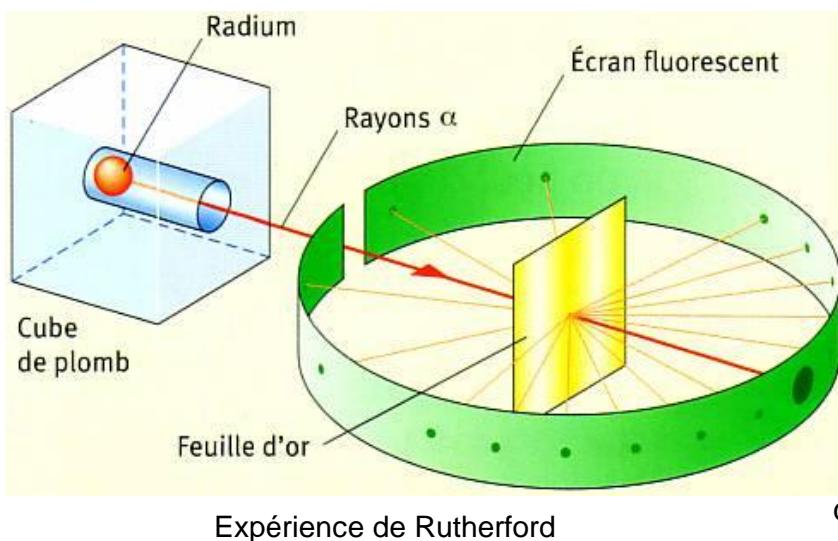
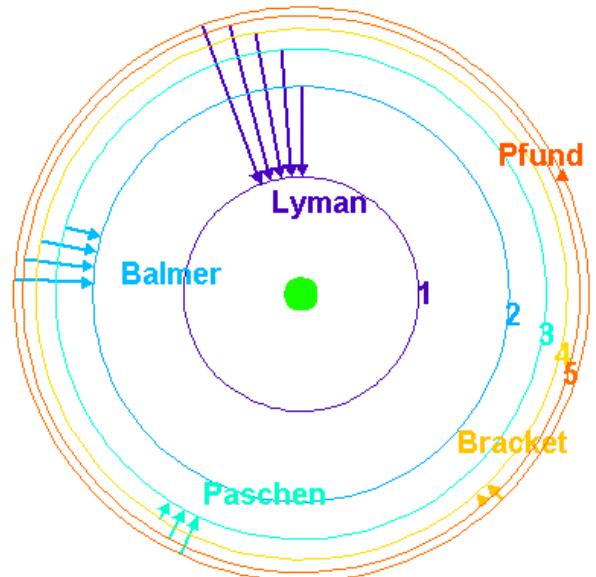
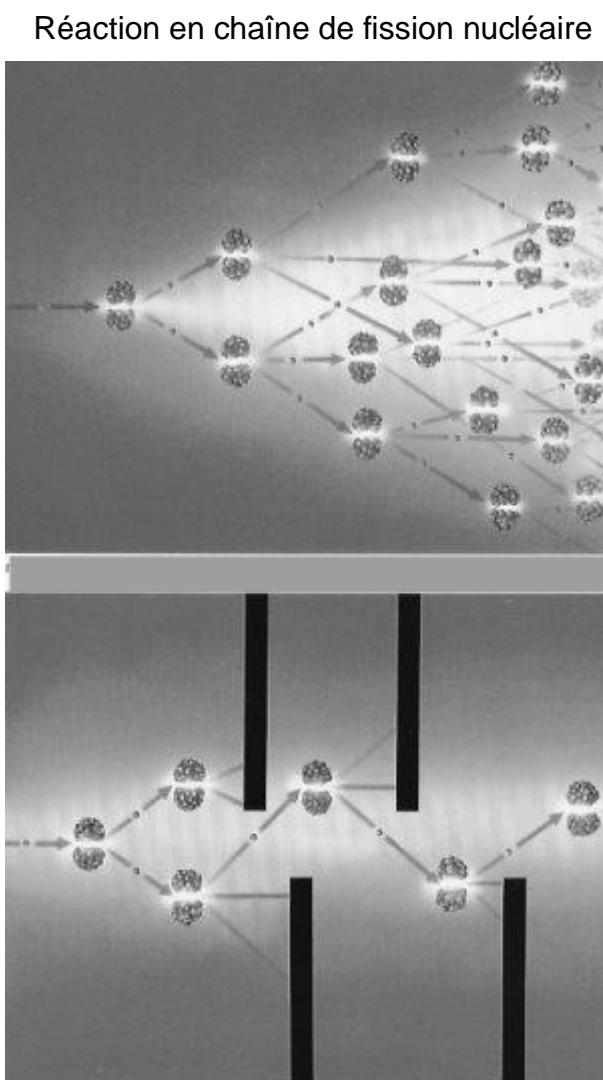


Chapitre 5 : Physique moderne



Spectre d'émission de l'atome d'hydrogène et modèle de Bohr



Réaction de fusion nucléaire DT

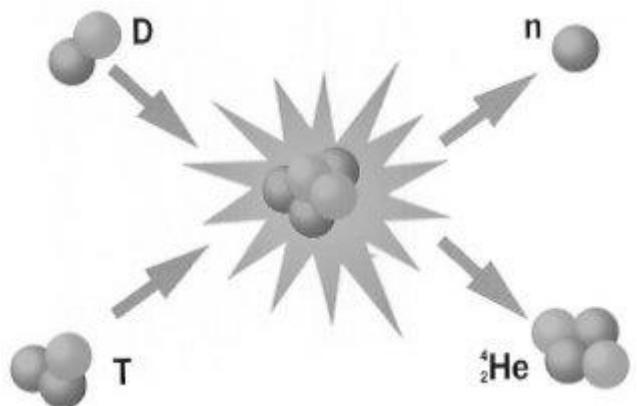
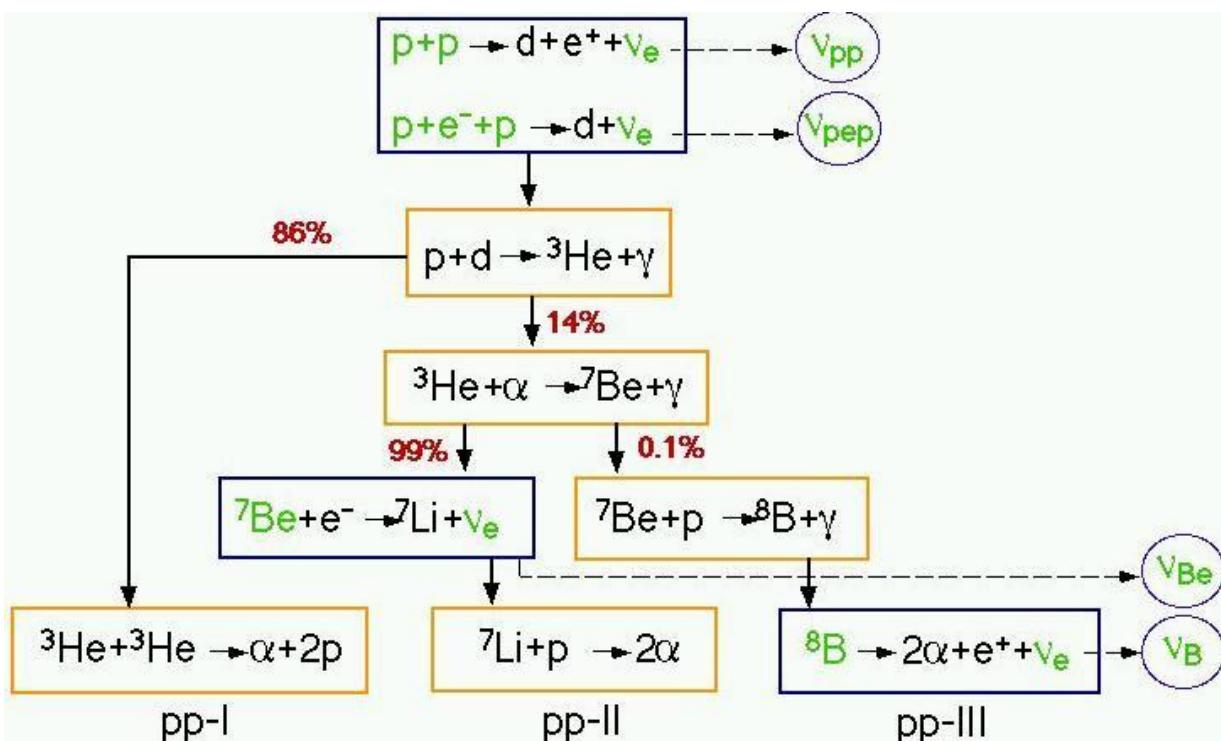


Table des matières PHYSIQUE MODERNE

5. PHYSIQUE MODERNE	1
5.1 Rappels sur l'atome.....	1
Exercices sur le noyau	2
5.2 Les différents atomes et isotopes.....	2
Exercices sur les isotopes	2
5.3 Radioactivité	2
<u>Applications de la radioactivité :</u>	3
5.4 Demi-vie	3
<u>5.4.1 Rappel sur la fonction exponentielle</u>	3
<u>5.4.2 Décroissance radioactive</u>	4
<u>Applications :</u>	4
<u>Exercices sur la demi-vie</u>	5
5.5 Les 3 types de désintégrations radioactives α, β et γ	6
<u>Quelques désintégrations α et leurs utilisations</u>	6
<u>Quelques désintégrations β et leurs utilisations</u>	6
<u>Quantification du pouvoir des rayons :</u>	7
5.6 Dualité onde corpuscule et postulat de De Broglie.....	8
<u>Probabilité de présence des électrons autour du noyau.</u>	8
5.7 Histoire des conceptions atomiques	9
5.8 Le modèle de l'atome de Bohr	10
<u>Exercices sur le modèle de Bohr</u>	11
5.9 Réactions nucléaires	12
<u>Exercices sur les réactions nucléaires</u>	12
5.10 Energie de liaison d'un noyau	12
<u>Exercices sur les énergies de liaison</u>	13
5.11 Fission nucléaire	13
<u>Exercices sur la fission nucléaire</u>	14
5.12 Fusion nucléaire.....	14
<u>Exercices sur la fusion nucléaire</u>	14
5.13 Les unités de mesure de la radioactivité.....	15
<u>Effets d'une irradiation en fonction de la dose reçue en une fois</u>	15
<u>Importance de la dose d'irradiation</u>	15
Corrigé des exercices sur la physique nucléaire	16
<u>5.1 Exercices sur la taille du noyau et de l'atome (PM 2)</u>	16
<u>5.2 Exercices sur les isotopes (PM 2)</u>	16
<u>5.4 Exercices sur la demi-vie (PM 5).....</u>	16
<u>5.8 Exercices sur le modèle de Bohr (PM 10)</u>	17
<u>5.9 Exercices sur les réactions nucléaires (PM 11)</u>	17
<u>5.10 Exercices sur les énergies de liaison (PM 12)</u>	18
<u>5.11 Exercices sur la fission nucléaire (PM 13)</u>	18
<u>5.12 Exercices sur la fusion nucléaire (PM 14)</u>	18



5. PHYSIQUE MODERNE

5.1 Rappels sur l'atome

La notion d'atome a été énoncée par Démocrite vers 400 avant J.-C. mais il faut attendre le XIX^e siècle pour que l'hypothèse atomique soit confirmée en 1803 par John Dalton puis en 1811, l'italien Avogadro établit une distinction entre les atomes et les molécules. En 1869, le chimiste russe Dimitri Mendeleïev construit avec génie le tableau périodique des éléments sans savoir ce qu'est un électron, un proton et un neutron.

Il faut attendre le XX^e siècle pour les découvertes au niveau du noyau : en 1896, Becquerel découvre la radioactivité en étudiant un minéral de pechblende. L'électron a été découvert par Thomson en 1898, le proton par Rutherford en 1911 et le neutron par Chadwick en 1932. La découverte de la structure interne de l'atome est donc récente.

L'atome est formé d'un noyau entouré d'un nuage d'électrons. Les chimistes étudient les propriétés électroniques des atomes et les physiciens étudient la structure du noyau (d'où le terme de physique nucléaire). Si l'on compare le noyau à une tête d'épingle (jusqu'à une petite bille pour les gros atomes) au milieu d'un terrain de football (environ 100 m), les électrons (sans dimension apparente) gravitent à la périphérie du terrain. On a cru que l'électron pouvait être comparé à une planète gravitant autour du soleil mais on sait maintenant que c'est une particule quantique qui est définie par une probabilité de se trouver à un endroit. La propriété de particule quantique tient au fait que si sa vitesse est bien définie, sa position l'est mal et réciproquement ; ce résultat de la physique quantique est appelé principe d'incertitude de Heisenberg.

