

# PHOTONS ET ATOMES – Résumé

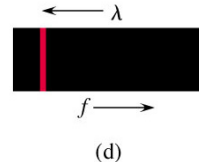
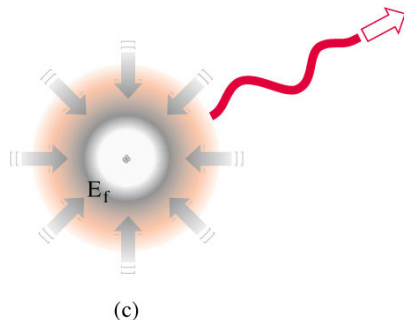
En 1905, Einstein postule que l'onde électromagnétique est quantifiée, c'est-à-dire constituée de paquets énergétiques discrets: les photons.

Un faisceau électromagnétique de fréquence  $f$  est constitué de paquets d'énergie, chaque paquet transportant une énergie :

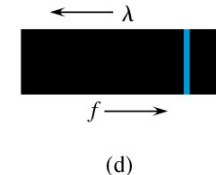
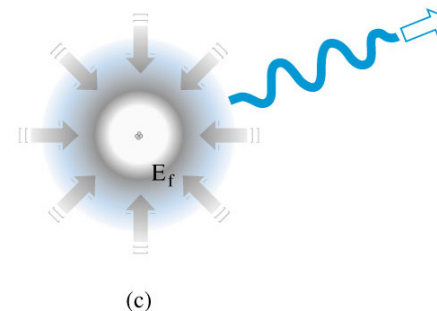
$$E = hf = h \frac{c}{\lambda}$$

Selon le modèle de Bohr, un atome ne peut émettre ou absorber un photon que lorsque l'électron saute d'un état orbital stationnaire à un autre.

$$hf = E_{\text{initiale}} - E_{\text{finale}}$$



© 2001 Brooks/Cole Publishing/ITP



© 2001 Brooks/Cole Publishing/ITP

Einstein, en 1917 émit l'idée qu'une **photon arrivant sur un atome déjà excité** pouvait stimuler sa désexcitation. C'est l'**émission stimulée**, au cœur de l'émission des **LASERS**.

# PHYSIQUE NUCLÉAIRE

---

Désintégrations  $\alpha$ ,  $\beta$ , et  $\gamma$

Tomographie à rayons X et PET

Noyau atomique (proton et neutron)

Isotopes

Unité de Masse Atomique et son équivalent en énergie

Lois de conservation pour les réactions nucléaire

Définition de l'activité radioactive

Demi-vie et datation au Carbone 14

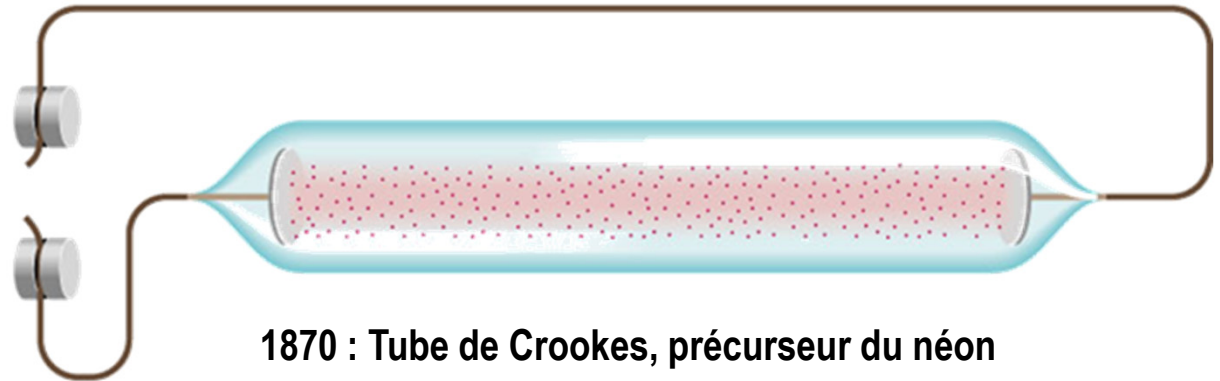
Kane chapitre 30

Hecht chapitre 32

# Etude des décharges dans le gaz

~1870 : observation d'une lumière qui semble partir du "-" (cathode) en direction du "+" (anode)

A la fin du XIXème, une des questions était de savoir quelle est l'origine de ce rayonnement cathodique ?

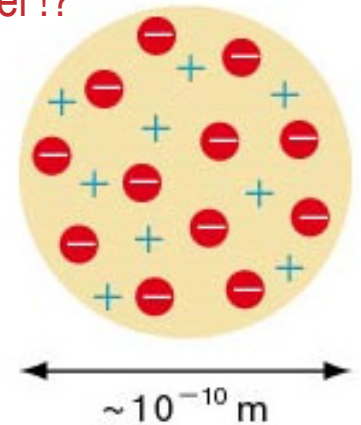


1870 : Tube de Crookes, précurseur du néon

- ▶ il est dévié par un champ magnétique perpendiculaire → particules chargées !
- ▶ il traverse une feuille de métal sans faire de trous → ne peut-être matériel !?

Le 30 avril 1897, le physicien anglais Joseph John Thomson réalise une expérience pour étudier la nature de ce rayon cathodique et découvre l'électron (prix Nobel 1906).

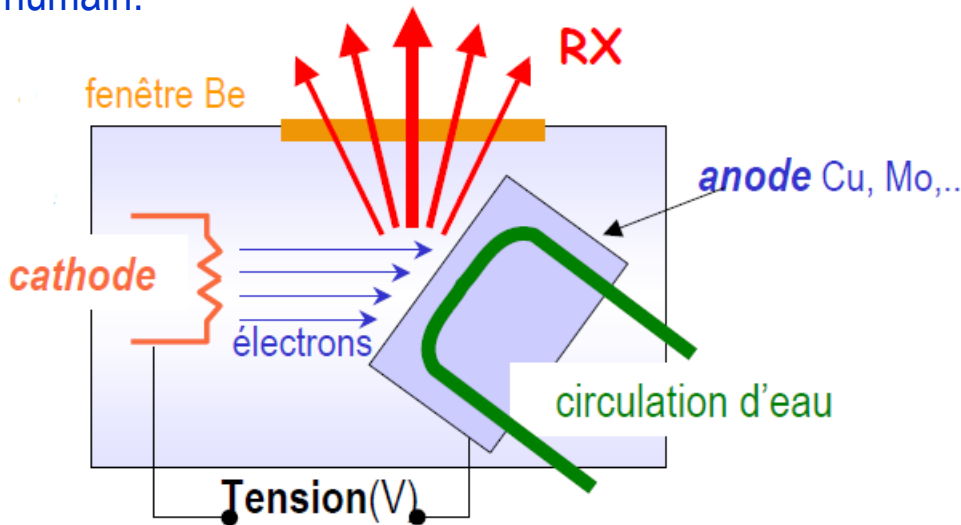
Cela l'amène à proposer un premier modèle de l'atome formé de substance chargée positivement et négativement.



Atome de Thomson

# Découvertes des Rayons X

En novembre 1895, Röntgen s'aperçoit qu'un rayonnement est émis par l'anode frappée par le rayonnement cathodique précédent et que ce rayonnement est capable de traverser le corps humain.



Le 22 décembre 1895 Röntgen fera le premier cliché de la main de sa femme avec un temps de pose de 20 minutes.

Le 28 décembre 1895, Röntgen soumet un manuscrit :

*"Une nouvelle sorte de rayons"*. Il recevra pour cette découverte le premier prix Nobel de physique en 1901.

Deux semaines plus tard, Walkhoff réalise la première radiographie dentaire.



# Production des Rayons X

L'énergie maximale d'un photon de rayon X sera égale à l'énergie cinétique  $E_c$  perdue par l'électron.

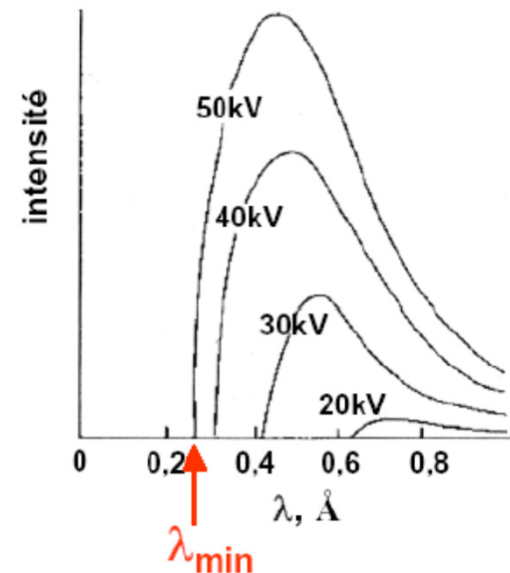
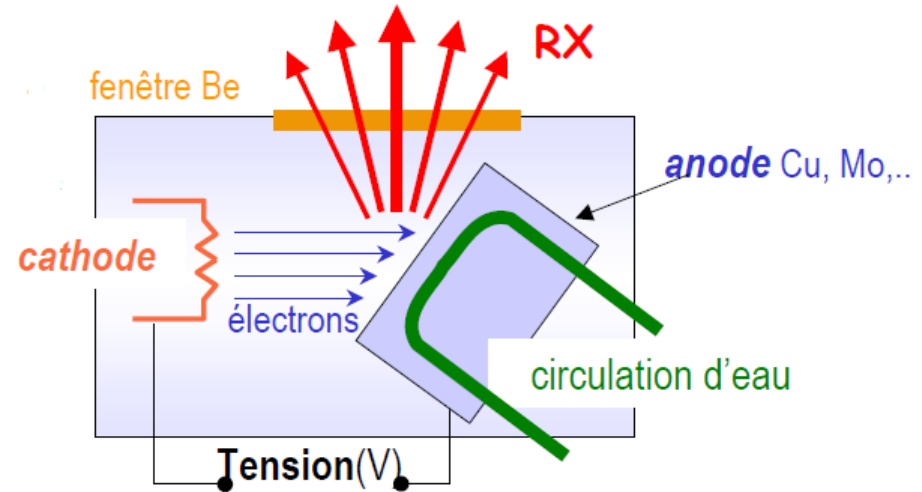
L'énergie cinétique  $E_c$  est égale à la diminution de l'énergie potentielle  $qV$ , on trouve pour l'énergie maximale d'un photon de rayon X l'expression:

$$E_X^{\max} = hf_{\max} = qV \Rightarrow f_{\max} = \frac{qV}{h}$$

La longueur d'onde minimale  $\lambda_{\min}$  associée à  $f_{\max}$  vaut:

