entre elles selon quatre types d'interactions :

leptons			
nom	symbole	E_0 (MeV)	charge (e)
électron	e^-	0,511	-1
neutrino de l'électron	ν_e	$< 2.10^{-5}$	0
muon	μ^-	106,6	-1
neutrino du muon	ν_μ	$< 0,3$	0
tau	t^-	1784	-1
neutrino du tau	ν_t	< 40	0

quarks			
nom	symbole	E_0 (MeV)	charge
haut (up)	u	4	2/3
bas (down)	d	7	-1/3
charme (charm)	c	1500	2/3
étrange (strange)	s	501	-1/3
beauté (bottom)	b	4700	-1/3
sommet (top)	t	> 90000	2/3

interaction	portée	intensité à 10^{-15} m comparée à l'interaction forte	bosons messagers	acteurs
gravitationnelle	infinie	10^{-38}	graviton	toutes les particules
électromagnétique	infinie	10^{-2}	photon	leptons chargés et quarks
nucléaire forte*	10^{-13} cm	1	gluon	quarks
nucléaire faible**	10^{-16} cm	10^{-13}	W^+, W^-, Z_0	leptons et quarks

*l'interaction forte est responsable de la cohésion des noyaux

**l'interaction faible se signale dans toutes les désintégrations où interviennent des neutrinos

Historique (d'après un article de « La Recherche » de mars 2001).

Nos connaissances sur la structure de la matière avant 1940 :

leptons (insensibles à l'interaction forte)	hadrons (sensibles à l'interaction forte)
électron e^-	proton p
neutrino de l'électron ν_e	neutron n
photon: vecteur de l'interaction électromagnétique	

En 1961, pour expliquer l'existence de nombreux hadrons (mis en évidence dans les accélérateurs de particules ou les rayons cosmiques) et notamment celle des *hadrons étranges* (qui ne se désintègrent pas selon les règles de l'interaction forte), *Murray Gell-Mann*, à l'aide de la théorie des groupes, introduit la notion de *quark* (nom tiré d'un vers de James Joyce), objet mathématique, dont la charge est une fraction de la charge unité ($\pm 2e/3$ ou $\pm e/3$). La découverte de la particule Ω , d'étrangeté 3, est la première confirmation expérimentale de la théorie de Gell-Mann.

Conjointement, en 1960, des recherches à l'accélérateur linéaire de Stanford montrent qu'à l'intérieur du neutron, comme du proton, on distinguait trois petits grains durs appelés *partons*, plus tard identifiés aux quarks.

Chronologie de la découverte des quarks :

date	quarks	commentaire
1960	u (up); d (down); s (strange)	u et d permettent de reconstituer tous les hadrons non étranges s présent dans les hadrons étranges
1974	c (charm)	c explique l'interaction électrofaible*
1977	b (bottom)	
1995	t (top)	

*l'interaction électrofaible rassemble les 2 aspects : interaction électromagnétique et interaction faible

Chronologie de la découverte des 3 familles de leptons et quarks en correspondance :

dates	couple de leptons	quarks correspondants
	électron e^- et neutrino de l'électron ν_e	u et d
1936 et 1962	muon μ^- et neutrino du muon ν_μ	s et c
1975	tau τ et neutrino du tau ν_τ	b et t

*L'assurance de l'existence de seulement 6 leptons dans l'univers implique celle de seulement 6 quarks.
 Avec les bosons messagers, vecteurs des quatre interactions, on a une description complète de l'univers.*

Où trouve-t-on les quarks ?

- u et d dans le proton et le neutron

(schématiquement : $p = 2u + d$ et $n = 2d + u$ ou en terme de charge : $1 = 2(2/3) + (-1/3)$ et $0 = 2(-1/3) + (2/3)$)

- s dans les particules cosmiques
- les quarks lourds (c, b et t (aussi lourd qu'un atome de plomb !!!)) dans les accélérateurs des physiciens
- et tous dans le « vide quantique »

Mais les quarks ne sont pas isolables : l'interaction entre quarks augmente quand on tente de les séparer.

Par contre, lorsque notre univers n'était âgé que d'une microseconde, sa température était compatible avec le déconfinement des quarks et des gluons.

La suite...

ferait appel à la théorie des supercordes (les particules élémentaires sont des cordes quantiques de 10^{-30} m de long qui évolueraient dans des tubes d'espace-temps dans des espaces à très grand nombre de dimensions)...

Réponses aux exercices.

Exercice 1.

1.a) **B** vers nous. 1.b) $q > 0$. 1.c) $p_i = \frac{R_i}{R_1} p_1$ donne $p_3 = 534 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-1}$ et $p_4 = 875 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-1}$. 1.d) $p_5 = 940 \text{ MeV} \cdot \text{c}^{-1}$.

2. 1ère hypothèse: $\Delta E = 135 \text{ MeV}$; 2ème hypothèse: $\Delta E = 117 \text{ MeV}$; 3ème hypothèse: $\Delta E = -13 \text{ MeV}$: bonne hypothèse.

Exercice 2.

1. $\Delta E_0 = -17,6 \text{ MeV}$. 2. $\Delta E_0 = -200 \text{ MeV}$.

Exercice 3.

1.a) $x = 38$ et $z = 3$. 1.b) $\Delta E_0 = -3,19 \cdot 10^{-11} \text{ J} = -199 \text{ MeV}$. 1.c) $|\Delta E_0| = 457 \text{ TEP}$.

2. ${}_{92}^{238}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{239}\text{U}$ puis ${}_{92}^{239}\text{U} \rightarrow {}_{-1}^0\text{e}^- + {}_{93}^{239}\text{Np} + {}_0^0\bar{\nu}$ puis ${}_{93}^{239}\text{Np} \rightarrow {}_{-1}^0\text{e}^- + {}_{94}^{239}\text{Pu} + {}_0^0\bar{\nu}$.

Exercice 4.

1. ${}_{94}^{238}\text{Pu} \rightarrow {}_2^4\text{He} + {}_{92}^{234}\text{U}$. 2. $E_{c\alpha} = \frac{m_{\text{Pu}} - m_{\alpha} - m_{\text{U}}}{1 + m_{\alpha}/m_{\text{U}}} c^2 = 5,50 \text{ MeV}$ et $E_{c\text{U}} = \frac{m_{\alpha}}{m_{\text{U}}} E_{c\alpha} = 0,094 \text{ MeV} \ll E_{c\alpha}$. 3. Le noyau fils est émis

dans des états excités d'énergies respectives (origine au fondamental) : 0,04 MeV ; 0,14 MeV ; 0,30 MeV ; 0,50 MeV.

Exercice 5.

1. ${}_{11}^{24}\text{Na} \rightarrow {}_{-1}^0\text{e}^- + {}_{12}^{24}\text{Mg} + {}_0^0\bar{\nu}$; $E_{0\text{Na}} = 11 E_{0\text{p}} + 13 E_{0\text{n}} - 24 E_{11}$; $E_{0\text{Mg}} = 12 E_{0\text{p}} + 12 E_{0\text{n}} - 24 E_{12}$

et $\Delta E = -E_{0\text{p}} + E_{0\text{n}} - E_{0\text{e}} + 24 (E_{12} - E_{11}) = 5,59 \text{ MeV}$. 2.a) Le noyau fils est produit dans des états excités. 2.b) $E_{c\beta} = 5,59 \text{ MeV}$.

Exercice 6.

1. $t = 3 T$. 2. $\lambda = 4,66 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ d'où $T = 4710 \text{ ans}$ et $t = 14100 \text{ ans}$