Le noyau de l'atome est composé de protons chargés positivement et de neutrons sans charge électrique. Le proton a une masse 1840 fois plus grande que l'électron. Le neutron agit "comme de la colle" pour maintenir la cohésion du noyau et sa masse est à peu près la même (1 uma = 1 unité de masse atomique = 1.67×10^{-27} kg) que celle du proton (0.1% plus grande). Un (ou des) neutron est nécessaire dès que le nombre de protons dépasse deux. Le nombre de neutrons dépasse celui des protons lorsque la masse du noyau augmente. On retrouve tous les atomes dans le tableau périodique de Mendeleïev.

Le rayon du noyau est de : $r = 1,2 A^{1/3} \text{ fm}$ (1 femtomètre = 10^{-15} m)
où A = nombre de nucléons dans le noyau.

Rappel : les quatre forces qui gouvernent notre Univers sont : voir mécanique p. M 18

- La **force gravifique** extrêmement faible mais qui s'exerce à longue distance. À la dimension de l'atome, elle est négligeable devant les autres forces mais elle devient prépondérante à l'échelle astronomique.
- La **force électrique** provient des attractions ou répulsions entre les électrons des atomes (excès ou manque). Elle est très importante pour tous les phénomènes à notre échelle. Par exemple, la force musculaire est une force électrique car elle provient de la combustion des aliments ; la force de traction est possible grâce aux forces qui maintiennent les atomes entre eux qui est due aux liaisons électroniques.
- La **force nucléaire** faible (se confond avec la force électrique aux très hautes énergies) qui est responsable des désintégrations radioactives et de la fission nucléaire.
- La **force nucléaire forte** qui permet la cohésion du noyau s'exerce entre les nucléons et peut être mise en jeu lors de la fusion nucléaire (dans le soleil par exemple). Cette force agit à très courte portée de l'ordre du femtomètre. Notons que si ces forces étaient à longue portée, les noyaux s'attiraient et s'agglutinent en entraînant une augmentation considérable de la masse volumique pour atteindre celle des étoiles à neutrons. En fait, le nucléon n'interagit qu'avec quelques voisins proches et les nucléons les moins liés sont ceux qui se trouvent à la surface du noyau.

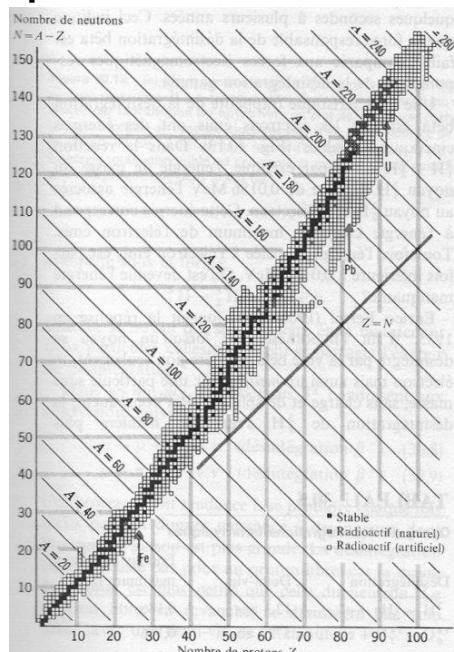
Exercices sur le noyau

- 1) Trouver les rayons nucléaires de ${}^4\text{He}$, ${}^{27}\text{Al}$, ${}^{64}\text{Cu}$, ${}^{125}\text{I}$, ${}^{216}\text{Po}$ et ${}^{238}\text{U}$.
- 2) Quelle fraction du volume de l'atome d'hélium est occupée par son noyau ? (Supposer un rayon atomique d'un angström ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{ m}$)).
- 3) Une étoile à neutrons est supposée avoir une masse comparable à celle du soleil ($M = 2 * 10^{30}\text{ kg}$ et $R = 700'000\text{ km}$) mais elle est formée de neutrons mis "côte à côte" sous l'effet de la force gravifique. On pourra alors prendre l'hypothèse que la densité de matière est égale à celle du noyau. Calculer le rayon de l'étoile si elle est sphérique et en admettant que le soleil est composé d'hydrogène uniquement. (Rayon de Bohr de H = 0.53 Å) On peut aussi calculer sa masse volumique.

5.2 Les différents atomes et isotopes

Il existe 92 atomes stables dans la nature de l'hydrogène à l'uranium. Il y a différents isotopes pour un atome (de 0 à 9 isotopes stables). Un isotope est un atome possédant le même nombre de protons et un nombre variable de neutrons. Chaque élément naturel rencontré sur terre contient normalement un mélange de ses isotopes stables, avec des abondances relatives presque constantes. Il existe environ 300 isotopes stables dans la nature et 1500 isotopes artificiels. Par exemple, les deux isotopes de l'hydrogène sont le deutérium ${}^2\text{H}$ et le tritium ${}^3\text{H}$ qui ont respectivement un et deux neutrons.

Un noyau est caractérisé par son **nombre atomique Z** = nombre de protons ou d'électrons ainsi que **son nombre de masse A** = nombre de protons et de neutrons. Le nombre de masse A est supérieur ou égal à deux fois le numéro atomique Z. On trouve les valeurs de A et Z dans le tableau périodique des éléments.



A	nombre de masse	A	12	17	←---- nombre de protons et neutrons
Z	numéro atomique	Z	6	9	←---- nombre de protons

Exercices sur les isotopes

- 1) Combien de neutrons y a t'il dans les noyaux de ${}^{14}\text{C}$; ${}^{36}\text{Cl}$; ${}^{64}\text{Cu}$ et ${}^{208}\text{Pb}$?
- 2) Parmi les noyaux ${}^1\text{H}$; ${}^2\text{H}$; ${}^3\text{H}$ et ${}^4\text{He}$:
 - a) Quels sont ceux qui ont le même nombre de neutrons ?
 - b) Quels sont ceux qui ont les mêmes propriétés chimiques ?

5.3 Radioactivité

C'est par hasard qu'en 1896, quinze ans avant que Rutherford ne conclue à l'existence du noyau, qu'Antoine Henri Becquerel (1852-1908) observa pour la première fois, un phénomène purement nucléaire. Il constata que des composés d'uranium émettent des rayons invisibles capables de traverser un cache opaque à la lumière et d'impressionner une plaque photographique. Peu après, Pierre et Marie Curie montrèrent que des minéraux d'uranium

contiennent également des traces de polonium ($Z = 84$) et de radium ($Z = 88$), ces deux éléments étant beaucoup plus radioactifs que l'uranium. On découvrit par la suite maintes autres espèces nucléaires radioactives ou radio-isotopes. Une désintégration radioactive est due à la fission d'un noyau en parties avec émission de rayonnements α (noyaux d'hélium), β (électrons) et γ (rayonnement électromagnétique). On distingue les radioactivités naturelle et artificielle.

Applications de la radioactivité :

- Agriculture : * Obtention de nouvelles espèces par irradiation avec des radio-isotopes et stérilisation des fruits et légumes.
- Industrie : * Test de fissures dans les aciers (qualité).
 - * Repérage du niveau du liquide dans des récipients opaques.
 - * Mesures d'épaisseurs.
- Médecine : * Traitements dermatologiques par les rayons β .
 - * Traitement des tumeurs par des rayons γ produits par le cobalt⁶⁰.
 - * Stérilisation d'instruments préemballés.
 - * Etude du métabolisme par des marqueurs radioactifs à faible durée de vie.

5.4 Demi-vie

5.4.1 Rappel sur la fonction exponentielle

Une quantité qui est régulièrement multipliée par une même valeur chaque unité de temps a une croissance exponentielle.



Exemple 1 : L'intérêt composé

Si l'on a une somme de 100 francs à la banque, qu'elle croît de 5% par année et que l'on n'y touche pas (sans impôts ni autres retenues), la somme sera multipliée chaque année par le facteur 1,05. Au bout de 10 ans la somme sera de $100 \cdot 1,05^{10}$ soit de 162 francs, au bout de 50 ans, de $100 \cdot 1,05^{50}$ soit de 1146 francs, au bout de 100 ans, de $100 \cdot 1,05^{100}$ soit de 13'150 francs... La progression de la valeur de la somme est dite exponentielle et certains financiers n'ont pas hésité à qualifier l'intérêt composé de huitième merveille du monde !

Exemple 2 : Croissance de la population mondiale

En juillet 1987, la population mondiale atteignait 5 milliards d'habitants. Le taux de natalité est approximativement de 28/1000 et celui de mortalité de 11/1000. Le taux de croissance de la population mondiale est donc de 17/1000. Si ce taux est constant, on peut calculer que la population double tous les 41 ans ($2 = 1,017^{41}$).

La fonction exponentielle $\exp(x)$ convient parfaitement pour des situations pareilles à celles décrites plus haut :

a) C'est la fonction inverse du logarithme naturel $\ln(x)$:

$$\boxed{\ln(\exp(x)) = x}$$

$$\begin{aligned} b) \quad & \ln(a \cdot b) = \ln(a) + \ln(b) \\ c) \quad & \ln(a^b) = b \ln(a) \end{aligned}$$

Recherchons la fonction pour le deuxième exemple :

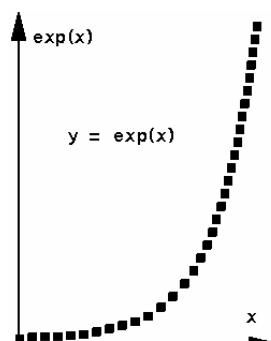
P_0 la population du globe en 1987 = 5 Gp (giga G = milliard),

D la date où l'on veut calculer la population

et k un facteur de correction pour l'exponentielle (en années).

$$5 \cdot 1,017 = 5 \exp(1/k) \Rightarrow 1,017 = \exp(1/k) \Rightarrow \ln(1,017) = 1/k \Rightarrow k = 59,32 \text{ ans}$$

$$\Leftrightarrow \boxed{P = P_0 \exp((D-1987)/59,32)}$$



5.4.2 Décroissance radioactive

Considérons un groupe d'étudiants qui assistent à un cours monotone. S'ils décident de jouer à pile ou face en adoptant la règle "pile : je reste, face : je m'en vais", environ la moitié de ceux-ci demeureront dans la salle après le jeu suivant et ainsi de suite. Toutefois, nous sommes incapables de prédire à quel instant précis un étudiant déterminé quittera la salle. Le processus est appelé aléatoire. Environ la moitié des étudiants partent après chaque jeu et le temps qui s'écoule entre deux jeux successifs est appelé la demi-vie de la classe. La désintégration nucléaire constitue un processus aléatoire du même genre. Il est donc caractérisé par une **demi-vie T** qui représente le laps de temps nécessaire pour que la moitié des noyaux présents se désintègrent. Si, au temps $t = 0$, il y a N_0 noyaux, alors une demi-vie T plus tard, il y aura $N_0/2$ noyaux et au bout du temps $2T$, $N_0/4$ atomes et ainsi de suite...

La loi de la désintégration radioactive sera donc :

$$N = N_0 \exp(-t \ln 2 / T) = N_0 \exp(-\lambda t) \text{ ou son inverse } \ln(N/N_0) = -t \ln 2/T = -\lambda t$$

On considère aussi la **demi-vie biologique T_b** d'un isotope dans un organisme vivant. La **demi-vie effective T_{eff}** dans un être vivant peut être calculée par la relation suivante :

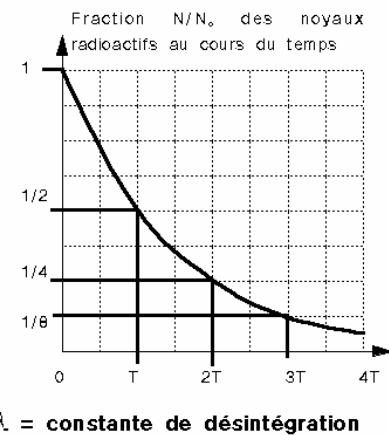
$$1/T_{eff} = 1/T + 1/T_b$$

Demi-vie de quelques radio-isotopes naturels

Radio-isotope	Noyau stable produit	Demi-vie [10 ⁹ ans]
²³⁸ U	²⁰⁶ Pb	4.49
²³⁵ U	²⁰⁷ Pb	0.71
²³² Th	²⁰⁸ Pb	14.1
⁸⁷ Rb	⁸⁷ Sr	50
⁴⁰ K	⁴⁰ A	1.3

Demi-vie de quelques radio-isotopes utilisés en médecine

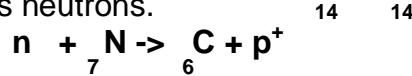
Noyau	Organe	Demi-vie physique [jours]	Demi-vie biologique
³ H	Totalité du corps	4600	19
¹⁴ C	Graisse	2'090'000	35
¹⁴ C	Os	2'090'000	180
²⁴ Na	Totalité du corps	0.62	29
³² P	Os	14,3	1200
³⁵ S	Peau	87.1	22
³⁶ Cl	Totalité du corps	1,6 * 10 ⁸	29
⁴² K	Muscle	0,52	43
⁴⁵ Ca	Os	152	18'000
⁵⁹ Fe	Sang	46,3	65
⁶⁴ Cu	Foie	0,54	39
¹³¹ I	Glande thyroïde	8,1	180



Applications :

Datation au carbone

14 : Le carbone 14 dont la demi-vie est de 5730 ans est constamment produit dans l'environnement sous l'effet des particules cosmiques qui interagissent avec les noyaux atomiques de la haute atmosphère en produisant des neutrons.