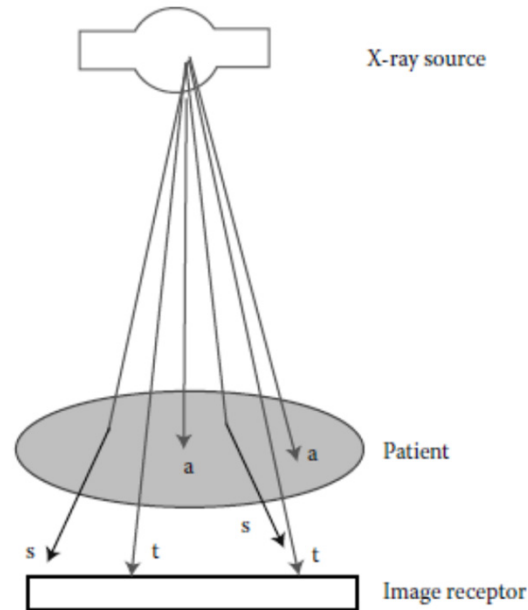
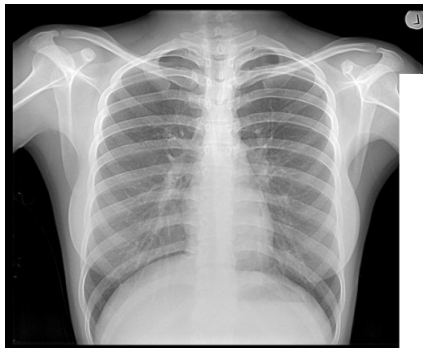
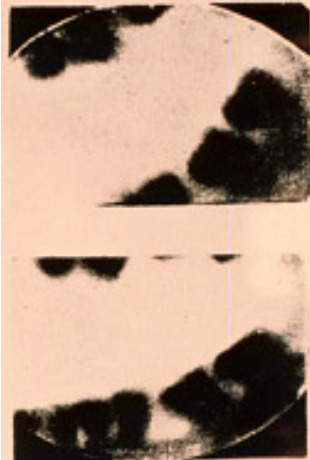
$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{hc}{qV} = \frac{1.2398 \cdot 10^{-6}}{V} [\text{m}]$$

$$= \frac{1.2398 \cdot 10^4}{V} [\text{\AA}]$$

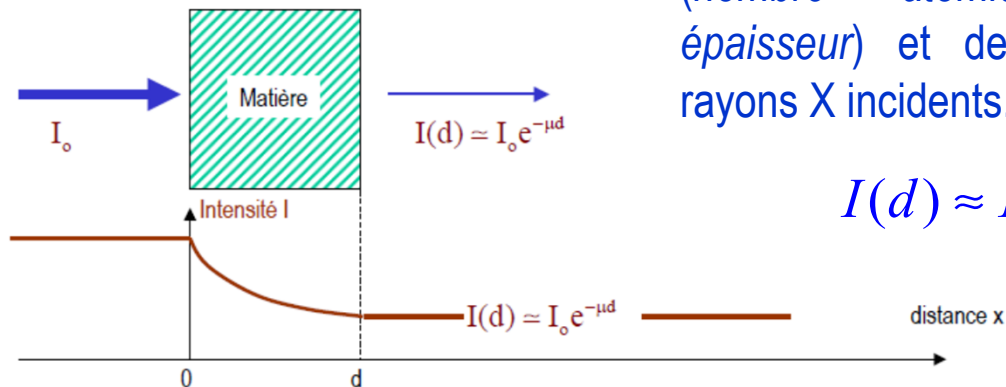


# Radiographie diagnostique: l'ombre du corps par les rayons X

Premier cliché dentaire 1896



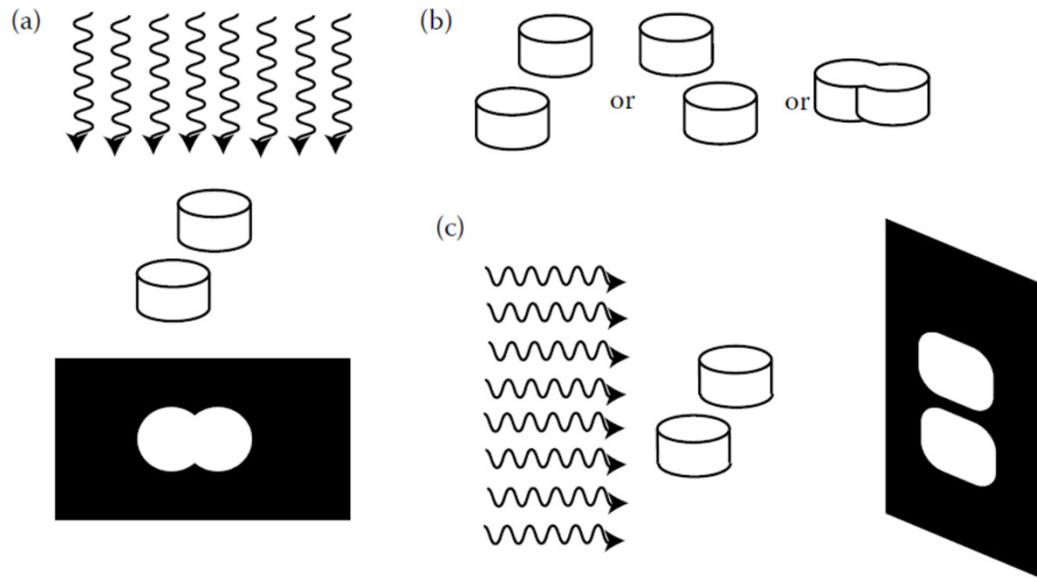
Les rayons X sont générés par une source qui émet le rayonnement sous différents angles. Les rayons X traversent le corps avant de rencontrer un détecteur. L'image sur le détecteur est formée par les rayons X qui ne sont pas absorbés par le corps, mais qui sont transmis ou diffusés de manière à atteindre le détecteur.



L'intensité du faisceau sortant dépend de la matière traversée (*nombre atomique, densité, épaisseur*) et de l'énergie des rayons X incidents.

$$I(d) \approx I_0 e^{-\mu d}$$

# Computer-assisted tomography: Le principe de fonctionnement

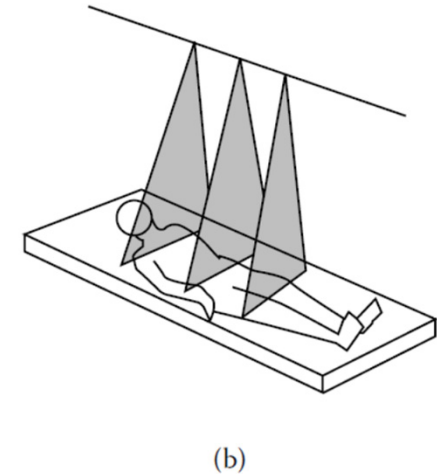
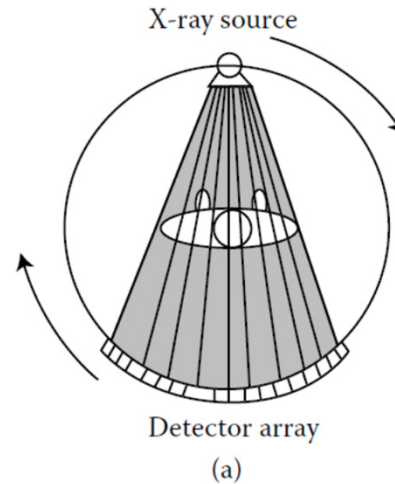
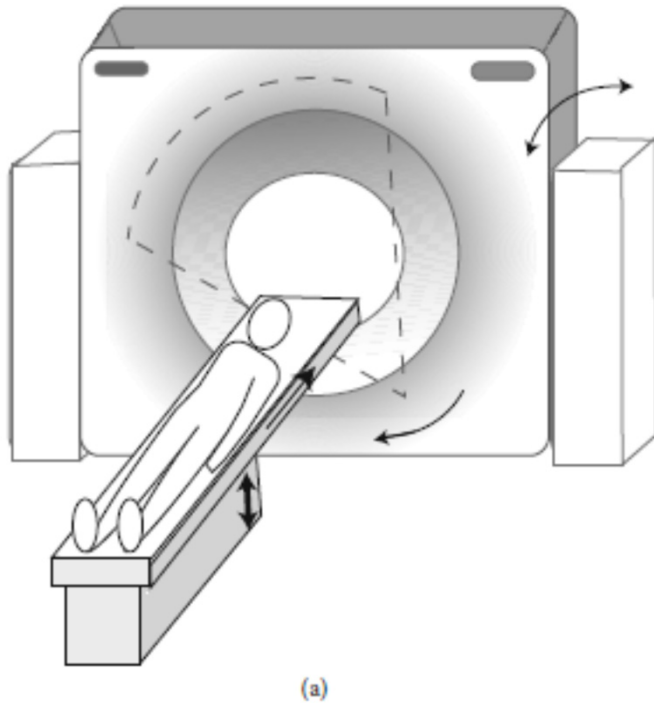


La tomographie par absorption de rayons X permet de reconstruire des images 3D des structures anatomiques.

L'illustration montre que une seule projection ne peut pas distinguer la structure des objets qui se chevauchent. Par exemple, on ne sait pas lequel des trois options présentées en (b) correspondent à l'orientation spatiale des objets.

L'ajout d'une deuxième projection aux informations disponibles en (a) permet de clarifier la disposition tridimensionnelle des deux objet. Il est maintenant clair que les options 1 ou 2 peuvent être correctes, mais pas l'option 3. Une troisième projection pourrait être utilisée pour distinguer entre les deux possibilités restantes.