Le radiocarbone ou carbone 14 se mélange entièrement au carbone ordinaire présent dans l'environnement et est absorbé par tous les organismes vivants. Une fois qu'un organisme meurt, l'absorption de carbone cesse et le rapport du radiocarbone au carbone ordinaire décroît progressivement à cause de la désintégration du carbone 14. La mesure de ce rapport s'avère cependant assez difficile à cause des fluctuations de la proportion de radiocarbone atmosphérique : elle a diminué de 3% au cours du siècle passé puis a doublé vers 1963 à cause des essais de bombes H dans l'atmosphère.

Géochronologie : On utilise aussi des radio-isotopes naturels pour dater des roches qui ont quelques milliards d'années. Le plomb ordinaire est un mélange de ${}^{204}\text{Pb}$, ${}^{206}\text{Pb}$, ${}^{207}\text{Pb}$ et ${}^{208}\text{Pb}$. Si le plomb d'un échantillon ne contient pas de ${}^{204}\text{Pb}$, le plomb présent a été produit par désintégration radioactive et l'échantillon peut servir à la datation.

Exercices sur la demi-vie

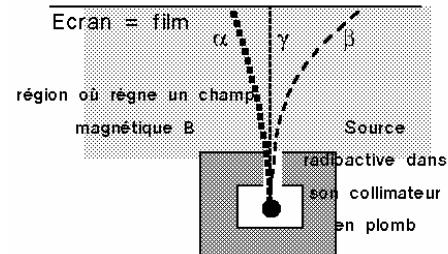
- 1) Après 24 heures, la radioactivité d'un noyau tombe à 1/8 de sa valeur initiale.
 - a) Quelle est sa demi-vie ?
 - b) Après combien de temps (depuis le début) sa radioactivité a-t-elle décrue d'un facteur 64 ?
- 2) On a observé qu'un radio-isotope dont la demi-vie physique est de 10 jours a une radioactivité qui a décrue d'un facteur 8 en 18 jours chez un patient. Quelle est la demi-vie biologique de cet isotope ?
- 3) Un radio-isotope a une demi-vie de 10 heures. Quel pourcentage de l'échantillon subsistera après 30 heures ?
- 4) Combien de demi-vies doivent s'écouler avant que l'activité d'un radio-isotope n'ait diminué de 1% ?
- 5) Une poutre en bois contient 20% de ${}^{14}\text{C}$. Quel est l'âge de la poutre si l'on suppose que les taux du ${}^{14}\text{C}$ atmosphérique n'ont pas changé ?
- 6) Un bol en bois a une activité en ${}^{14}\text{C}$ égale au quart de celle observée dans des objets en bois contemporains. Estimer son âge en supposant que les taux du ${}^{14}\text{C}$ atmosphérique n'ont pas changé.
- 7) Pourquoi n'y a t il pas de radiocarbone dans les organismes fossiles ?
- 8) Le carbone des organismes vivants contient du ${}^{14}\text{C}$ dans une proportion d'environ 10^{-12} atomes de ${}^{14}\text{C}$ pour un atome de ${}^{12}\text{C}$. Quelle est la proportion d'atomes de ${}^{14}\text{C}$ pour un atome de ${}^{12}\text{C}$ dans un échantillon âgé de 4000 ans ?
- 9) Une roche contient quatre noyaux de ${}^{207}\text{Pb}$ pour un noyau d' ${}^{235}\text{U}$. Quel est l'âge de la roche ? (Supposer que la totalité du ${}^{207}\text{Pb}$ provient de la désintégration de l' ${}^{235}\text{U}$.)
- 10) On a observé que l'eau puisée dans un puits profond n'a que le quart de ${}^{32}\text{Si}$ trouvée dans les eaux de surface. Combien de temps faut-il à l'eau de source pour se renouveler ? (La demi-vie du ${}^{32}\text{Si}$ est de 650 ans. Admettre que l'eau renouvelée contient un quart de ${}^{32}\text{Si}$.)

5.5 Les 3 types de désintégrations radioactives α , β et γ .

La radioactivité α constitue en l'émission d'un noyau d'hélium He^{++} ou particule α lors d'une désintégration radioactive. En 1903, Rutherford et Soddy montrèrent qu'un noyau d'uranium se transforme un noyau de thorium en émettant une **particule α** .



Il y a donc transmutation des éléments au cours d'une désintégration α .



Quelques désintégrations α et leurs utilisations

Elément	T	W [MeV/nucléon]	Application
${}^{142}\text{Ce}$	$5 * 10^{15}$ ans	1,5	Radio-nucléon naturel léger
${}^{210}\text{Po}$	138 jours	5,3	Source α très utilisée
${}^{214}\text{Bi}$	19,7 min	5,51	Source α et β
${}^{218}\text{Po}$	3,05 min	6	2 désintégrations α successives
${}^{226}\text{Ra}$	1620 ans	4,78	utilisé pour l'expérience de Rutherford

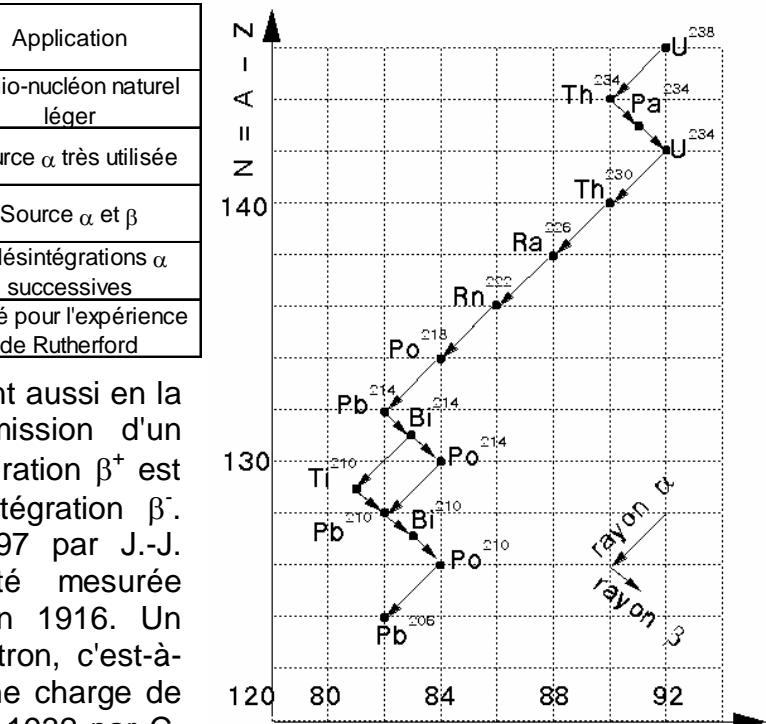
Les désintégrations β^+ et β^- consistent aussi en la transmutation d'éléments avec émission d'un électron ou un positron. La désintégration β^+ est beaucoup plus rare que la désintégration β^- . L'électron a été découvert en 1897 par J.-J. Thompson et sa charge a été mesurée précisément par R. A. Millikan en 1916. Un positron est l'anti-particule de l'électron, c'est-à-dire qu'il a la même masse mais une charge de signe opposé. Il a été découvert en 1932 par C. D. Anderson dans les produits de réactions induites par les rayons cosmiques. La rencontre entre un électron et un positron peut donner un rayonnement γ et l'annihilation des particules. Dans les désintégrations β^- et β^+ , un neutron se transforme en un proton ou inversement selon le schéma suivant :

$$\begin{array}{ll} \text{Radioactivité } \beta^- & n \rightarrow p + e^- + \text{antineutrino } \bar{\nu} \\ \text{Radioactivité } \beta^+ & p \rightarrow n + e^+ + \text{neutrino } \nu \end{array}$$

Quelques désintégrations β et leurs utilisations

Une très petite partie de l'énergie de la réaction est emportée par le **neutrino ν** , particule étrange sans masse ni charge découverte par Fermi en 1933. Le soleil produit un flux de neutrinos considérable.

On peut considérer les pouvoirs d'ionisation et de pénétration pour ces trois rayonnements.



Elément	T	W [MeV/nucléon]	Application
${}^3\text{H}$	12,26 ans	0,0186	Bombe H
${}^{14}\text{C}$	5730 ans	0,156	Datation archéologique
${}^{22}\text{Na}$	2,6 ans	0,54	Source de positrons β^+
${}^{24}\text{Na}$	15 h	1,39	Diagnostic médical (sang)
${}^{40}\text{K}$	$1,3 * 10^9$ ans	0,0118	Datation géologique
${}^{60}\text{Co}$	5,24 ans	0,31 MeV/nucléon	Accompagne des rayons γ en médecine
${}^{90}\text{Sr}$	28,8 ans	0,54 MeV/nucléon	Produit de fission (bombe)
${}^{131}\text{I}$	8,05 jours	0,61 MeV/nucléon	thérapie médicale (thyroïde)

*Le **pouvoir d'ionisation** d'un élément est le fait de lui arracher (ou éventuellement de lui rajouter) un électron ; l'atome deviendra alors un cation chargé positivement (ou un anion chargé négativement). Le pouvoir d'ionisation des rayonnements dépend de leurs masses ; les particules α ont donc un pouvoir d'ionisation supérieur et les γ moindre.

*Le **pouvoir de pénétration** des rayons α , β et γ est par contre supérieur pour les rayons γ que les rayons α . Les rayons α sont donc inoffensifs pour l'homme à condition de ne pas les ingérer (par exemple dans les poumons).

On peut donc se protéger au moyen d'un écran

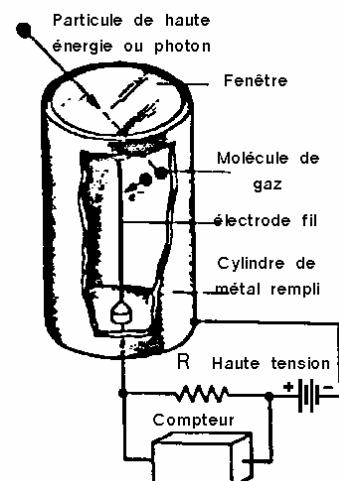
- Une mince feuille de papier, la surface de la peau humaine (ou quelques cm d'air) suffisent à stopper des rayons α , tandis qu'il faut : ->>>
- quelques millimètres d'aluminium, de plexiglas ou de tissus humains pour les rayons β et ->>>
- plusieurs centimètres de plomb ou plusieurs mètres de béton pour les rayons γ (ou quelques km d'air).
- On utilise des matériaux contenant du bore pour stopper les neutrons.

Il y a deux autres moyens pour se protéger contre les radiations :

- Le temps : la radioactivité décroît selon la loi de la demi-vie ; rester donc en contact le temps le plus court avec le radio-isotope
- La distance : s'éloigner au maximum de la source

On peut détecter ces différents rayonnements grâce au compteur Geiger-Müller formé par un cylindre et un fil concentriques entre lesquels règne une tension de l'ordre de 1000 V. Le tout est dans un gaz sous faible pression. Une particule qui traverse le détecteur va ioniser le gaz et provoquer une décharge par effet avalanche. Les rayons γ vont ioniser les particules du gaz et les autres rayonnements provoquent directement la décharge. On peut détecter très facilement les décharges produites et les compter pour avoir une idée de la puissance du rayonnement.

Le pouvoir de détection du compteur Geiger est quasiment nul pour les rayons α et maximum (près de 100%) pour les rayons β ; pour les rayons γ , son rendement n'est que de 1% (100 rayons γ n'y provoquent qu'une seule impulsion).



Quantification du pouvoir des rayons :

- On peut mesurer l'activité ou le nombre de désintégrations par seconde en **becquerel [Bq]** ou en curie [Ci] (ancienne unité 1 Ci = 3.7×10^{10} Bq).
- Pour comparer l'efficacité biologique de différents types de rayonnements, on utilisera le **sievert [Sv]** ou le rem (ancienne unité 1 Sv = 100 rem).

Ces unités de mesures sont présentées à la page PM 11

5.6 Dualité onde corpuscule et postulat de Louis De Broglie

Au XVII^e siècle, **Isaac Newton** décrit la lumière comme des corpuscules que l'on appellera plus tard les photons.

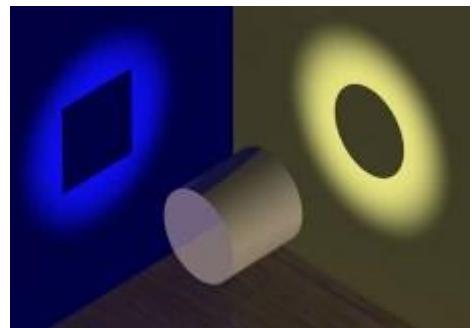
A la même époque, **Christian Huygens** décrit la lumière comme une onde (1675).

Newton et Huygens vont se disputer jusqu'à la fin de leurs vies pour décrire la lumière comme des corpuscules ou une onde en croyant que seul leur point de vue est le bon.