# Computer-assisted tomography : CT-scan



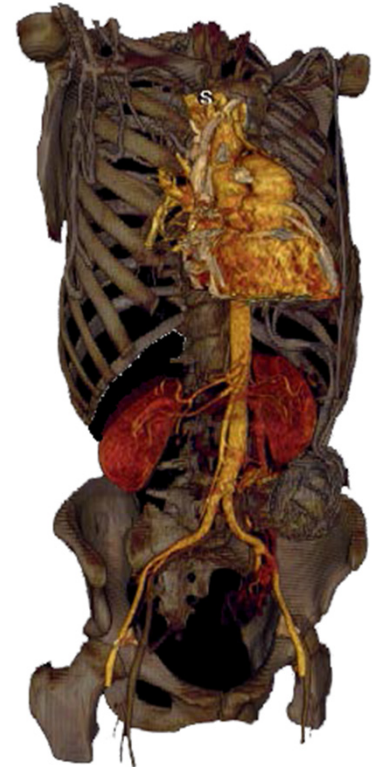
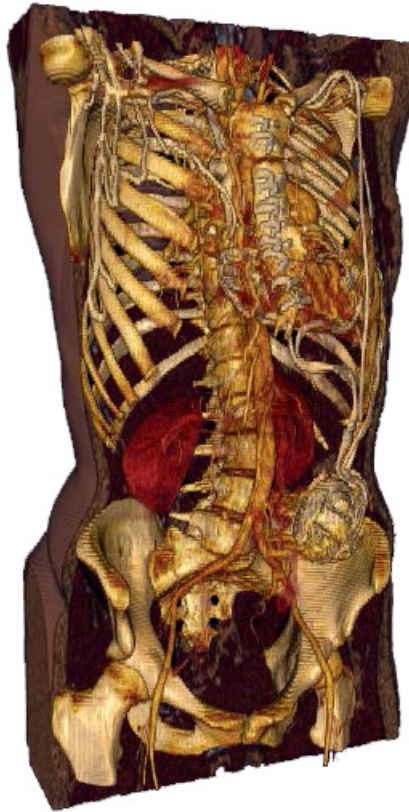
La source de rayons X et le réseau de détecteurs en forme d'arc tournent en tandem, enregistrant les projections à l'intérieur du corps sous de nombreux angles différents.

Une fois que suffisamment d'orientations ont été enregistrées, le patient est déplacé plus loin dans le scanner et le processus est répété pour une nouvelle section du corps.

Dans un scanner pour la tomographie à rayon X, le patient examiné repose sur une table qui rentre progressivement dans l'ouverture circulaire du scanner.

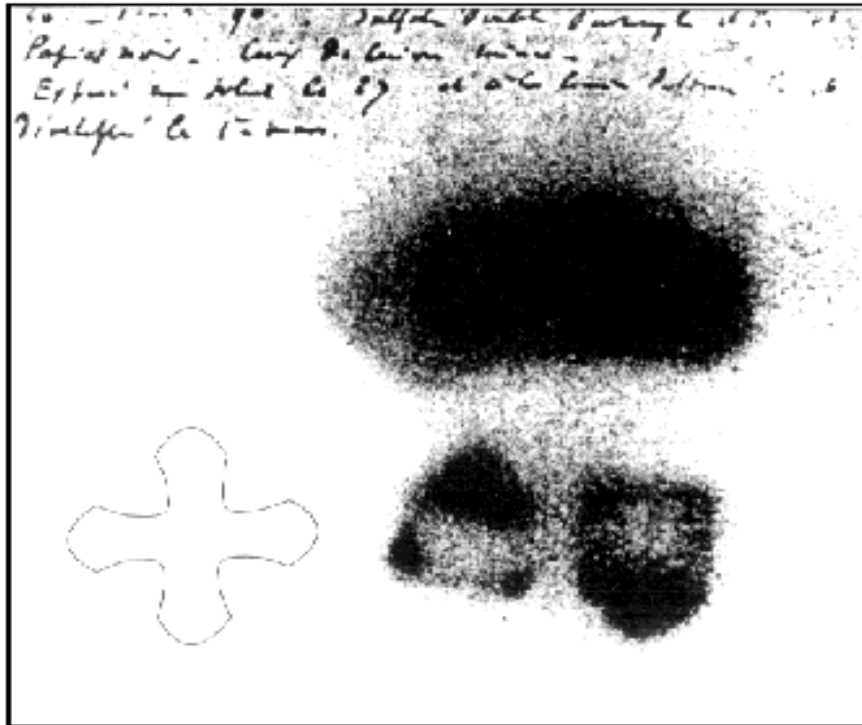
# Computer-assisted tomography : CT-scan

---



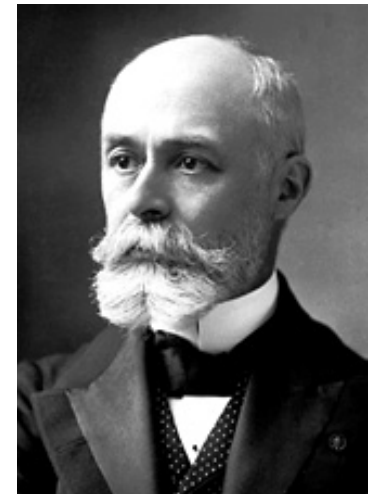
# Découverte de la radioactivité

Fin février 1896, Henri Becquerel (Nobel 1903), pensant travailler sur les rayons X, range à l'abri de la lumière des cristaux de sels d'uranium à côté d'une plaque photographique vierge. Le 1<sup>er</sup> mars 1896, il retire la plaque et la développe :



- ▶ Il constate que la plaque photo est impressionnée sans avoir été exposée à la lumière.
- ▶ Il en conclut que l'Uranium émet un rayonnement spontané différents des rayons X qu'il nomme "rayons uraniques".

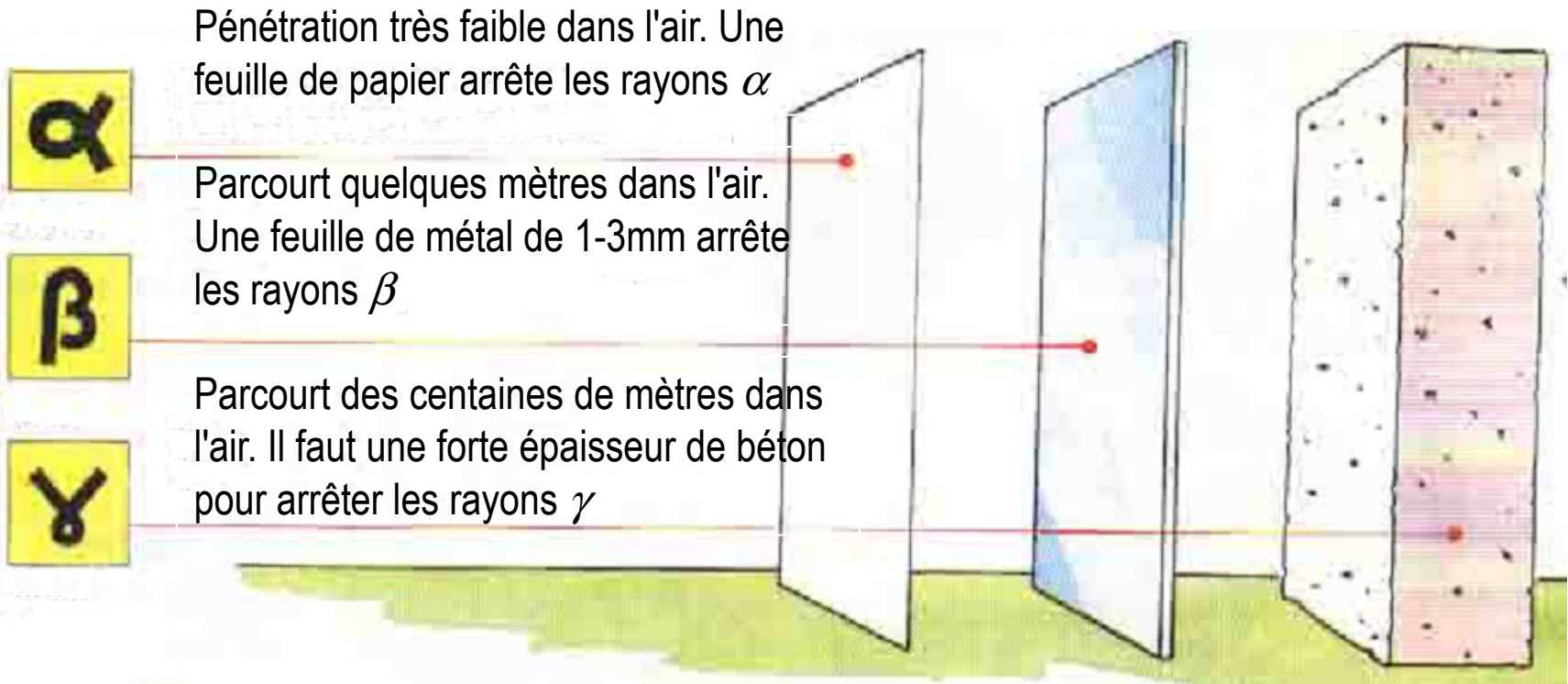
C'est Marie Skłodowska-Curie (Nobel 1903 et 1911) qui appellera **radioactivité** ce phénomène d'émission de rayons invisibles découvert par Becquerel.



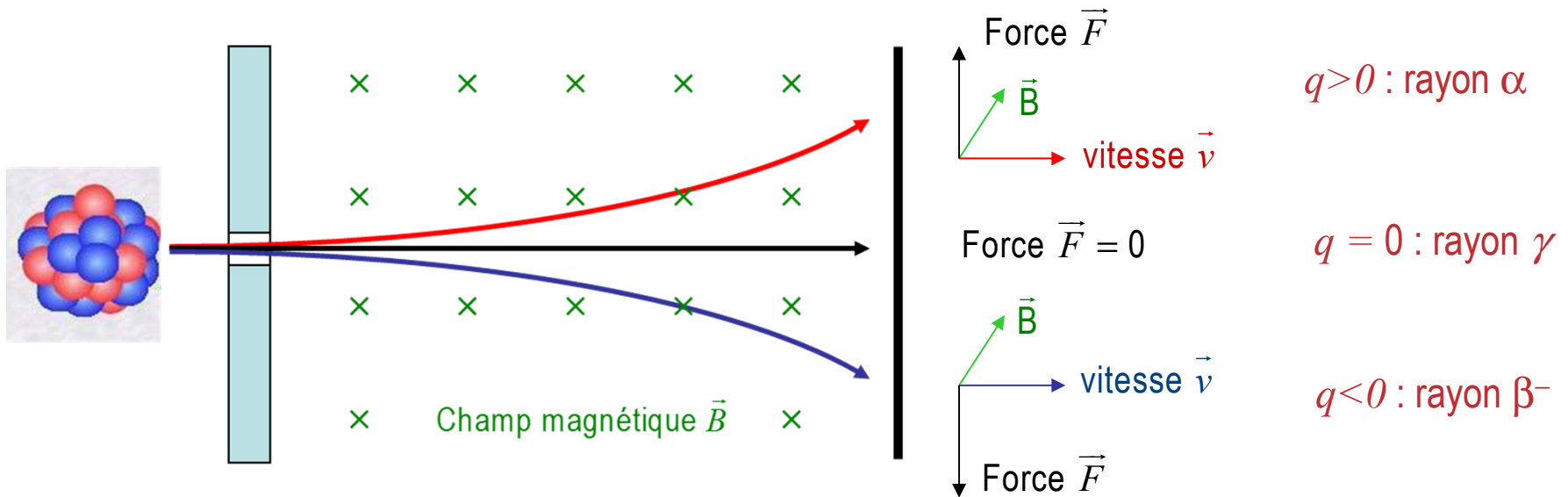
# Classification des rayonnements

Dès 1895, Ernest Rutherford (Nobel 1908) compléta cette quête en découvrant les rayons  $\alpha$ ,  $\beta$ , et en 1900, P. Villard découvrit les rayons  $\gamma$ .

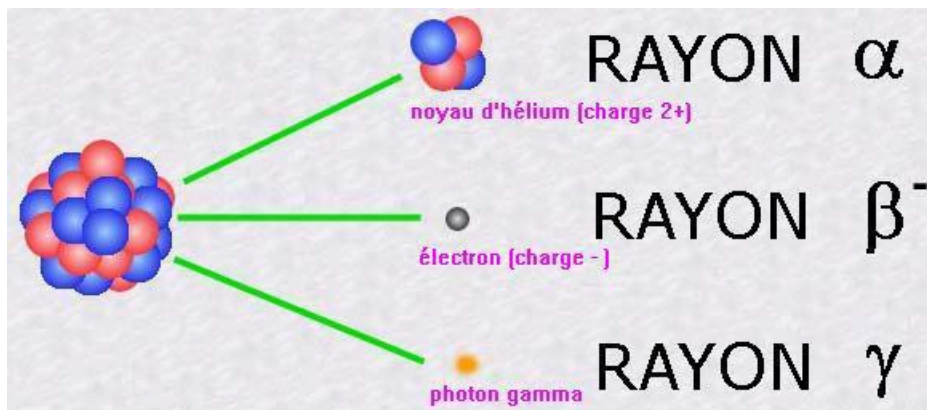
On peut classier les rayonnements selon leur pouvoir de pénétration :



# Radioactivité – Rayonnement ou particules ?



Rappel :  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$



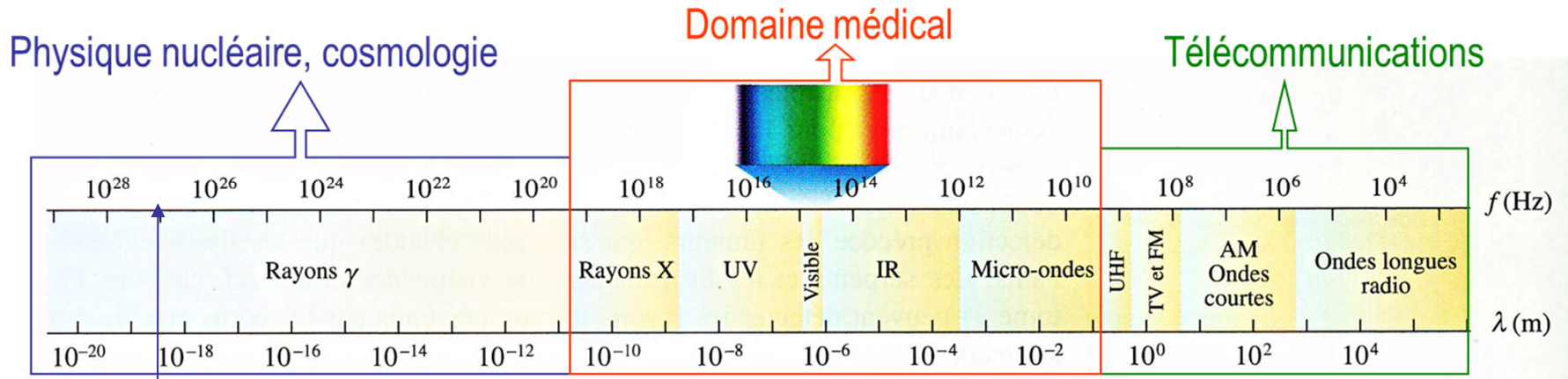
Rayon  $\beta^+$  émission d'un positron

# Quelle différence entre Rayons X et $\gamma$ ?

Différence est historique : Rayon  $X$  : rayonnement produit par des électrons

$$E = hf$$

Rayon  $\gamma$  : rayonnement issu de désintégration atomique



$R_X$ mous $\Rightarrow f = 10^{17} \text{ Hz}$	$E = 6.23 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1} \cdot 10^{17} \text{ s}^{-1} = 6.23 \cdot 10^{-17} \text{ J}$	$E = \frac{6.23 \cdot 10^{-17} \text{ J}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 3.9 \cdot 10^2 \text{ eV}$
$R_X$ durs $\Rightarrow f = 10^{19} \text{ Hz}$	$E = 6.23 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1} \cdot 10^{19} \text{ s}^{-1} = 6.23 \cdot 10^{-15} \text{ J}$	$E = \frac{6.23 \cdot 10^{-15} \text{ J}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 3.9 \cdot 10^4 \text{ eV} = 39 \text{ keV}$
$R_\gamma \Rightarrow f = 10^{27} \text{ Hz}$	$E = 6.23 \cdot 10^{-34} \text{ Js}^{-1} \cdot 10^{27} \text{ s}^{-1} = 6.23 \cdot 10^{-7} \text{ J}$	$E = \frac{6.23 \cdot 10^{-7} \text{ J}}{1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 3.9 \cdot 10^{12} \text{ eV} = 3.9 \text{ TeV}$

Dans le LHC (Large Hadron Collider) les particules ont une énergie de environ 13 TeV correspondant à une fréquence de  $3 \cdot 10^{27} \text{ Hz}$

# Physique Nucléaire : Structure atomique

Atome = Noyau + Couches électroniques

## ► Noyau

– Proton :  $m_p$   $q = + e$

– Neutron :  $m_n \approx m_p$   $q = 0$

## ► Couches électroniques $e^-$

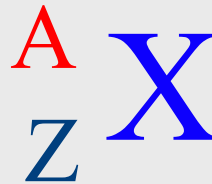
– Electron :  $m_e \ll m_p$   $q = - e$



$$m_p \approx 1836 \cdot m_e = 1.6 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

**Nombre de masse**  $A = Z + N$

$N$  : nombre de neutrons (*masse*)



$X$  : Symbole chimique.

Ne dépend que de  $Z$

**Numéro atomique**

$Z$  : nombre de protons (*charge*)

nombre de neutrons :  $N = A - Z$

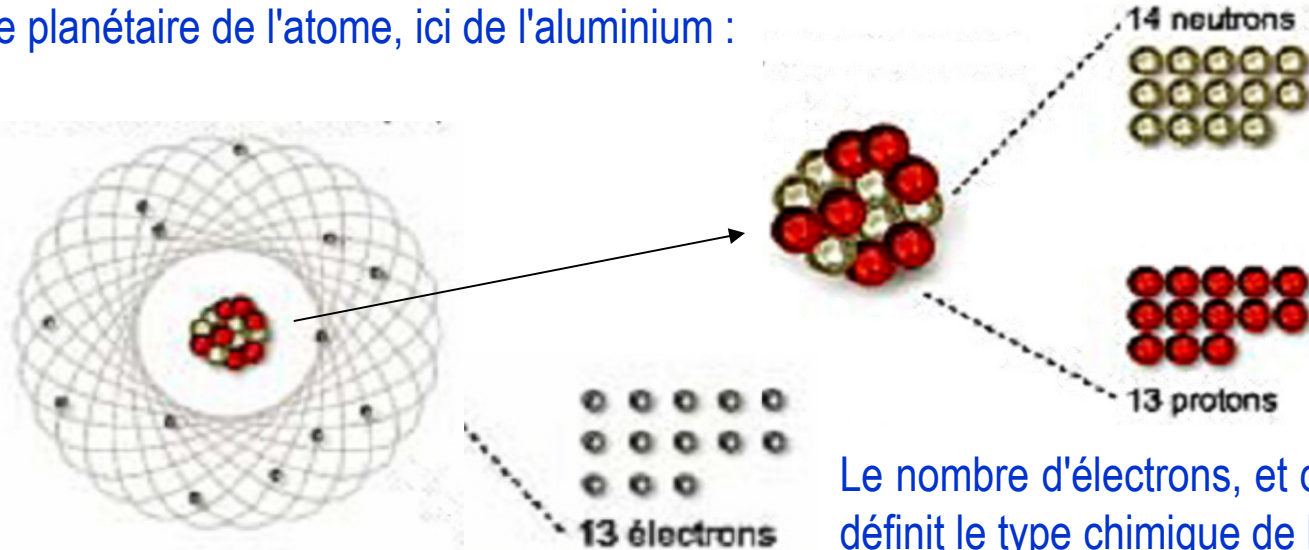
Pour un atome neutre, on a le même nombre  $Z$  de protons que d'électrons.

Ce nombre  $Z$  définit la nature chimique de l'élément.

Le nombre de masse  $A$  est aussi le nombre de nucléons (constituants élémentaires du noyau).

# L'atome, son noyau et ses isotopes

Modèle planétaire de l'atome, ici de l'aluminium :



Le nombre d'électrons, et donc de protons, définit le type chimique de l'élément.