La théorie ondulatoire de la lumière a été élaborée en 1690 par Christiaan **Huygens** et contestée par Newton qui avait une théorie corpusculaire de la lumière. **Newton** ne parvient pas à expliquer les phénomènes d'interférence qu'il observe.

Comme les ondes observées se propagent sur un support matériel, les anciens introduisent la notion d'**éther** dès l'antiquité. L'éther est une substance ténue qui remplit tout l'Univers et permet à la lumière de se déplacer. L'éther joue un rôle prépondérant dans la théorie de Huygens et n'est pas exclu de celle de Newton.

Il faut attendre jusqu'en 1850 avec Faraday puis Maxwell et enfin Hertz pour voir l'avènement des ondes électromagnétiques.



Des questions se posent sur la nature continue de la lumière produite par la matière qui est discontinue (J.-J. Thomson a découvert l'électron en 1897).

En 1887 **Michelson et Morley** réalisent une expérience d'interférences dans laquelle ils démontrent que l'éther n'existe pas.

En 1900 **Max Planck** élabore la théorie des quanta et montre qu'il existe **un quantum élémentaire d'action h** qui est la plus petite quantité d'énergie emportée par un rayonnement électromagnétique.

En 1905, **Albert Einstein** publie trois articles dans la revue "Annalen der Physics". L'article sur l'effet photoélectrique introduit la notion de **photon**.

Après tous ces travaux, les théories scientifiques modernes accordent aux particules une nature ondulatoire. Remarquons que ce phénomène n'est perceptible qu'à des échelles microscopiques.

La métaphore du cylindre (*présentée dans Wikipédia - dualité onde corpuscule*) est l'exemple d'un objet ayant des propriétés apparemment inconciliables. Il serait à première vue incongru d'affirmer qu'un objet possède à la fois les propriétés d'un cercle et d'un rectangle : sur un plan, un objet est soit un cercle, soit un rectangle.

Mais si l'on considère un cylindre : une projection dans l'axe du cylindre donne un cercle, et une projection perpendiculairement à cet axe donne un rectangle.

On a donc bien un objet ayant les propriétés de l'un et de l'autre (mais il n'est ni l'un, ni l'autre). « Onde » et « particule » sont des manières de voir les choses et non pas les choses en elles-même.

En 1929, Louis de Broglie reçoit le Prix Nobel pour sa théorie sur la **dualité onde corpuscule**.

Probabilité de présence des électrons autour du noyau.

Si l'on peut appliquer ce principe à des photons, on peut aussi l'appliquer aux électrons. L'électron autour du noyau de l'atome est décrit par une **fonction d'onde**. Il est dans une orbitale qui est une densité de probabilité de le trouver. La fonction d'onde en mécanique quantique introduite par **Erwin Schrödinger** en 1926 est la représentation de l'état quantique dans la base de dimension infinie des positions. La probabilité de présence des particules représentées par cet état quantique est alors directement le carré de la norme de cette fonction d'onde. La fonction d'onde est calculée à l'aide de l'équation de Schrödinger. Il est hors du cadre de ce cours d'entrer dans plus de détails...

L'énergie W d'un photon est donnée par la relation de Planck :

$$W = h f \quad \text{où la constante de Planck } h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

On mesure en général l'énergie d'une particule en **électron-volt [eV]**. Cette unité donne l'énergie d'un électron accéléré par une tension de 1 V :

$$1 \text{ eV} = 1,6 * 10^{-19} \text{ C} * 1 \text{ V} = 1,6 * 10^{-19} \text{ J}.$$

La constante de Planck vaut donc $\hbar = 4.14 * 10^{-15} \text{ eVs}$.

Exercice onde - corpuscule

Calculer la fréquence, la longueur d'onde et l'énergie en eV :

- a) d'un photon radio à 100 MHz ;
- b) d'un photon visible jaune à 0,5 μm ;
- c) d'un rayon X à 10¹⁸ Hz ;
- d) d'un photon γ de 10⁻¹⁵ m de longueur d'onde.

5.7 Histoire des conceptions atomiques

Démocrite d'Abdère, né en 460 av. J.-C. à Abdère et mort en 370 av. J.-C., va énoncer la notion d'atome (ἀτομός) l'indivisible en grec qu'il imagine crochu pour se lier avec d'autres atomes. Il est considéré comme un philosophe matérialiste en raison de sa conviction en un Univers constitué d'atomes et de vide (théorie atomiste).

En 1897, **J.-J. Thomson** découvre l'électron et il va imaginer l'atome comme une espèce de sphère de substance positive remplie d'électrons. Dans le **modèle de Thomson**, l'atome est représenté comme un pudding aux raisins. Il est constitué par une « pâte » positive avec des inclusions négatives.

En 1909 **Ernest Rutherford** montre l'existence du noyau de faible taille et de charge positive grâce à une expérience réalisée sous vide. Du radium émettant des particules α (noyaux d'hélium, He⁺⁺) est placé dans une boîte en plomb et le faisceau de particules α est orienté en direction d'une fine feuille d'or d'épaisseur de 6000 Å. Derrière cette couche d'or, un écran est placé ; il est enrichi d'une substance chimique (Sulfure de zinc : Zn S) permettant de visualiser, par un scintillement lumineux, la collision par les particules α.

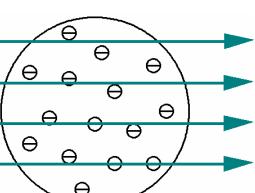
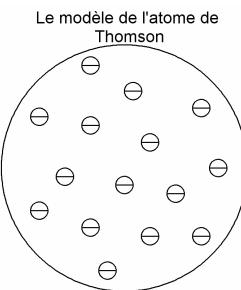
Plusieurs minutes après la disposition du matériel, différents points lumineux apparaissent sur l'écran et ces points ne sont pas dans l'orientation du faisceau, mais étalés sur de grands angles.

La majorité des particules α traversent la feuille d'or, sans être déviées mais une partie de ces particules, de l'ordre de 0,01 %, a été déviées. De cette expérience, nous pouvons déduire que la matière est une structure lacunaire. Elle est constituée essentiellement de vide c'est pour cela que la plupart des particules ne sont pas déviées. Il existe de même des îlots de charge positive qui repoussent les particules α. L'ordre de grandeur de ces îlots est très petit par rapport à l'atome.

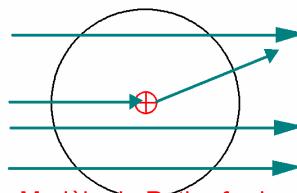
La meilleure hypothèse pour expliquer cette expérience est le noyau de taille réduite. On montrera plus tard que le rapport des tailles de l'atome et du noyau est d'environ 100'000.

La dimension du noyau est de l'ordre du fermi (1 fm = 10⁻¹⁵ m) et l'ordre de grandeur de la taille de l'atome est de l'angström (1 Å = 10⁻¹⁰ m).

Ernest **Rutherford** va proposer en 1911 un **modèle planétaire de l'atome** où les électrons tournent autour du noyau sur des orbites circulaires.



Modèle de Thomson



Modèle de Rutherford

Niels Bohr né le 7 octobre 1885 et mort le 18 novembre 1962 à Copenhague, (Danemark) est un physicien qui est à la base de la physique quantique. Il est surtout connu pour son apport à l'édification de la mécanique quantique et ses désaccords avec Einstein. Lors d'un débat, Niels Bohr se disputait avec Albert Einstein à propos de la réalité de la physique quantique : À un moment donné Einstein, excédé, jeta à Niels Bohr : « Dieu ne joue pas aux dés ! », ce à quoi Bohr répondit : « Qui êtes-vous Einstein, pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ? »

Niels Bohr reçoit le Prix Nobel de physique en 1922 pour l'ensemble de son travail.

En 1913, il propose d'améliorer le modèle de Rutherford en y ajoutant deux contraintes :

5.8 Le modèle de l'atome de Bohr

- **L'électron ne rayonne aucune énergie lorsqu'il se trouve sur une orbite stable** (ou orbite stationnaire). Ces **orbites stables** sont différencierées et **quantifiées**. Ce sont les seules orbites sur lesquelles l'électron peut tourner. Dans le modèle de Bohr semi classique, l'électron tourne autour du noyau dans une orbite circulaire, comme une planète autour du Soleil. Un électron en orbite autour du noyau devrait rayonner et, perdant son énergie par rayonnement, tomber sur le noyau. Or ceci ne se produit pas, puisque les atomes sont stables. Bohr supposa alors qu'il existe certaines orbites où l'électron n'émet pas de rayonnement. Ceci arrive chaque fois que le moment cinétique de l'électron est un multiple entier n de $h/2\pi$ (où h est la constante de Planck) : on numérote par 1, 2, ..., n (nombres quantiques) les orbites successives ainsi permises. L'énergie de l'électron est aussi quantifiée et on peut calculer l'énergie que l'énergie de l'électron de l'atome d'hydrogène à l'état fondamental vaut $E_1 = 13,6 \text{ eV}$. Lorsque l'électron est sur la $n^{\text{ème}}$ orbite de l'atome d'hydrogène, son énergie est : $E_n = 13,6/n^2 \text{ eV}$
- **L'électron ne rayonne ou n'absorbe de l'énergie que lors d'un changement d'orbite.** Considérons l'atome d'hydrogène. Son électron ne peut se trouver que sur l'une de ces orbites. Chaque orbite correspond à un niveau d'énergie donné de l'atome : le niveau d'énergie le plus bas, dit niveau fondamental, correspond à l'orbite la plus proche du noyau, qui porte le numéro $n = 1$. Plus n est grand et plus l'orbite a un grand rayon, ce qui veut dire que l'énergie de l'atome est plus élevée. La valeur de n infinie correspond à une orbite de rayon infini, c'est-à-dire à l'ionisation de l'atome. L'énergie correspondante est de 13,6 eV. L'atome d'hydrogène ne peut absorber ou émettre qu'un photon d'énergie bien définie. Lorsque l'électron retombe d'un niveau excité dans un niveau de plus basse énergie, il y a émission d'un rayonnement qui transporte exactement l'énergie correspondant à la différence d'énergie entre les deux niveaux. L'énergie est rayonnée sous forme électromagnétique (photon) : $E = hf = hv = E_i - E_f$. L'énergie du photon est égale à la perte d'énergie entre les états initial et final. Pour qu'il y ait émission il faut que l'énergie du niveau initial soit supérieur à l'énergie du niveau final c'est-à-dire que $E_i > E_f$, i étant le niveau initial et f le niveau final.

Le photon ainsi émis a une énergie égale à la différence d'énergie entre les deux orbites soit $E_f - E_i$. Cette énergie correspond, par l'équation de Planck ($E = hv$), à une onde électromagnétique de fréquence v ou f bien définie. Le saut d'énergie se manifeste donc par une raie d'émission de longueur d'onde $\lambda = c/f = c/v$ dans le spectre de l'atome. On peut la calculer grâce à la constante de Rydberg $R = 1,0973 \cdot 10^{-7} \text{ m}^{-1}$:

$$1/\lambda = R (1/n_f^2 - 1/n_i^2)$$

$$\frac{1}{\lambda} = R_\infty \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Pour les « aficionados », une bonne démonstration de cette formule est donnée dans le livre de J.-A. Monard Mécanique pages 274 à 278 ou dans Halliday et Rensnik ondes et physique moderne aux pages 320 à 232. La démonstration de la relation ci-dessus dépasse les exigences de la maturité fédérale.

L'atome d'hydrogène peut aussi absorber de l'énergie, ceci lui permettant de passer d'un niveau inférieur à un niveau supérieur, par exemple en absorbant un photon. Mais ceci n'est possible que si le photon possède exactement l'énergie nécessaire, c'est-à-dire la différence d'énergie entre le niveau final et le niveau initial.

L'expérience de Franck et Hertz est une expérience établie pour la première fois en 1914 par James Franck et Gustav Hertz. Elle va prouver expérimentalement la quantification des niveaux d'énergie des électrons dans les atomes. Elle permet de confirmer les hypothèses du modèle de l'atome de Bohr.

En 1925, Franck et Hertz reçurent le prix Nobel de physique pour cette expérience.

En 1925, **Erwin Schrödinger** va perfectionner le modèle de l'atome en associant à l'électron une onde stationnaire où l'électron a la plus grande probabilité de se trouver que l'on appelle orbitale. Cette onde stationnaire est également appelée fonction d'onde et correspondant à une fonction mathématique complexe, dont le carré du module représente la densité de probabilité de présence d'un électron (ou densité électronique) de l'atome en un point de l'espace et à un instant donné.

Exercices sur le modèle de Bohr

- 1) En considérant l'électron comme une particule classique et en utilisant la cinématique et la dynamique de Newton calculer sa vitesse autour du noyau pour l'atome d'hydrogène en considérant le rayon (de Bohr) de $R = 0.529 \text{ \AA} = 5.29 \times 10^{-11} \text{ m}$.

Données : masse de l'électron : $9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$; masse du proton : $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$;
charge élémentaire : $1.60 \times 10^{-19} \text{ C}$; constante électrique $k : 9 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$;
force électrique : $F = k q q'/d^2$.