## LES ISOTOPES

Des éléments ayant le même nombre d'électrons mais des masses atomiques différentes



**Hydrogène**  
noyau : 1 proton



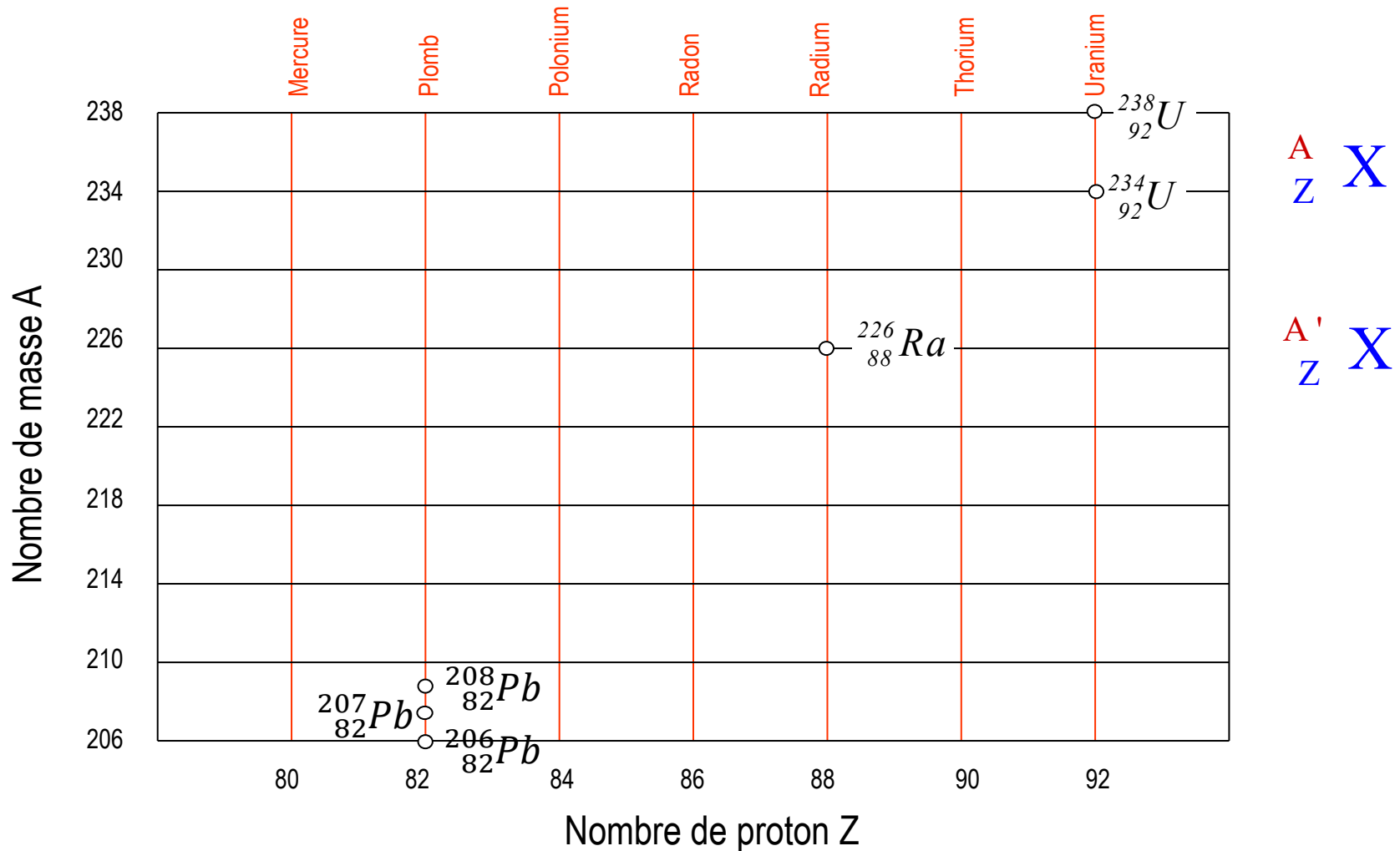
**Deutérium**  
noyau : 1 proton+ 1 neutron



**Tritium**  
noyau : 1 proton+ 2 neutrons

# LES ISOTOPES

Les isotopes d'un élément chimique sont des éléments qui ont le même nombre  $Z$  (même nombre de protons et d'électrons) mais un nombre de masse  $A$  ou nombre de nucléons différent.

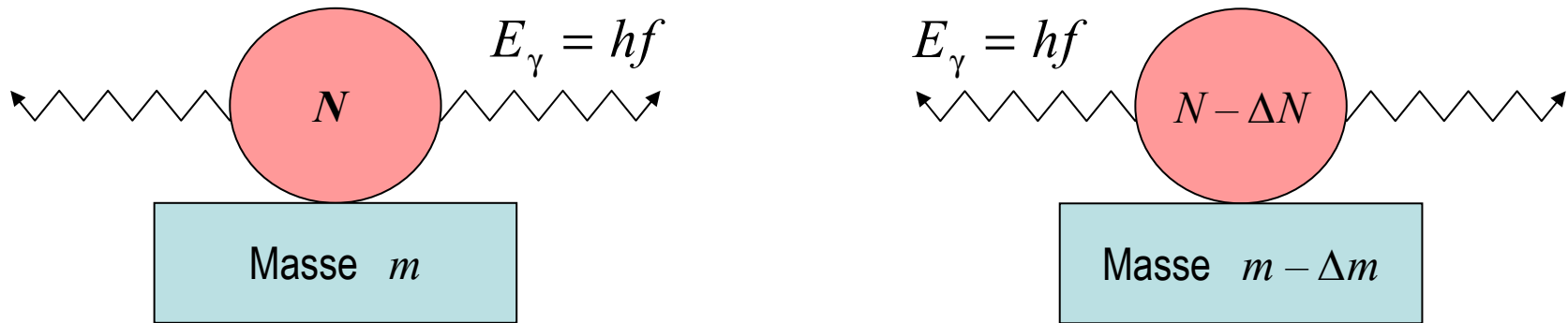


# Équivalence Énergie – Masse

Pour l'exemple, considérons le cas d'un rayonnement  $\gamma$

Soit un ensemble de  $N$  noyaux radioactifs qui forment une masse  $m$ . Au bout d'un certain temps il n'y a plus que  $N - \Delta N$  noyaux radioactifs (mais toujours  $N$  noyaux).

On mesure alors très précisément la masse et l'énergie totale perdue par rayonnement.



$$\text{Énergie perdue : } \Delta E = \Delta N \cdot E_\gamma$$

L'énergie doit être conservée. La perte d'énergie s'accompagne d'une perte de masse.  
Y-a-t-il une relation entre masse et énergie ?

La théorie de la relativité d'Einstein prédit:  $E = mc^2$

L'énergie perdue provient de la diminution de la masse:  $\Delta E = \Delta mc^2$

Masse et énergie sont intimement liées

# Définition de l'Unité de Masse Atomique UMA

Définition : 1 atome  $^{12}_6\text{C}$  pèse exactement 12 Unités de Masse Atomique (UMA)

$$1 \text{ UMA} = \frac{\text{Masse moléculaire par nucléon}}{\text{Nombre d'Avogadro}} = \frac{12\text{g}/12}{6.02 \cdot 10^{23}} = 1.66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$E = mc^2 \quad E^{1 \text{ UMA}} = 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 1.49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

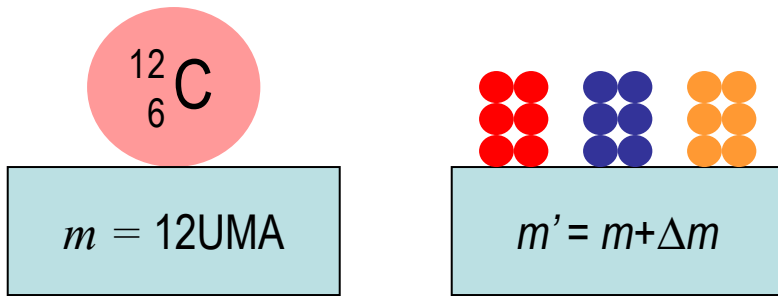
$$E^{1 \text{ UMA}} = \frac{1.49 \cdot 10^{-10} \text{ J}}{1.602 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}}} \approx 931.5 \text{ MeV}$$

$$m_p = 1.67264 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.00728 \text{ UMA} \approx 938 \text{ MeV}$$

$$m_n = 1.67493 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.008665 \text{ UMA} \approx 940 \text{ MeV}$$

$$m_e = 9.109 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0.000549 \text{ UMA} \approx 0.511 \text{ MeV}$$

# Défaut de masse et énergie de liaison – Exemple $^{12}\text{C}$



$$m_p = 1.00728 \text{ UMA} \approx 938 \text{ MeV}$$

$$m_n = 1.008665 \text{ UMA} \approx 940 \text{ MeV}$$

$$m_e = 0.000549 \text{ UMA} \approx 0.511 \text{ MeV}$$

$$m' = 6m_p + 6m_n + 6m_e = 12.0989 \text{ UMA}$$

**QUESTION :** Pourquoi la masse des 6 protons + 6 neutrons + 6 électrons est plus grande que celle du ion  $^{12}\text{C}$  ?

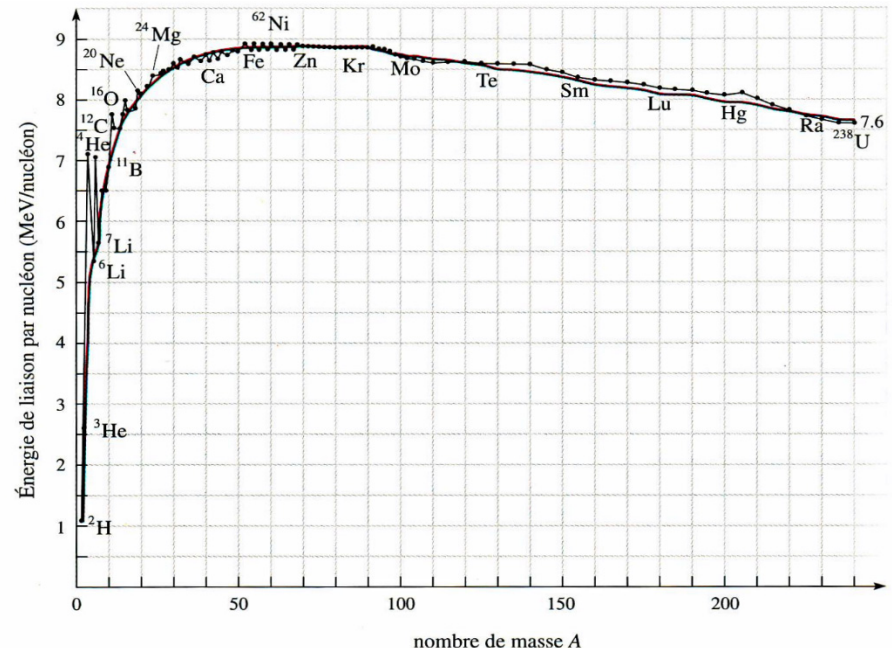
**Réponse :** Une partie de la masse est dans l'énergie de liaison qui tient les nucléons ensemble.

C'est une énergie potentielle.

$$\Delta m = 0.0989 \text{ UMA} = 92 \text{ MeV}$$

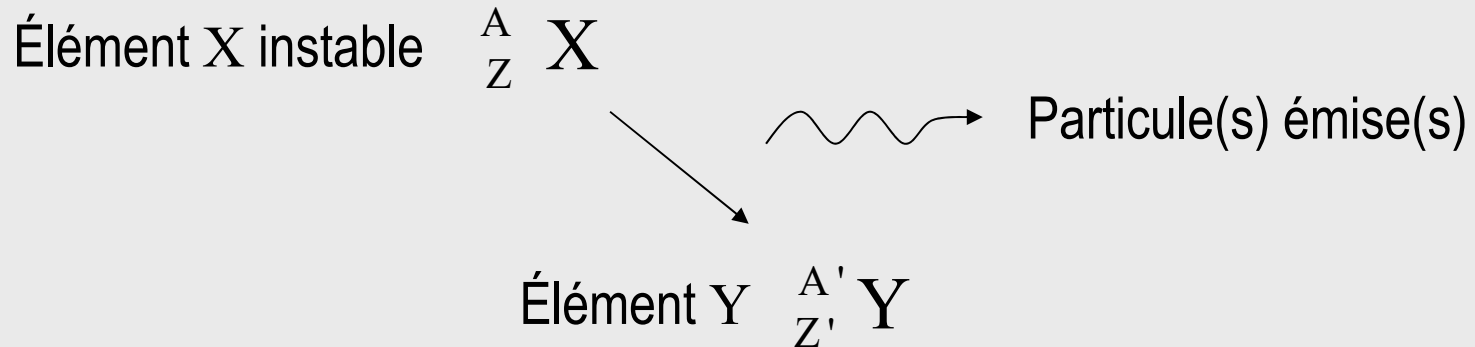
$$\Delta m/\text{nucléon} = 7.7 \text{ MeV}$$

Pour retirer un nucléon du carbone 12 il faudra fournir une énergie de 7.7MeV



# Désintégration nucléaire

Une désintégration nucléaire réalise le rêve des alchimistes : la transmutation



Lors d'une désintégration, le noyau perd de l'énergie.

Cette énergie est emportée par les particules émises.

L'énergie (au sens de Einstein) est conservée :  $E_X = E_Y + E_{particules}$

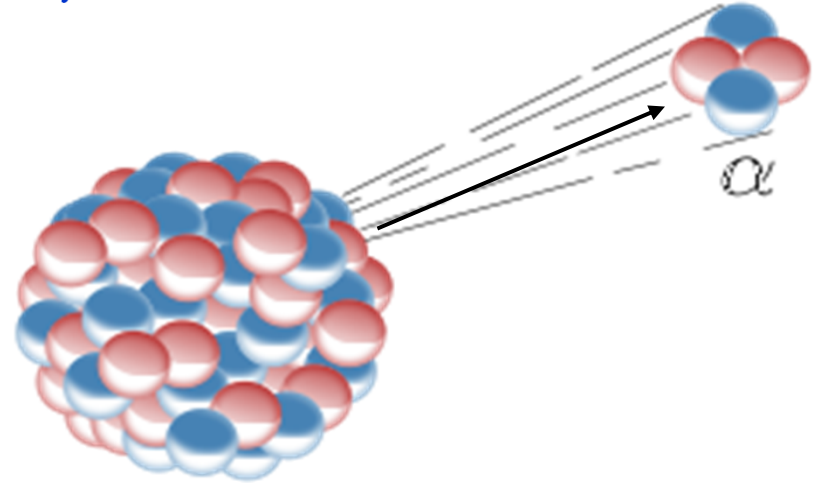
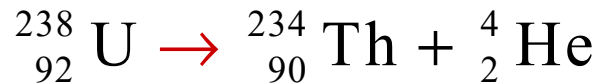
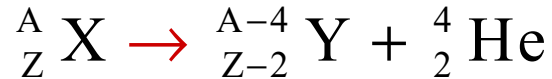
Il existe 4 types de désintégration nucléaire :

Les désintégrations  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  et la capture électronique

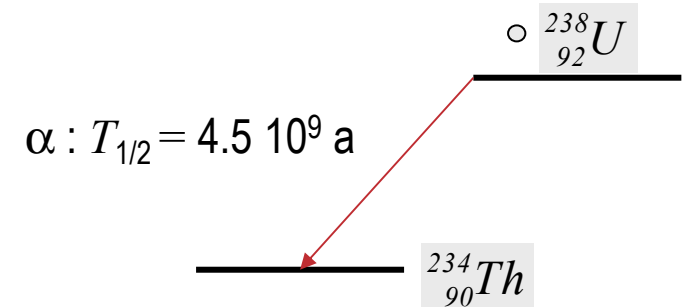
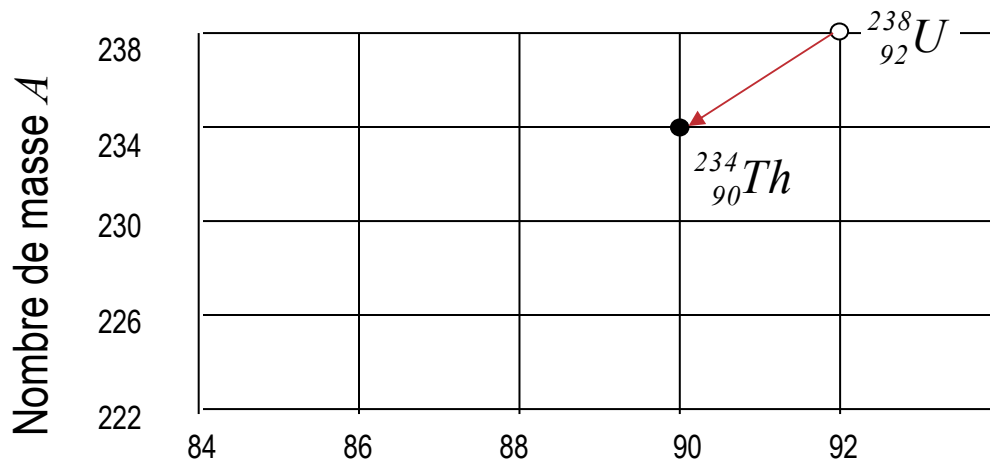
On étudiera les 3 premières désintégrations ( $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ )

# La Désintégration $\alpha$

Lors de la désintégration  $\alpha$ , la particule émise est un noyau d'hélium qui a 2 protons et deux neutrons



Représentation d'une désintégration  $\alpha$



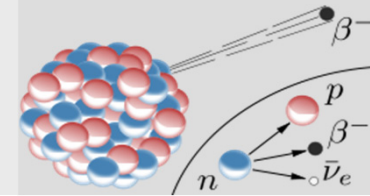
# Les Désintégrations $\beta$

Transformation dans le noyau ( $n \rightarrow p$  ou  $p \rightarrow n$ ). Deux types :  $\beta^-$  et  $\beta^+$

$\beta^-$  : un électron et un antineutrino sont émis

$${}_{38}^{90}\text{Sr} \rightarrow {}_{39}^{90}\text{Y} + e^- + \bar{\nu}$$

(  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$  )

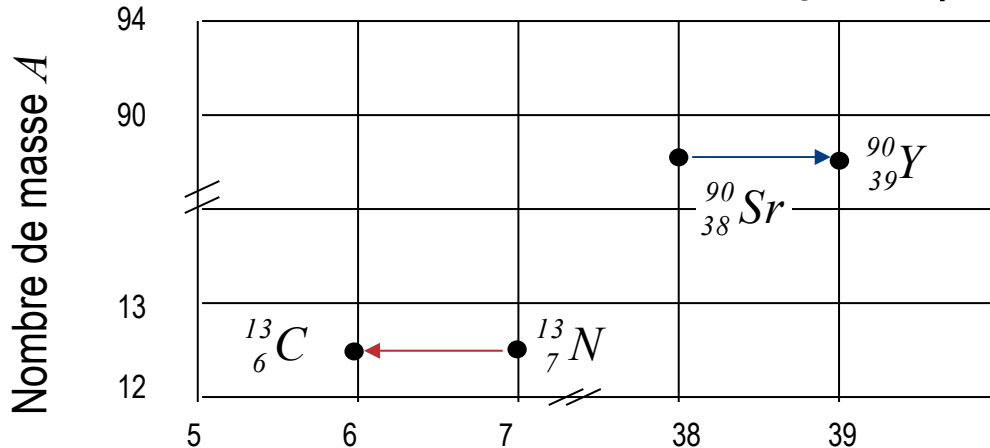


$\beta^+$  : un positron et un neutrino sont émis

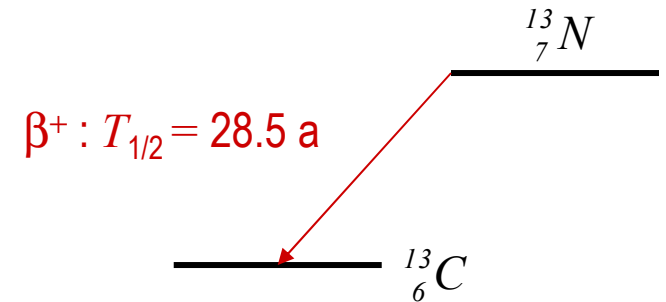
$${}_{7}^{13}\text{N} \rightarrow {}_{6}^{13}\text{C} + e^+ + \nu$$

(  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$  )

Représentation d'une désintégration  $\beta$



Le **positron** est l'antiparticule associée à l'électron. Il possède une charge électrique de +1 charge élémentaire (contre -1 pour l'électron), le même spin et la même masse que l'électron



# La tomographie à émission de positrons (PET)

## Le principe de fonctionnement

Lorsqu'un radionucléide injecté dans le corps du patient subit une désintégration  $\beta^+$  en libérant un positron, celui-ci ne se déplace que sur une courte distance avant d'interagir avec l'un des électrons liés aux atomes du corps.

Après cette rencontre, au lieu des deux particules, on observe deux photons de haute énergie (rayons gamma) sortant en direction opposée. Chaque photon créé a une énergie d'exactly 0.511 MeV.