- 2) Compléter le tableau ci-dessous pour le spectre des raies de l'hydrogène :

Série de	Niveau inférieur	Niveau supérieur	Longueur d'onde [m]	Energie [eV]
Lyman	1	2		
	1		9.72×10^{-8}	
	1	5		13.12
	1	infini	9.113×10^{-8}	
Balmer	2	3		
	2		4.101×10^{-7}	
	2			3.42
Paschen	3		1.094×10^{-6}	
	3	8		
	3		8.201×10^{-7}	

- 3) Quelle est la série de raies de l'hydrogène dont le rayonnement est visible et pourquoi ?
 Quels sont les types de rayonnements émis par les transitions des 2 autres séries et pourquoi ?

5.9 Réactions nucléaires

Dans une réaction nucléaire du type de celles énoncées au chapitre précédent, il faut que les trois lois de la page suivante soient vérifiées :

- 1) **Conservation des nucléons** : le nombre total des nucléons doit être constant.
- 2) **Conservation de la charge** : La charge globale doit être conservée.
- 3) Conservation de l'énergie, de la **quantité de mouvement** et du **moment cinétique**.

Exercices sur les réactions nucléaires

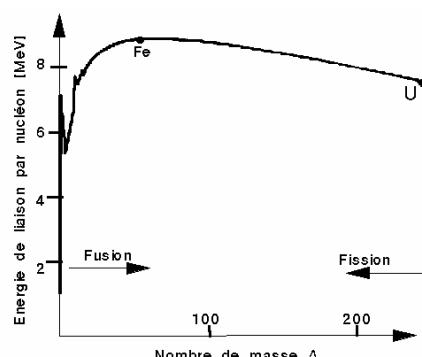
- 1) Que représente X dans les réactions suivantes ($d = 2H$) :
 - a) $p + {}^{12}C \rightarrow d + X$
 - b) ${}^3He + {}^3He \rightarrow \alpha + p + X$
 - c) $p + {}^{14}N \rightarrow {}^{12}N + X$
 - d) $d + d \rightarrow X + p$
 - e) ${}^6Li + X \rightarrow \alpha + \alpha$
 - f) $X + {}^{16}O \rightarrow {}^{19}F + p$
- 2) Compléter les processus de désintégration suivants en ajoutant les particules manquantes (α , β^+ , γ et neutrino ν)
 - a) ${}^{11}C \rightarrow {}^{11}B + ?$
 - b) ${}^{32}P \rightarrow {}^{32}S + ?$
 - c) ${}^{240}Pu \rightarrow {}^{236}U + ?$
- 3) En 1921, Rutherford produisit des noyaux d'hydrogène ou protons en bombardant de l'azote (${}^{14}N$) avec des particules α (4He). Quel est l'autre élément obtenu dans cette première transmutation d'éléments induite artificiellement ?
- 4) La découverte du neutron en 1932 par James Chadwick (1891-1974) inaugura l'ère moderne de la physique nucléaire. En bombardant du beryllium (9Be) avec des particules α (4He), il produisit des neutrons.
 Quel est l'autre élément obtenu dans cette transmutation d'éléments induite artificiellement ?

5.10 Energie de liaison d'un noyau

On peut mesurer la masse d'un noyau avec beaucoup de précision grâce à un spectromètre de masse et l'on constate que la somme des masses des nucléons est supérieure à la masse du noyau. Par exemple, la masse du carbone est de 12.0989 uma alors que le noyau a une masse de 12 uma.) Le défaut de masse = (masse des nucléons constituants - masse du noyau) est associé à une énergie de liaison du noyau grâce à la relation d'Einstein :

$$E = \Delta mc^2$$

Calculons l'énergie de liaison associée à une unité de masse atomique (uma) : $E = 1.66 \times 10^{-27} \times (3 \times 10^8)^2 = 1.49 \times 10^{-10}$ J. Pour les dimensions atomiques, nous utiliserons plus couramment l'unité d'énergie atomique l'électron-volt qui vaut 1.6×10^{-19} J ou le mégaelectron-volt MeV qui vaut 10^6 eV ou 1.6×10^{-13} J. L'énergie liée à un nucléon est donc de $1.49 \times 10^{-10} / 1.6 \times 10^{-13} = 931$ MeV. Le défaut de masse pour le noyau de carbone, 0,0989 uma correspond donc à une énergie de 92.1 MeV soit 7.7 MeV par nucléon. On constate que les énergies de liaison



augmentent de l'hydrogène au fer puis diminuent du fer à l'uranium. Le fer marque donc un maximum de stabilité avec une énergie de liaison de 8.8 MeV par atome. Les réactions nucléaires auront donc lieu facilement pour les atomes très légers (H, He...) ou pour les atomes très lourds (U, Ra...). Pour les éléments lourds, il s'agit de la fission et pour les légers de la fusion.

Exercices sur les énergies de liaison

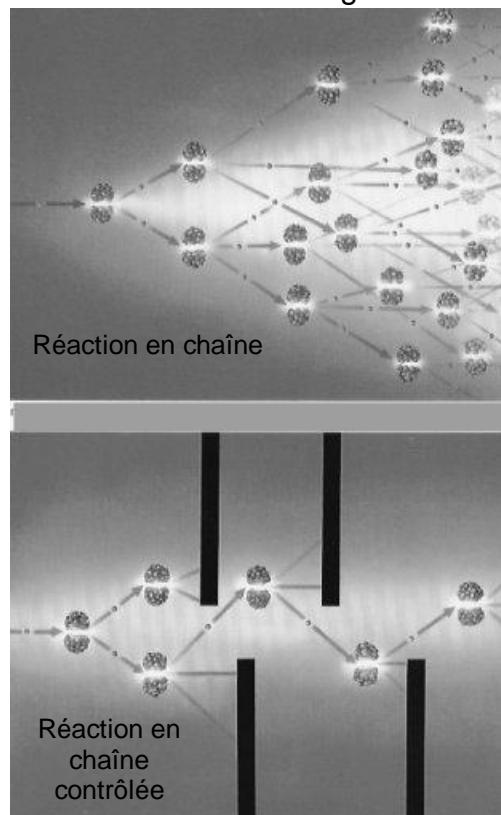
- 1) La masse atomique de ^{208}Pb vaut 207,9766 uma. Que vaut l'énergie moyenne de liaison par nucléon ?
- 2) La masse atomique de ^{207}Pb vaut 206,9759 uma et celle de ^{208}Pb de 207,9766 uma. Quelle est l'énergie minimale requise pour enlever un neutron au ^{208}Pb ?
- 3) Un noyau a un défaut de masse de 1,5 uma.
 - a) Quelle est son énergie de liaison en Mev ?
 - b) Si le nombre de masse est de 200, quelle est l'énergie de liaison par nucléon ?
- 4) L'énergie du soleil vient de réactions nucléaires où 4 protons se transforment en une particule α avec émission de 2 positrons et 2 neutrinos.
 - a) Quelle quantité d'énergie en MeV est libérée dans ce processus ?
 - b) Quand les gaz H_2 et O_2 se combinent pour former H_2O , 6,2 eV sont libérés par molécule formée. Quelle masse d'hydrogène devrait être brûlée pour que l'énergie libérée par la combustion soit égale à celle libérée par la fusion d'un kg d'hydrogène en particules α ?

5.11 Fission nucléaire

Les très gros atomes peuvent être instables car la répulsion des protons y est forte malgré le nombre élevé de neutrons. On assiste à une fission de ce gros atome sous l'effet du choc d'un neutron. Les produits de fission sont libérés ainsi que quelques neutrons (2 à 3). Les atomes qui subissent facilement une fission ont une énergie de liaison très faible.

Réaction en chaîne contrôlée (figure du bas) : Dans une centrale nucléaire, un flux de neutrons est contrôlé par des barres qui absorbent plus ou moins les neutrons. S'il y a un problème, les barres tombent dans le réacteur et le flux de neutrons tombe rapidement à zéro. Plus on relève les barres de contrôle, plus le flux de neutrons est fort et plus la chaleur produite par le rayonnement est importante. Il faudra un puissant échangeur de chaleur pour l'utiliser, produire de la vapeur et faire tourner une turbine puis produire l'électricité. La réaction de fission nucléaire est ici contrôlée.

Réaction en chaîne sauvage (figure du haut) : Dans une bombe atomique, la réaction nucléaire de fission s'emballe et l'on parle de réaction en chaîne sauvage : Chaque atome qui subit une fission produit entre 2 et 3 neutrons lancés à grande vitesse qui vont casser chacun d'autres atomes. Le nombre moyen des neutrons produits par la réaction de fission d'un atome s'appelle facteur de multiplication. Si ce facteur est



inférieur ou égal à un, la réaction est normale et peut s'auto-entretenir avec un facteur de 1.

Si ce facteur dépasse 1, la réaction va s'emballer et devenir incontrôlée ; c'est la réaction en chaîne sauvage que l'on observe dans une bombe atomique si la masse totale de plutonium dépasse la "masse critique". Cette dernière est obtenue lorsque le facteur de multiplication dépasse 1.

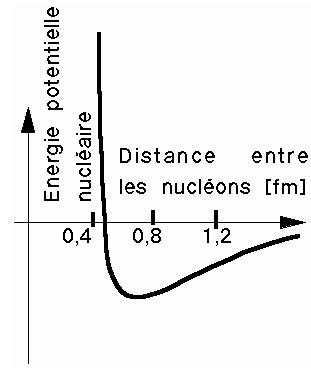
Il s'agira donc de prendre deux masses de plutonium inférieures à la masse critique que l'on éloignera suffisamment et que l'on rapproche au dernier moment grâce à l'explosion d'une charge de TNT par exemple. Dès que les deux masses se touchent, la réaction en chaîne s'amorce.

Dans l'uranium naturel, on trouve 0.72% d'²³⁵U et 99.275% d'²³⁸U, il faut enrichir l'²³⁵U à 3% pour l'utiliser comme combustible de centrale nucléaire et jusqu'à 90% pour les explosifs nucléaires. Il s'agit de développer toute une série de méthodes pour enrichir l'uranium.

Exercices sur la fission nucléaire

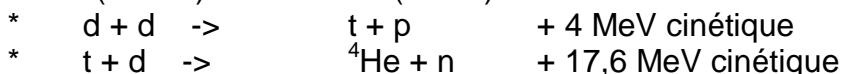
- 1) a) Calculer l'énergie (en joules) libérée par la fission d'un kg d'uranium contenant 90% d'²³⁵U en supposant qu'il y a libération de 200 MeV par noyau.
b) La capacité de puissance électrique de la Suisse est de 5 GW. Si le rendement dans la production d'électricité à partir du nucléaire est de 30%, à quelle vitesse faut-il consommer du ²³⁵U pour fournir cette puissance ?

- 2) a) Calculer le défaut de masse lors de la fission d'un kg à 90% d'²³⁵U en supposant qu'il y a libération de 200 MeV par noyau.
b) Calculer la puissance de la bombe qui contiendrait 10 kg d'²³⁵U dont la fission s'opère en 0,1 s.



5.12 Fusion nucléaire

Les atomes très légers peuvent fusionner si les conditions de pression et de température sont idéales. L'énergie de liaison de ces atomes est aussi très faible. Pour la fusion de 2 protons ou noyaux d'hydrogène, il faut par exemple une température de 18 millions de degrés kelvin et une pression de plusieurs millions de bars. Il faut en effet vaincre la répulsion électromagnétique pour rapprocher suffisamment les noyaux (0,4 fm) et laisser agir la force nucléaire. Ce sont des conditions que l'on retrouve facilement au coeur des étoiles mais qui sont difficiles à obtenir sur Terre. Néanmoins, on les retrouve au centre de l'explosion d'une bombe atomique et dans les "tokamaks" (=réacteurs à fusion nucléaire) où des faisceaux laser sont focalisés sur un plasma maintenu grâce à de forts champs magnétiques. On utilise les réactions entre le deutérium (²H = d) et le tritium (³H = t) :



Exercices sur la fusion nucléaire

- 1) a) A quelle température l'énergie cinétique thermique $W = 3/2 k T$ (où $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K est la constante de Boltzmann) d'un noyau est-elle égale à 0,1 MeV ?
b) Pourquoi n'est-il pas nécessaire d'atteindre cette température pour amorcer une réaction de fusion qui requiert une énergie cinétique de 0,1 MeV.

- 2) La réaction de fusion deutérium-tritium est la suivante :

$$^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + ^1\text{n} + \gamma$$
- Quelles sont l'énergie et la fréquence du rayon γ ?
 - Quelle est l'énergie obtenue par la fusion de 1 kg de deutérium ? Avec la donnée de la question b), quelle est la masse de tritium qui réagit avec le deutérium ?

Elément	masse atomique
^2H	2.0141
^3H	3.0160492
^4He	4.002602
^1n	1.0086653

5.13 Les unités de mesure de la radioactivité

La radioactivité mesure **le nombre de désintégrations par seconde** et se mesure en **becquerel (Bq)**.