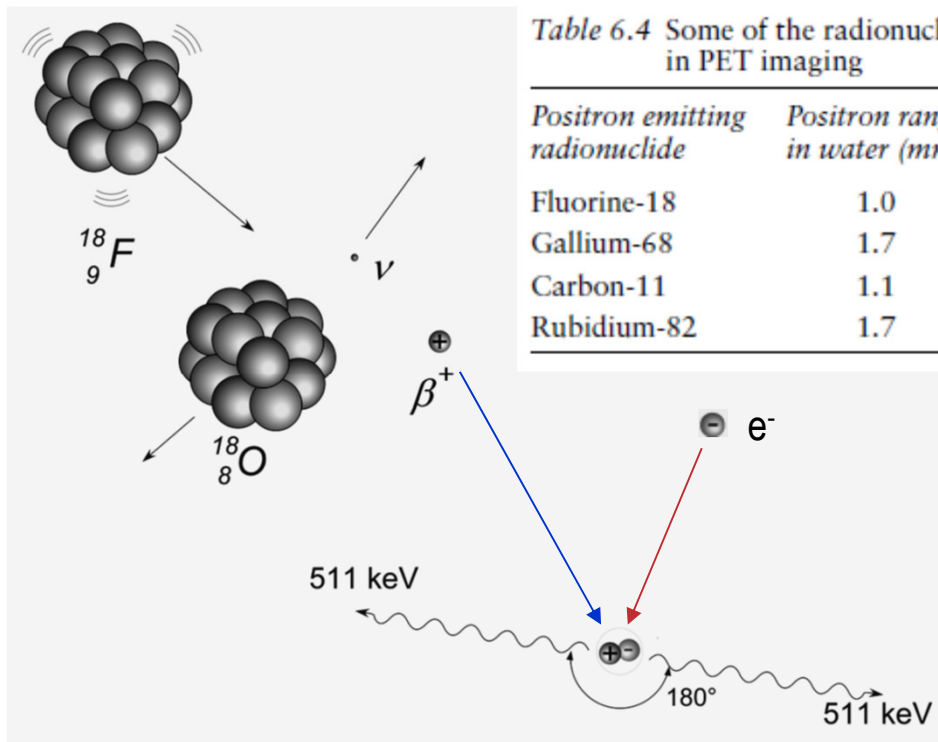


Table 6.4 Some of the radionuclides used in PET imaging

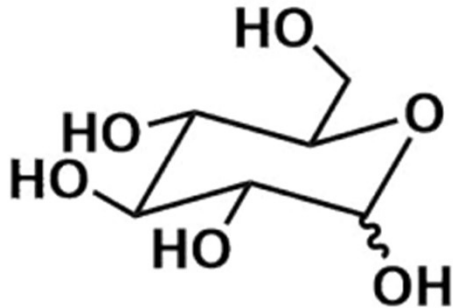
Positron emitting radionuclide	Positron range in water (mm)	Half-life (min)
Fluorine-18	1.0	110
Gallium-68	1.7	68
Carbon-11	1.1	20
Rubidium-82	1.7	1.3

La liste des radionucléides émetteurs de positrons comprend des éléments, comme carbone, oxygène et azote, qui sont les principaux composants des composés organiques du corps.

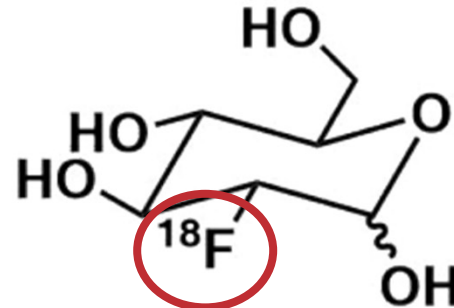
# La tomographie à émission de positrons (PET)

## Le principe de fonctionnement

---



glucose



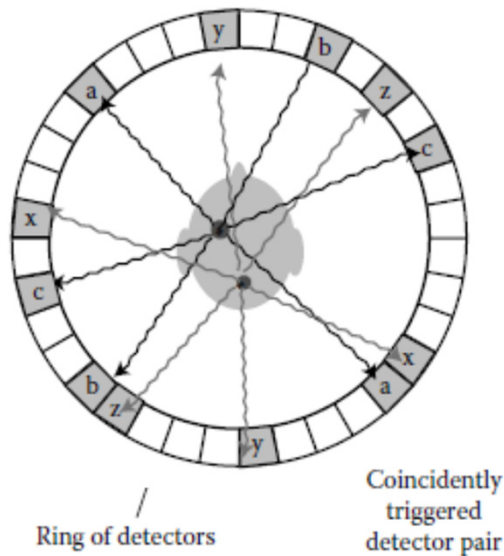
[<sup>18</sup>F]-fluorodeoxyglucose

Le fluor peut être facilement incorporé à des nombreux médicaments et molécules d'origine naturelle en remplacement de l'hydrogène. Par exemple, le sucre marqué au fluor-18, le fluorodésoxyglucose (FDG), est métabolisé par les cellules cérébrales à la place du glucose, ce qui permet au PET de détecter la distribution du sucre radioactif dans le cerveau pour indiquer les régions les plus actives sur le plan métabolique, comme les tumeurs.

De manière similaire, le flux sanguin vers le cerveau peut être visualisé en utilisant du dioxyde de carbone marqué avec de l'oxygène-15 ou du carbone-11 ou de l'eau marquée avec de l'oxygène-15 incorporé dans la circulation sanguine.

# La tomographie à émission de positrons (PET)

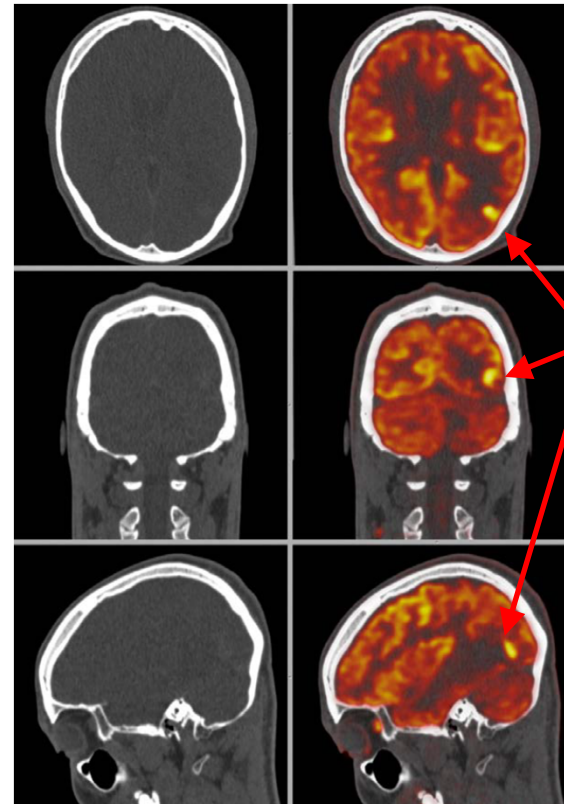
(i)



Les détecteurs entourant le patient imagé par un scanner PET enregistrent le nombre de rayons gamma émis.

Un ordinateur enregistre la ligne de réponse reliant chaque paire de détecteurs déclenchés de manière simultanée (indiquée par des étiquettes identiques).

Comme dans d'autres formes de tomographie assistée par ordinateur, on peut avoir une idée de la technique en notant que les régions radiomarquées (gris foncé) coïncident avec l'intersection de plusieurs lignes de réponse et que le nombre de lignes de réponse contribuant à l'image indique l'activité de source relative de cette région.

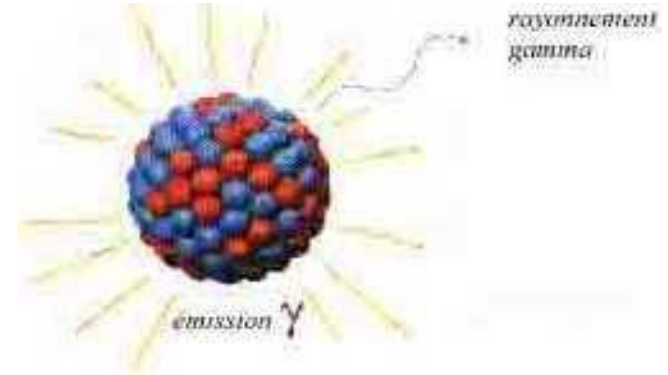
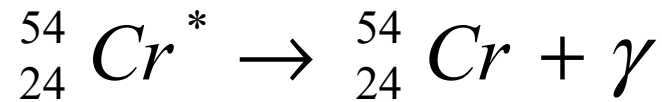


**lymphome cérébral**

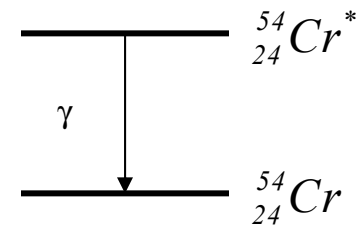
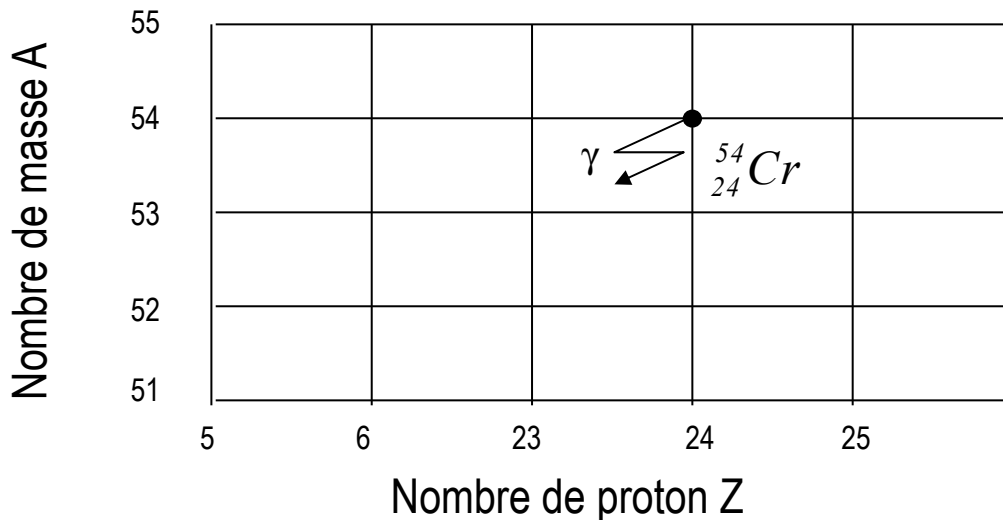
# La Désintégration $\gamma$

Le  $\gamma$  est un photon, il n'a ni masse ni charge.

Un noyau excité donne une partie de son énergie au photon :



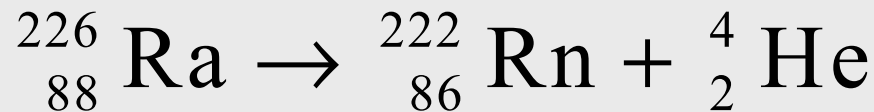
Cette désintégration ne change pas la nature chimique de l'élément. Cette désintégration permet d'abaisser l'énergie de l'élément (état plus stable)



# Lois de Conservation dans un processus nucléaire

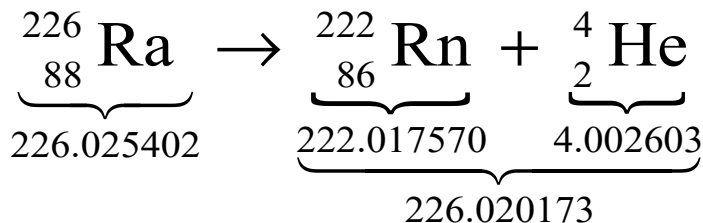
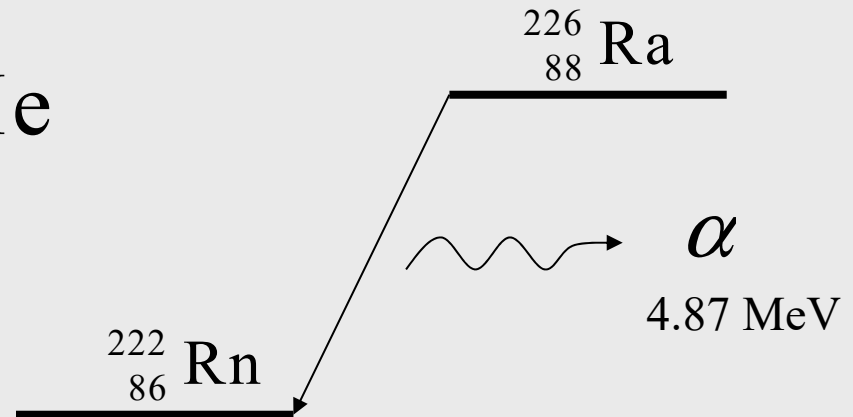
Dans une désintégration nucléaire les quantités suivantes sont conservées :

- Le nombre de nucléons (nombre de protons et de neutrons)
- La charge électrique
- L'énergie au sens de Einstein (y compris l'énergie de la masse)
- La quantité de mouvement et le moment cinétique (on n'échappe pas aux lois universelles)



Nombre de nucléons :  $226 = 222 + 4$

Nombre de charge :  $88 = 86 + 2$



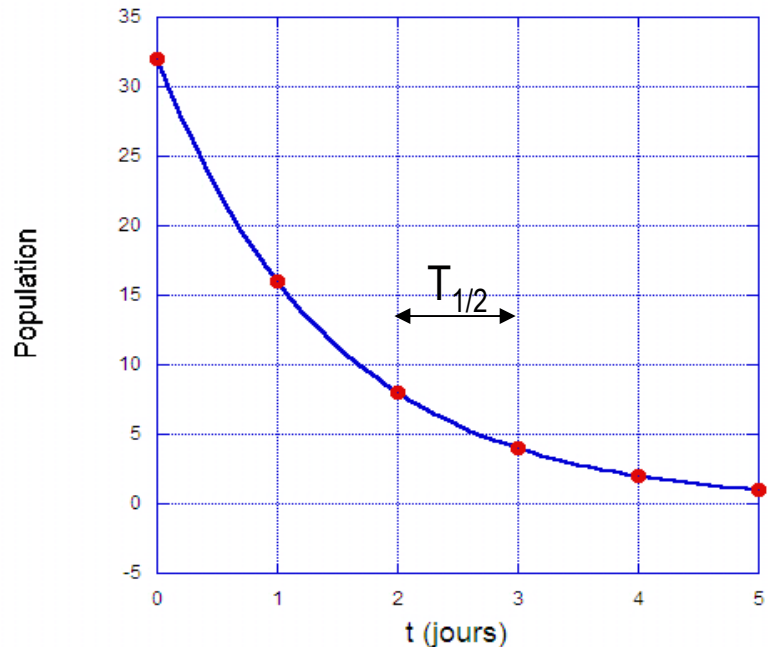
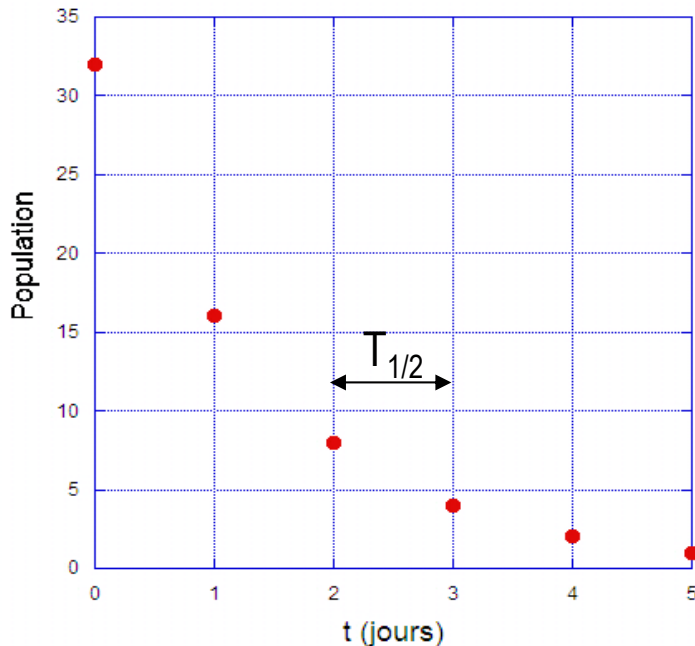
Il y a un déficit de masse de 0.005229 UMA qui correspond à une énergie de 4.87 MeV

# Comportement exponentiel en radioactivité

Imaginons qu'une population de 32 bactéries diminue de moitié chaque jour. Dans ce cas la demi-vie  $T_{1/2}$  est de 1 jour et la population en fonction du temps  $t$  sera :

$$P(t) = P_0 \cdot 2^{-t/T_{1/2}} \text{ avec } t \text{ en jours}$$

$$P(t) = P_0 \cdot e^{-\lambda t} \text{ avec } \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$



Pour la radioactivité, la population est le nombre de noyaux instables et la demi-vie est le temps nécessaire pour que ce nombre diminue de moitié.

# Loi de désintégration – activité d'une source radioactive

$$N(t) = N_o \cdot e^{-\lambda t} \text{ avec } \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}}$$

$T_{1/2}$  : demi-vie et  $N_o$  : nombre initial de noyaux instables

L'**activité  $A$  d'une source radioactive** est le nombre de désintégrations par seconde.

Elle est mesurée en Becquerel (1 Bq = 1 désintégration / sec).

Définition : 
$$A = -\frac{\Delta N}{\Delta t} \equiv -\frac{dN}{dt}$$

$$A(t) = \underbrace{\lambda N_o}_{A_o} \cdot e^{-\lambda t} = A_o \cdot e^{-\lambda t} \text{ avec } \lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} \text{ et } A_o = \lambda N_o$$

$T_{1/2}$  : demi-vie et  $A_o$  : activité initiale

# Activité d'une source radioactive – Exemple

---

**QUESTION :** On a 1ng ( $10^{-9}$ g) de  $^{18}\text{F}$  dont la demi-vie est de 110 minutes.

a) Quelle est l'activité initiale de cette source ?

b) Quelle est son activité après 48 heures ?

**SOLUTION :** a) L'activité initiale est donnée par :  $A_0 = \lambda N_0$

Le nombre d'atomes  $N_0$  dans 1ng de  $^{18}\text{F}$  se calcule ainsi :

1 mole de  $^{18}\text{F}$  pèse 18g, alors 1 ng correspond à :  $10^{-9} \text{ g} / 18\text{g} = 5.5 \times 10^{-11}$  moles

qui contient :  $5.5 \times 10^{-11}$  moles  $\cdot 6.02 \times 10^{23}$  atomes/mole =  $3.31 \times 10^{13}$  atomes

Avec :  $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{110 \cdot 60} = 1.05 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  , on obtient l'activité initiale :

$$A_0 = 1.05 \times 10^{-4} \cdot 3.31 \times 10^{13} = 3.47 \times 10^9 \text{ atomes/s} \approx 3 \text{ milliards Becquerel}$$

b) Après 24 heures =  $24 \times 60 \times 60 = 86400\text{s}$  :  $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$

$$A(t = 24h) = A_0 e^{-\lambda t} = 3.47 \times 10^9 e^{-1.05 \times 10^{-4} \cdot 86400} \approx 4 \times 10^5 \text{ Bq}$$

$$A(t = 48h) = 46 \text{ Bq}$$

# Datation au carbone 14

Le carbone 14 est produit continuellement dans l'atmosphère par une interaction entre le rayonnement cosmique et l'azote.



Toute matière vivante absorbe du carbone et donc du  ${}^{14}\text{C}$ . À la mort, ce  ${}^{14}\text{C}$  arrête d'être absorbé et son taux de radioactivité permet d'évaluer le temps écoulé.

## Demi-vie de quelques isotopes radioactifs

Isotope	Mode de désintégration	Demi-vie
Rubidium 87	$\beta^-$	$4,7 \times 10^{11}$ a
Uranium 238	$\alpha$	$4,5 \times 10^9$ a
Plutonium 239	$\alpha$	$2,4 \times 10^4$ a
Carbone 14	$\beta^-$	5730 a
Radium 226	$\alpha$	1600 a
Strontium 90	$\beta^-$	28 a
Tritium 3	$\beta^-$	12,26 a
Cobalt 60	$\beta^-$	5,24 a
Iode 131	$\beta^-$	8 j
Radon 222	$\alpha$	3,82 j
Technetium 104	$\beta^+$	18 min
Fluor 17	$\beta^-$	66 s
Polonium 213	$\alpha$	$4 \times 10^{-6}$ s
Béryllium 8	$\alpha$	$1 \times 10^{-16}$ s

La mesure du rapport  ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$  dans un échantillon organique permet de dater cet échantillon

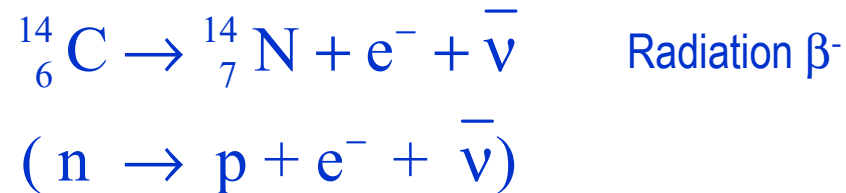
# Datation au carbone 14

---

Le rapport de  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  est constant et vaut approximativement  $1.3 \times 10^{-12}$ .

Un organisme vivant absorbe constamment du  $^{14}\text{C}$  radioactif, compensant ainsi la perte de cet isotope dans l'organisme.

Quand un organisme meurt, ce remplacement ne se fait plus et la proportion de  $^{14}\text{C}$  diminue avec un taux déterminé par sa demi-vie qui est de 5730 ans.



Domaine d'utilisation de cette datation : 100 – 50'000 ans

	$N(t)/N_0$
1 heure	0.99999999
1 jour	0.99999967
1 année	0.99987906
10 ans	0.99879131
100 ans	0.9879786
1000 ans	0.88608499
10000 ans	0.29836907
50000 ans	0.00236466

# Calendrier des prochaines séances PGA

---

## PROCHAINES SÉANCES D'EXERCICES

**Mardi 24 Mars 13:15 – 15:00**

**Salles Müller**

**Mardi 14 Avril 13:15 – 15:00**

**Salles Müller**