L'ancienne unité était le curie qui mesure le nombre de désintégrations d'un gramme de radium : $1 \text{ Ci} = 3 * 10^{10} \text{ Bq}$. Cette mesure était si forte que l'on utilisait le picocurie : $1 \text{ pCi} = 10^{-12} \text{ Ci} = 3.7 * 10^{-2} \text{ Bq} = 2.22$ désintégrations par minute.

Les rayonnements radioactifs qui traversent la matière arrachent des électrons aux atomes en produisant ainsi des ions. Ce faisant, ils abandonnent leur énergie à la matière qu'ils traversent.

L'unité d'irradiation est le **gray (Gy)** qui correspond à la perte d'un joule par kg.

Les effets sur la matière vivante dépendent en plus du type de radiation et de l'organe irradié. On corrige donc cette irradiation en grays au moyen d'un **facteur de qualité** compris entre 1 et 20 pour avoir la dose équivalente effective exprimée en **sievert (Sv)** le facteur de qualité étant sans dimension, **1 sievert représente 1 J/kg**.

Le gray et le sievert ont récemment remplacé le Rad et le Rem qui étaient 100 fois plus petites ($1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rd}$ et $1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem}$).

Le taux d'irradiation des êtres vivants dépend donc de la dose équivalente annuelle reçue, exprimée en Sv/an.

Effets d'une irradiation en fonction de la dose reçue en une fois

- | | |
|---------|--|
| 0.25 Sv | Effets cliniques non décelables. Probablement pas d'effet important. |
| 0.5 Sv | Altération passagère du sang (certains leucocytes ou plaquettes). Légers effets retardés possibles. |
| 1 Sv | Nausées et fatigue. Altération importante de la formule sanguine. Guérison possible. Raccourcissement probable de la durée de vie. |
| 2 Sv | Nausées, vomissements dans les 24 heures, maux de gorge, diarrhée, épilation, manque d'appétit et faiblesse générale. Période de latence d'environ une semaine. Quelques cas mortels après 2 à 6 semaines. |
| 4 Sv | Nausées, vomissements dans les 2 heures, Forte inflammation de la bouche et de la gorge, diarrhée, épilation, pâleur, faiblesse générale, fièvre. Période de latence d'environ une semaine. Mort en 2 à 6 semaines dans 50% des cas. |
| 6 Sv | Mêmes symptômes que pour 4 Sv mais plus aigus et mort en 2 à 6 semaines dans 90 à 100% des cas. |

Importance de la dose d'irradiation

- | | |
|--------|---|
| 20 Sv | Seuil des manifestations nerveuses et état de choc. |
| 6 Sv | Discussion de greffe de moelle. |
| 1 Sv | Nausées et vomissements. |
| 0,3 Sv | Diminution transitoire de lymphocytes. |
| 50 mSv | Limite réglementaire annuelle d'exposition pour les travailleurs. |

45 mSv	Irradiation naturelle par année dans certaines régions de l'Inde.
7 mSv	Cosmonautes (mission Apollo sur la Lune)
4,4 mSv	Dose moyenne par an des travailleurs extérieurs intervenant en centrale nucléaire.
2 mSv	Irradiation cosmique du personnel naviguant de l'aviation.
1.2 mSv	Radiographie du bassin.
0.04 mSv	Irradiation due aux essais nucléaires.
0.01 mSv	Dose calculée (trop faible pour être mesurée) par an due au rejet des centrales nucléaires.

Corrigé des exercices sur la physique nucléaire

5.1 Exercices sur la taille du noyau et de l'atome (PM 2)

- 1) Rayons nucléaires en fm [10^{-15} m] : ${}^4\text{He}$ 1.9 ; ${}^{27}\text{Al}$ 3.6 ; ${}^{64}\text{Cu}$ 4.8 ; ${}^{125}\text{I}$ 6 ; ${}^{216}\text{Po}$ 7.2 et ${}^{238}\text{U}$ 7.44. Valeurs calculées avec $r = 1,2 \text{ Å}^{1/3} \text{ fm}$
- 2) $V_n/V_{\text{at}} = 4/3 \pi R_n^3 / (4/3 \pi R_a^3) = (R_n/R_a)^3 = (1.9 * 10^{-15} / 10^{-10})^3 = 6.86 * 10^{-15}$.
- 3) Si l'on admet que le soleil est homogène et constitué d'atomes d'hydrogène : $R_{\text{S.}} / R_{\text{E.N.}} = R_{\text{at}} / R_n = 0.53 * 10^{-10} / 1.2 * 10^{-15} = 44'167$. Le rayon de l'étoile à neutrons est donc de $R_{\text{E.N.}} = R_{\text{S.}} * R_n / R_{\text{at}} = 15.85 \text{ km} = 15'850 \text{ m}$. Masse volumique : $\rho = M/(4/3\pi r^3) = 2 * 10^{30} / (4\pi(15850^3/3)) = 1.12 * 10^{17} \text{ kg/m}^3 = 120'000 \text{ t/mm}^3$

5.2 Exercices sur les isotopes (PM 2)

- 1) Nombre de neutrons ${}^6_6\text{C}$: 8 ; ${}^{36}_{17}\text{Cl}$ 19 ; ${}^{64}_{29}\text{Cu}$: 35 et ${}^{208}\text{Pb}$: 126 = A - Z.
- 2) a) ${}^3\text{H}$ et ${}^4\text{He}$ ont 2 neutrons. b) ${}^1\text{H}$; ${}^2\text{H}$ et ${}^3\text{H}$ ont les mêmes propriétés chimiques.

5.4 Exercices sur la demi-vie (PM 5)

- 1) a) $T = 24/3 = 8 \text{ h}$. b) $64 = 2^6 \Rightarrow$ après 6 T = 48 h.
- 2) $T_{\text{eff}} = 18/3 = 6 \text{ h}$. $1/T_{\text{eff}} = 1/T + 1/T_b \Rightarrow T_b = 15 \text{ j}$.
- 3) 30 heures = 3T $\Rightarrow N/N_0 = 1/2^3 = 1/8 = 12.5\%$
- 4) $t = T - \ln(0.99)/\ln 2 = 0,0145 \text{ T}$
- 5) $t = T - \ln(0.2)/\ln 2 = 13'305 \text{ ans}$
- 6) $N/N_0 = 1/2^2 = t = 4T = 11'460 \text{ ans}$
- 7) Parce qu'il n'y a pas de carbone dans les organismes fossiles.
- 8) $N/N_0 = \exp(-t \ln 2 / T) = 0,6164 * 10^{-12} = 6,164 * 10^{-13}$
- 9) $N/N_0 = 1/4 \Rightarrow t = 2T = 1,42 * 10^9 \text{ ans} = 1,42 \text{ Gans}$.
- 10) $N/N_0 = 1/4 \Rightarrow t = 2T = 1300 \text{ ans}$.

5.6 Dualité onde corpuscule (PM 9)

- a) photon radio : $4 * 10^{-7} \text{ eV} = 0.4 \mu\text{eV}$; $\lambda = c/f = 3 \text{ m}$;
- b) photon visible jaune : 2.5 eV ; $f = c/\lambda = 6 * 10^{14} \text{ Hz}$;
- c) rayon X : $4100 \text{ eV} = 4.1 \text{ keV}$ et $\lambda = c/f = 3 * 10^{-10} \text{ m} = 3 \text{ \AA}$;
- d) photon γ : $1.2 * 10^9 \text{ eV} = 1.2 \text{ GeV}$; $f = c/\lambda = 3 * 10^{23} \text{ Hz}$.

5.8 Exercices sur le modèle de Bohr (PM 10)

- 1) Equation de Newton: $mv^2/r = kq^2/r^2 \Rightarrow v = (kq^2/mr)^{1/2} = 1.593 \cdot 10^6 \text{ m/s} = 1593 \text{ km/s}$
 Période de rotation de l'électron : $T = 2\pi r/v = 3.945 \cdot 10^{-16} \text{ s}$

2)

Série de	Niveau inférieur	Niveau supérieur	Longueur d'onde [m]	Energie [eV]
Lyman	1	2	$1.215 \cdot 10^{-7}$	10.25
	1	4	$9.720 \cdot 10^{-8}$	12.81
	1	5	$9.492 \cdot 10^{-8}$	13.12
	1	Infini	$9.113 \cdot 10^{-8}$	13.66
Balmer	2	3	$6.561 \cdot 10^{-7}$	1.90
	2	5	$4.339 \cdot 10^{-7}$	2.87
	2	6	$4.101 \cdot 10^{-7}$	3.04
	2	Infini	$3.645 \cdot 10^{-7}$	3.42
Paschen	3	6	$1.094 \cdot 10^{-6}$	1.14
	3	8	$9.543 \cdot 10^{-7}$	1.30
	3	Infini	$8.201 \cdot 10^{-7}$	1.52

- 3) C'est la **série de Balmer** car les longueurs d'onde de la lumière visible se situent entre environ 400 et 700 nm soit entre environ $4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$ et $7 \cdot 10^{-7} \text{ m}$.

Couleur	Longueur d'onde	Couleur	Longueur d'onde
violet	380–450 nm	jaune	570–585 nm
bleu	450–490 nm	orange	585–620 nm
vert	490–570 nm	rouge	620–780 nm

- La série de Lyman émet des rayons de longueurs d'onde compris entre 91 et 121 nm. C'est donc de l'ultraviolet. Il s'agit des UVC, de courte longueur d'onde (280-10 nm), ce sont les UV les plus nocifs.
- La série de Paschen émet des rayons de longueurs d'onde compris entre 820 et 1094 nm. C'est donc de l'infrarouge. La longueur d'onde de l'infrarouge est comprise entre 780 nm et 1 000 000 nm.

5.9 Exercices sur les réactions nucléaires (PM 11)

- 1) a) $p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{B}$
 b) ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow \alpha + p + p$
 c) $p + {}^{14}\text{N} \rightarrow {}^{12}\text{N} + {}^3\text{He}$
 d) $d + d \rightarrow {}^3\text{H} + p$
 e) ${}^6\text{Li} + d \rightarrow \alpha + \alpha$
 f) $\alpha + {}^{16}\text{O} \rightarrow {}^{19}\text{F} + p$
- 2) a) ${}^{11}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{C} + \beta^+ + \nu$
 b) ${}^{32}\text{P} \rightarrow {}^{32}\text{S} + \beta^- + \bar{\nu}$
 c) ${}^{240}\text{Pu} \rightarrow {}^{236}\text{U} + \alpha$
- 3) ${}^{14}\text{N} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O} + p + n$ L'autre particule est le neutron
- 4) ${}^9\text{Be} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + n$ L'autre élément est le carbone 12

5.10 Exercices sur les énergies de liaison (PM 12)

- 1) Défaut de masse : $1.712 \text{ uma} = 2.84256 \times 10^{-27} \text{ kg}$. Energie de liaison $\Delta mc^2 = 2.555 \times 10^{-10} \text{ J} = 1594.55 \text{ MeV}$ donc $0,1057 \text{ MeV} / \text{nucléon}$. Energie de liaison par nucléon $= 1594.55 / 208 = 7.67 \text{ MeV/nucléon}$
- 2) Défaut de masse $\Delta m = (207.9766 - 1.0086653) - 206,9759 = -0.0079653 \text{ uma} = -1.32267 \times 10^{-29} \text{ kg}$ Energie de liaison : $E = \Delta m c^2 = 1.32267 \times 10^{-29} \times (29979245)^2 = -1.189 \times 10^{-12} \text{ J} = -7.42 \text{ MeV}$ ($1 \text{ MeV} = 1.60218 \times 10^{-13} \text{ J}$).
- 3) a) $1409,637 \text{ MeV}$; b) $7,05 \text{ MeV} / \text{nucléon}$.
- 4) Défaut de masse : $0,02928 \text{ uma} = 4,9 \times 10^{-29} \text{ kg}$. Energie : $4,4 \text{ pJ} = 27,5 \text{ MeV}$.
b) Energie produite par la combustion de 1 kg H : $6,53 \times 10^{14} \text{ J}$.

5.11 Exercices sur la fission nucléaire (PM 13)

- 1) a) $7,38 \times 10^{13} \text{ J}$; b) $5 \text{ GW él} = 16.67 \text{ GW thermique}$. $v = 0.226 \text{ g/s} = 0,813 \text{ kg/h}$
- 2) a) $\Delta m = 3,55 \times 10^{-28} \text{ kg} / \text{noyau} = 0.0906 \% \Rightarrow 0,0813 \% \text{ pour un kg à } 90\% \text{ d}'^{235}\text{U}$.
b) $\Delta m = 10 \times 0,0813 \% = 8,15 \text{ g} ; E = \Delta m c^2 = 7,38 \times 10^{14} \text{ J} ; P = E/t \Rightarrow P = 7,38 \times 10^{15} \text{ W}$.

5.12 Exercices sur la fusion nucléaire (PM 14)

- 1) a) $T = 2W/3k = 7,73 \times 10^8 \text{ K}$; b) à cause de la pression.
- 2) a) $W = 17.6 \text{ MeV} = 2.82 \text{ pJ}$ et $f = 4.25 \times 10^{21} \text{ Hz} (\gamma)$; b) $8.48 \times 10^{14} \text{ J}$; c) 1.5 kg .
($1 \text{ pJ} = 10^{-12} \text{ J}$)

Electron e⁻	lepton	----	1897 Thomson	0.511	-1	$\frac{1}{2}$	stable
Photon γ	boson	----	1905 Einstein	0	0	1	stable
Proton p⁺	baryon	uud	1911 Rutherford	938.3	1	$\frac{1}{2}$	stable
Neutrino ν	lepton	----	1931 prédictio-n de Pauli	0 ?	0	$\frac{1}{2}$	stable
Positron p⁺	lepton	----	1932 Anderson	0.511	1	$-\frac{1}{2}$	stable (mais annihilation avec la matière)
Neutron n	baryon	udd	1932 Chadwick	939.6	0	$\frac{1}{2}$	stable
Antiproton p⁻	baryon	uud	1955 Chamberlain	938.3	1	$-\frac{1}{2}$	stable (mais annihilation avec la matière)
Antineutrino $\bar{\nu}$	lepton	----	1962 Steinberger	0 ?	0	$-\frac{1}{2}$	stable (mais annihilation avec la matière)

(*) et 1000 s hors du novau

Le proton, le neutron et l'électron sont des **fermions** (spin demi-entier) tandis que le photon est un **boson** (spin entier).

Le **proton** est un nucléon, il forme le noyau de l'atome avec les neutrons. Sa charge électrique est +e, l'opposé de celle de l'électron.

Le nom proton vient du grec et signifie "le premier", c'est en effet une des premières particules à avoir été identifiée.

Le **neutron** est un nucléon, il forme le noyau de l'atome avec les protons. Sa charge électrique est nulle.

L'**électron** est un lepton. C'est un des constituants de l'atome, avec les nucléons.

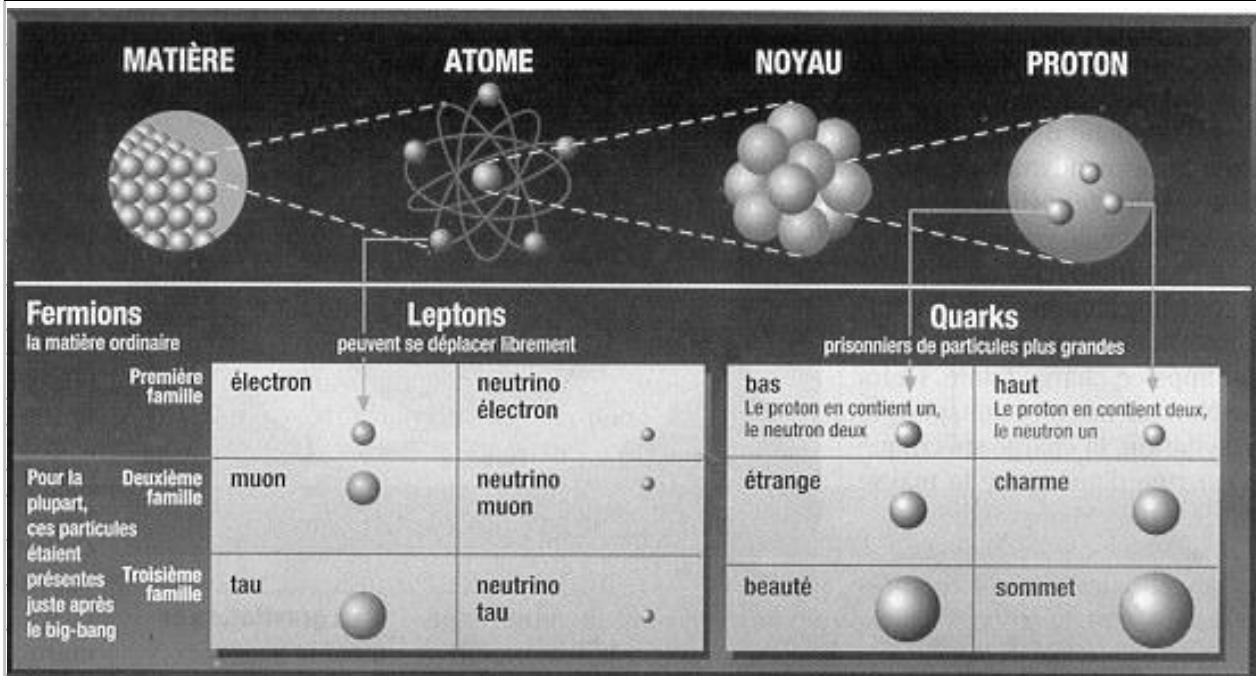
Le **photon** est un boson, c'est la particule qui transmet l'interaction électromagnétique. Le nom photon vient du grec et signifie "lumière".

En effet, le photon transmet l'interaction électromagnétique, la lumière étant un exemple d'onde électromagnétique.

Les **gluons** sont les particules d'échange de la force forte.

Constitution des particules connues et stables

Particule	Type	Quarks	Masse [MeV/c ²]	Charge électrique	Spin
Proton p ⁺	Baryon	uud	938.3	1	½
Neutron n	Baryon	udd	939.6	0	½
électron e ⁻	lepton	---	0.511	-1	½
photon γ	boson	---	0	0	1



Les particules élémentaires (fermions) et le modèle standard

Les quarks et les leptons sont des **fermions**

	•	●	●●	Charge	
QUARKS	haut (up) u	Charmé (charm) c	sommet (top) t *	+2/3	*aussi appelé :
	bas (down) d	étrange (strange) s	beauté (beauty) b	-1/3	vérité (truth) t
LEPTONS	électron e ⁻	muon μ ⁻	tau τ ⁻	-1	
	neutrino-électron ν _e	neutrino-muon ν _μ	neutrino-tau ν _τ	0	

Si nous examinons les charges électriques et les masses des membres des deux familles, nous voyons qu'elles peuvent être groupées en paires, avec trois paires pour chaque famille.

	QUARKS		LEPTONS		
Particule	Masse [GeV/c ²]	Charge électrique	Particule	Masse [GeV/c ²]	Charge électrique
U (up)	0.005	2/3	Neutrino-électron	<7x10 ⁻⁹	0
D (down)	0.01	-1/3	Electron	0.000511	-1
C (charmé)	1.5	2/3	Neutrino-muon	<.0003	0
S (étrange)	0.2	-1/3	muon	0.106	-1
T (sommet)	180	2/3	neutrino-tau	<.03	0
B (beauté)	4.7	-1/3	tau	1.7771	-1

Il est bien clair que le modèle standard est totalement hors du programme de la maturité suisse DF

Corrigé des exercices sur la physique nucléaire

5.1 Exercices sur le noyau (PN 2)

- 1) Trouver les rayons nucléaires de ^4He , ^{27}Al , ^{64}Cu , ^{125}I , ^{216}Po et ^{238}U .

Le rayon du noyau est de : $r = 1,2 \text{ A}^{1/3} \text{ fm}$ (1 fm = 1 femtomètre = 10^{-15} m) et A = nombre de nucléons dans le noyau.

- 2) Quelle fraction du volume de l'atome d'hélium est occupée par son noyau ? (Supposer un rayon atomique de $1\text{\AA} = 10^{-10} \text{ m}$).

$$\text{Rapport des volumes : } V_{\text{noyau}}/V_{\text{atome}} = (R_{\text{noyau}}/R_{\text{atome}})^3 = 4/3 \pi R_n^3 / (4/3 \pi R_a^3) = (R_n/R_a)^3 = (1.9 * 10^{-15} / 10^{-10})^3 \in V_{\text{noyau}}/V_{\text{atome}} = 6.86 * 10^{-15}.$$

- 3) Une étoile à neutrons est supposée avoir une masse comparable à celle du soleil ($M = 2 * 10^{30} \text{ kg}$ et $R = 700'000 \text{ km}$) mais elle est formée de neutrons mis "côte à côte" sous l'effet de la force gravifique. On pourra alors prendre l'hypothèse que la densité de matière est égale à celle du noyau. Calculer le rayon de l'étoile si elle est sphérique et en admettant que le soleil est composé d'hydrogène uniquement. $R_H = 1,2 \text{ fm}$ comme $A = 1$.

Si l'on admet que le soleil est homogène et constitué d'atomes d'hydrogène : R_S . / $R_{E.N.} = R_{at} / R_n = 0.53 * 10^{-10} / 1.2 * 10^{-15} = 44'167$. Le rayon de l'étoile à neutrons est donc de $R_{E.N.} = R_S * R_n / R_{at} = 700'000 / 44'167 = 15.85 \text{ km} = 15'850 \text{ m}$.

Masse volumique : $\rho = M/(4/3\pi r^3) = 2 * 10^{30} / (4\pi(15850^3/3) = 1.12 * 10^{17} \text{ kg/m}^3 = 120'000 \text{ t/mm}^3$.

Nom	Nb nucl.	rayon [fm]
^4He	4	1.90
^{27}Al	27	3.60
^{64}Cu	64	4.80
^{125}I	125	6.00
^{216}Po	216	7.20
^{238}U	238	7.44

5.2 Exercices sur les isotopes (PN 2)

- 1) Le nombre de neutrons est la différence A - Z entre la masse atomique A (64 pour le cuivre) et le numéro atomique ou nombre de protons Z dans le noyau (29 pour le cuivre) donc $35 = 64-29$ pour le cuivre.

Atome	Masse at.	Nb. p ⁺	Nb. neutrons
C	14	6	8
Cl	36	17	19
Cu	64	29	35
Pb	208	82	126

- 2) Parmi les noyaux ^1H ; ^2H ; ^3H et ^4He :
- ^3H et ^4He ont 2 neutrons ($A - Z = 3-1 = 2$ et $4-2 = 2$)
 - Ceux qui ont le même nombre de protons dans le noyau (donc le même nombre d'électrons) ont les mêmes propriétés chimiques soit ^1H ; ^2H et ^3H qui ont 1 proton et 1 électron.

5.4 Exercices sur la demi-vie (PN 5)

- 1) a) Chaque demi vie, la radioactivité décroît de moitié. Au bout de trois périodes, la radioactivité a décrue de $\frac{1}{2} * \frac{1}{2} * \frac{1}{2} = 1/8$. Sa demi-vie est donc de $T = 24/3 = 8 \text{ h}$
b) $1/64 = \frac{1}{2} * \frac{1}{2} * \frac{1}{2} * \frac{1}{2} * \frac{1}{2} * \frac{1}{2} = 1/2^6$. Il a fallu 6 périodes depuis le début $6T = 48 \text{ h}$.
- 2) La demi vie effective est de 6 jours (= 18/3) car, comme dans le premier exercice, il a décrue d'un facteur 8 en 18 jours. La demi-vie biologique de cet isotope est supérieure à la demi vie biologique : $1/T_{\text{eff}} = 1/T + 1/T_b$ la demi-vie physique est de 10 jours $\Rightarrow 1/6 = 1/10 + 1/T_b \Rightarrow T_b = 15 \text{ j}$.

- 3) Un radio-isotope a une demi-vie de 10 heures. Au bout de $T = 10$ h, il restera $\frac{1}{2}$; au bout de $2T = 20$ h, il restera $\frac{1}{4}$; au bout de $3T = 30$ h, il restera $\frac{1}{8} = \underline{12.5\%}$ ($N/N_0 = 1/2^3 = 1/8$).

- 4) Combien de demi-vies doivent s'écouler avant que l'activité d'un radio-isotope n'ait diminué de 1% ?

$$99\% = 0.99 = N/N_0 = 1/2^n \Rightarrow \log(N/N_0) = -n \log(2) \Rightarrow \boxed{n = -\log(N/N_0)/\log(2)} = \Rightarrow n = -\log(0.99)/\log(2) = -\ln(0.99)/\ln(2) = \underline{0,0145 \text{ demi-vies.}}$$

Le carbone 14 a une demi-vie de 5730 ans

- 5) Une poutre en bois contient 20% de ^{14}C . Quel est l'âge de la poutre si l'on suppose que les taux du ^{14}C atmosphérique n'ont pas changé ? Même type d'exercice que le 4 : $20\% = 0.20 = N/N_0 = 1/2^n \Rightarrow \log(N/N_0) = -n \log(2) \Rightarrow \boxed{n = -\log(N/N_0)/\log(2)} = -\log(0.2)/\log(2)$ ou $n = \ln(0.2)/\ln 2 = 2.32$ et $t = nT = 2.32 \text{ T} = \underline{13'305 \text{ ans.}}$

- 6) Un bol en bois a une activité en ^{14}C égale au quart de celle observée dans des objets en bois contemporains. Estimer son âge en supposant que les taux du ^{14}C atmosphérique n'ont pas changé. Comme le taux de C_{14} a diminué d'un facteur 4 ($N/N_0 = 1/2^2$), Il s'est passé deux demi-vies de 5730 ans donc $t = 2T = \underline{11'460 \text{ ans.}}$

- 7) Pourquoi n'y a t il pas de radiocarbone dans les organismes fossiles ? Parce qu'il n'y a pas de carbone dans les organismes fossiles.

- 8) Le carbone des organismes vivants contient du ^{14}C dans une proportion d'environ 10^{-12} atomes de ^{14}C pour un atome de ^{12}C . Quelle est la proportion d'atomes de ^{14}C pour un atome de ^{12}C dans un échantillon âgé de 4000 ans ? $x/10^{-12} = 1/(2^{(4000/5730)}) \Rightarrow \log(x) - \log(10^{-12}) = -(4000/5730) \log 2 \Rightarrow \log(x) = \log(10^{-12}) + (4000/5730) * \log(2) = -12.21$ et $x = 10^{(-12.21)} \Rightarrow \underline{x = 6,164 * 10^{-13}}$

$$\text{(ou } N/N_0 = \exp(-t \ln 2 / T) = \exp(-4000 * \ln 2 / 5730) = 0.6164\text{)}$$

- 9) Une roche contient quatre noyaux de ^{207}Pb pour un noyau d' ^{235}U . Quel est l'âge de la roche ? (Supposer que la totalité du ^{207}Pb provient de la désintégration de l' ^{235}U .) L'uranium 235 a une demi-vie de $7.1 * 10^8$ ans. $N/N_0 = 1/4 \Rightarrow t = 2T = 1,42 * 10^9$ ans = 1,42 Gans.

- 10) On a observé que l'eau puisée dans un puits profond n'a que le quart de ^{32}Si trouvée dans les eaux de surface. Combien de temps faut-il à l'eau de source pour se renouveler ? (La demi-vie du ^{32}Si est de 650 ans. Admettre que l'eau renouvelée contient un quart de ^{32}Si .) Il n'y a plus que le quart de ^{32}Si donc 2 demi-vies se sont écoulées : $N/N_0 = 1/4 \Rightarrow t = 2T = \underline{1300 \text{ ans.}}$

5.6 Exercices sur les réactions nucléaires (PN 8)

- 1) Dans les réactions suivantes ($d = ^2\text{H}$) :
- a) $p + ^{12}\text{C} \rightarrow d + ^{11}\text{C}$ ($A = 13$ et $Z = 7$ protons)
 - b) $^3\text{He} + ^3\text{He} \rightarrow \alpha + p + p$ ($A = 6$ et $Z = 4$ protons)
 - c) $p + ^{14}\text{N} \rightarrow ^{12}\text{N} + ^3\text{H}$ ($A = 15$ et $Z = 8$ protons)
 - d) $d + d \rightarrow ^3\text{H} + p$ ($A = 4$ et $Z = 2$ protons)
 - e) $^6\text{Li} + d \rightarrow \alpha + \alpha$ ($A = 8$ et $Z = 4$ protons)
 - f) $\alpha + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{19}\text{F} + p$ ($A = 20$ et $Z = 10$ protons)
- 2) Dans les processus de désintégration suivants La charge du noyau est conservée
 Radioactivité β^- : (désintégration du neutron) $n \rightarrow p + e^- + \text{antineutrino } \nu$
 Radioactivité β^+ ; (désintégration du proton) $p \rightarrow n + e^+ + \text{neutrino } \nu$ (formulaire CRP p. 189 et 190)
- a) $^{11}\text{C} \rightarrow ^{11}\text{B} + \beta^+ + \nu$ ($A = 11$ et charge noyau = $+6 q_e$)
 - b) $^{32}\text{P} \rightarrow ^{32}\text{S} + \beta^- + \nu$ ($A = 32$ et charge noyau = $+15 q_e$)
 - c) $^{240}\text{Pu} \rightarrow ^{236}\text{U} + \alpha$ ($A = 240$ et charge noyau = $+94 q_e$)

- 3) En 1921, Rutherford produisit des noyaux d'hydrogène ou protons en bombardant de l'azote (^{14}N) avec des particules α (^4He). $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \text{p} + \text{n}$: (A = 18 et Z = 7+2 = 9)
 $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \text{p} + \text{n}$ (A = 16+1+1 = 18 et Z = 8+1+0 = 9)
- L'autre particule produite est le neutron.
- 4) En bombardant du beryllium (^9Be) avec des particules α (^4He), James Chadwick (1891-1974) produisit des neutrons. $^9\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + \text{n}$: A = 13 et Z = 4+2 = 6
 $^9\text{Be} + ^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C} + \text{n}$ (A = 12+1 = 13 et Z = 6+0 = 6)
- L'autre élément obtenu dans cette transmutation est le carbone 12.

5.7 Exercices sur les énergies de liaison (PN 9)

1eV =	1.60218×10^{-19}	J.....1MeV =	1.60218×10^{-13}	J
1 uma =	1.66054×10^{-27}	kg		
Masse du proton =	1.67262×10^{-27}	kg	=	1.0072765 uma
Masse du neutron =	1.67493×10^{-27}	kg	=	1.0086653 uma
Célérité de la lumière	299'792'458	m/s		

- 1) La masse atomique de ^{208}Pb vaut 207,9766 uma. Que vaut l'énergie moyenne de liaison par nucléon ? Masse des nucléons = (82 protons et 208-82=126 neutrons) $m_o = 82 \times 1.67262 \times 10^{-27} + 126 \times 1.67493 \times 10^{-27} = 3.482 \times 10^{-25}$ kg. Défaut de masse $\Delta m = 2.84256 \times 10^{-27}$ kg = 1.712 uma.
Énergie de liaison $\Delta mc^2 = 2.84256 \times 10^{-27} \times (29979245)^2 = 2.555 \times 10^{-10}$ J = 1595 MeV. Energie de liaison par nucléon = 1595/208 = 7.67 MeV/nucléon.
- 2) La masse atomique de ^{207}Pb vaut 206,9759 uma et celle de ^{208}Pb de 207,9766 uma. Quelle est l'énergie minimale requise pour enlever un neutron au ^{208}Pb ?
Défaut de masse $\Delta m = (207.9766 - 1.0086653) - 206,9759 = -0.0079653$ uma = -1.32267×10^{-29} kg Energie de liaison : $E = \Delta m c^2 = 1.32267 \times 10^{-29} \times (29979245)^2 = -1.18876 \times 10^{-12}$ J = -7.41962 MeV (1 MeV = 1.60218×10^{-13} J).
- 3) Un noyau a un défaut de masse de 1,5 uma. a) Quelle est son énergie de liaison en MeV ?
Défaut de masse $\Delta m = 1.5 \times 1.66 \times 10^{-27}$ kg = 2.5×10^{-27} kg. $E = \Delta m c^2 = 2.23863 \times 10^{-10}$ J = 1.397×10^9 eV = 1397 MeV. b) Si le nombre de masse est de 200, l'énergie de liaison par nucléon est : $E = 1397/200 = 6.99$ MeV.
- 4) L'énergie du soleil vient de réactions nucléaires où 4 protons se transforment en une particule α avec émission de 2 positrons et 2 neutrinos.
Défaut de masse : $\Delta m = 4 \times 1.00794 - 4.002602 = 0,0292$ uma = $4,84 \times 10^{-29}$ kg. Quantité d'énergie libérée dans ce processus : $E = \Delta mc^2 = 4,36 \times 10^{-12}$ J = 4.38 pJ = 27,2 MeV.
b) Quand les gaz H_2 et O_2 se combinent pour former H_2O , 6,2 eV sont libérés par molécule formée. Masse d'hydrogène brûlée pour que l'énergie libérée par la combustion soit égale à celle libérée par la fusion d'un kg d'hydrogène en particules α : $27.2\text{M}/6.2 = m_o/1 \Rightarrow m_o = 27.4\text{M}/6.2 = 4'386'787$ kg (Energie produite par la combustion de 1 kg H : $6,51 \times 10^{14}$ J).

IA	VIII A
1 $+1$ -1 H 1,00794 2,2 Hydrogène	2 He 4,002602 3,5 Hélium

5.8 Exercices sur la fission nucléaire (PN 10)

- 1) a) Calculer l'énergie (en joules) libérée par la fission d'un kg d'uranium contenant 90% d'²³⁵U en supposant qu'il y a libération de 200 MeV par noyau. Il y a 0.9 N moles d'²³⁵U et 0.1 N moles d'²³⁵U qui pèsent $N(0.9*235+0.1*238) = 1000$ g. Le nombre de moles d'²³⁵U vaut : $N = 1000/(0.9*235+0.1*238) = 4.25$. Nombre d'atomes d'²³⁵U = $0.9 \text{ N} * N_{Av} = 0.9 * 4.25 * 6.02 * 10^{23} = 2.3 * 10^{24}$ at. Energie par atome = 200 MeV = $200 \text{ M} * 1.6 * 10^{-19} = 3.2 * 10^{-11}$ J. Energie thermique totale = $2.3 * 10^{24} * 3.2 * 10^{-11} \text{ J} = 7.37 * 10^{13} \text{ J} = 20.5$ millions de kWh = 20'500 GWh thermique.
- b) La capacité de puissance électrique de la Suisse est de 5 GW. Si le rendement dans la production d'électricité à partir du nucléaire est de 30%, à quelle vitesse faut-il consommer du ²³⁵U pour fournir cette puissance ? Rendement de 30% = $P_{électrique} / P_{thermique} \Rightarrow P_{thermique} = 5/0.3 = 16.67$ GW. D'après la valeur calculée en a), il y a 20'500 GWh thermique donc le kg d'²³⁵U à 90% permet d'alimenter la Suisse pendant $t = 20500/16.67 = 1228$ h d'où une vitesse de combustion de $1/1228 = 0.000'814$ kg/h = 0.814 g/h.
- 2) a) Calculer le défaut de masse lors de la fission d'un kg à 90% d'²³⁵U en supposant qu'il y a libération de 200 MeV par noyau. $200 \text{ MeV} = 200 * 10^6 * 1.6 * 10^{-19} \text{ J} = 3.2 * 10^{-11} \text{ J}$; $\Delta m = E / c^2 = 3.2 * 10^{-11} / (3 * 10^8)^2 = 3.55 * 10^{-28} \text{ kg}$; masse d'un noyau d'²³⁵U = $235 * 1.66 * 10^{-27} \text{ kg} = \text{noyau} = 0.0906 \% \Rightarrow 0.0813 \% \text{ pour un kg à 90\% d}'^{235}\text{U}$.
- b) Calculer la puissance de la bombe qui contiendrait 10 kg d'²³⁵U dont la fission s'opère en 0,1 s. $\Delta m = 10 * 0.0813 \% = 8,15 \text{ g}$; $E = \Delta m c^2 = 7,38 * 10^{14} \text{ J}$; $P = E/t = 7,38 * 10^{15} \text{ W}$.

5.9 Exercices sur la fusion nucléaire (PN 10)

- 1) a) A quelle température l'énergie cinétique thermique $W = 3/2 k T \Rightarrow T = 2W/3k$ = (où $k = 1.38 * 10^{-23} \text{ J/K}$ est la constante de Boltzmann) d'un noyau est-elle égale à 0,1 MeV ?
 $Energie E = 0.1 \text{ MeV} = 1.60218 * 10^{-14} \text{ J} = \text{l'énergie cinétique thermique } W = 3/2 k T$
 $T = 2W/3k = 2 * 1.60218 * 10^{-14} / (3 * 1.38 * 10^{-23}) = 7,73 * 10^8 \text{ K}$.
- b) Pourquoi n'est-il pas nécessaire d'atteindre cette température pour amorcer une réaction de fusion qui requiert une énergie cinétique de 0,1 MeV) à cause de la pression qui permet aux noyaux de se rapprocher suffisamment pour qu'ils puissent interagir.
- 2) La réaction de fusion deutérium-tritium est la suivante : ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^1\text{n} + \gamma$
- a) Quelles sont l'énergie et la fréquence du rayon γ
Défaut de masse $\Delta m = 2.0141 + 3.0160492 - 4.002602 - 1.0086653 = 0.0188819 \text{ uma} = 3.135 * 10^{-29} \text{ kg}$
Energie de liaison : $E = \Delta m c^2 = 2.81798 * 10^{-12} \text{ J} = 2.82 \text{ pJ} = 17.6 \text{ MeV}$
Relation de Planck $E = hf \Rightarrow f = E/h = 2.818 * 10^{-12} / 6.626076 * 10^{-34} = 4.25 * 10^{21} \text{ Hz} (\gamma)$.

Elément	masse atomique
² H	2.0141
³ H	3.0160492
⁴ He	4.002602
¹ n	1.0086653

- b) Dans 1 kg de deutérium, il y a 500 moles de 2 g soit $500 * 6.022 * 10^{23} = 3.011 * 10^{26}$ atomes de ²D. L'énergie obtenue par la fusion est de $3.011 * 10^{26} * 2.81798 * 10^{-12} \text{ J} = 8.48 * 10^{14} \text{ J}$.
Quelle est la masse de tritium qui réagit avec le deutérium ? 1 mole + 1 mole = 2 g de deutérium et 3 g de tritium. $\Rightarrow 1 \text{ kg de deutérium et } 1,5 \text{ kg de tritium}$.