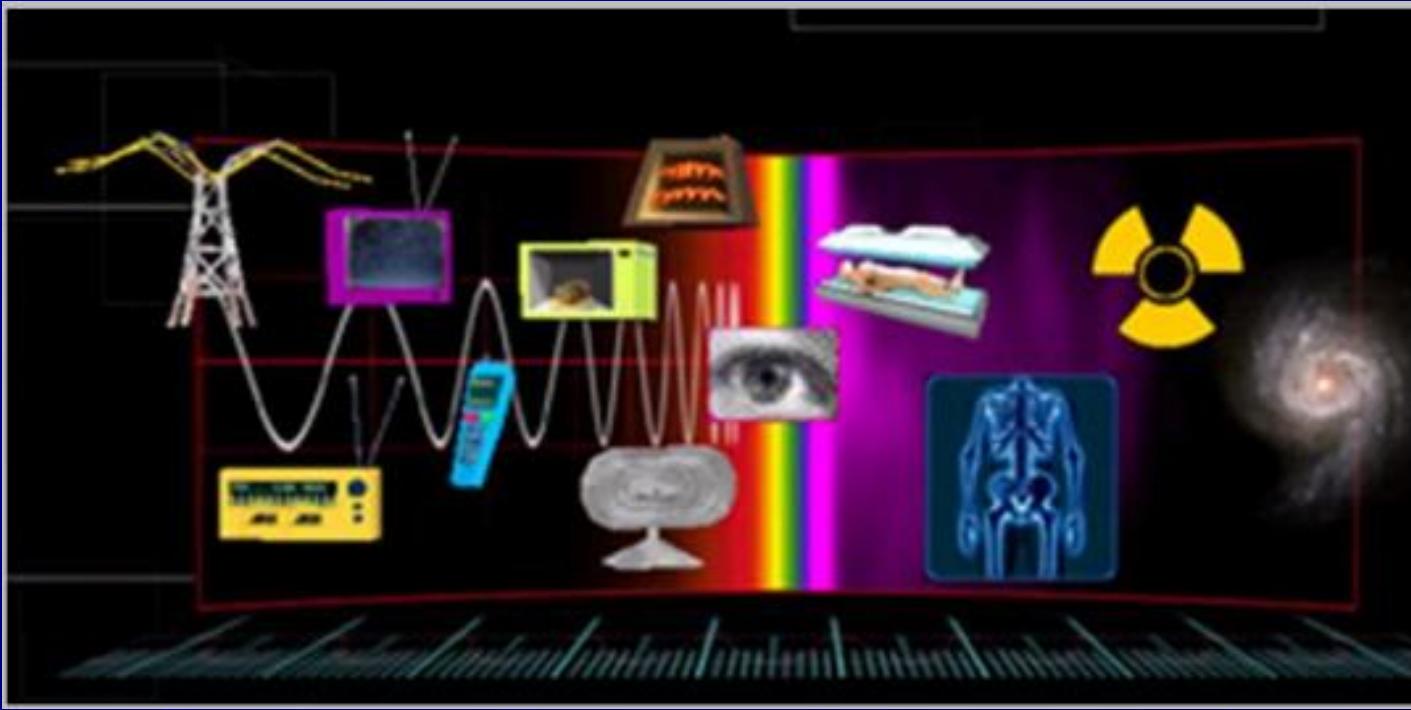
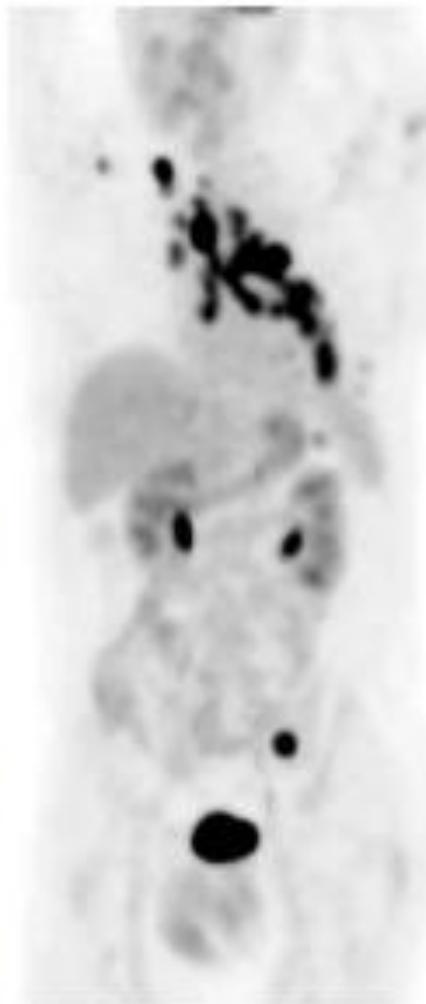
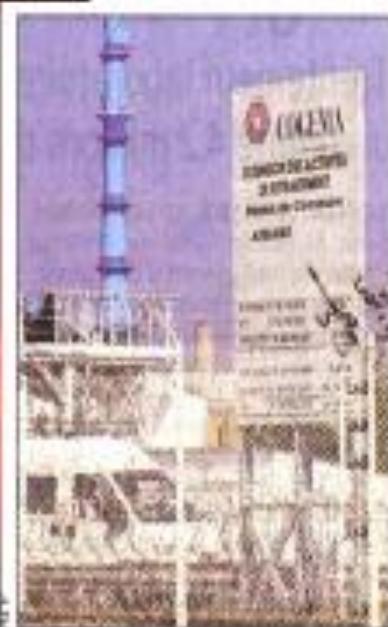


Dosimétrie photonique et biologique



Professeur R. SEBIHI
Physique Médicale
Faculté des Sciences de Rabat

Le contexte...



DÉCHETS NUCLÉAIRES
Le Mox caché de la Hague

Objectifs du module dosimétrie photonique et biologique

Rayonnements

- électromagnétiques (X, γ)
- particules

Interactions avec la matière

- inerte (déTECTEURS, radioprotection)
- biologique +++

Dosimétrie

Dépôt d'énergie dans
la matière

Radiobiologie

Effets biologiques

Chapitre I: Physique générale des rayonnements

- Classification des rayonnements
 - Rayonnements radioactifs
 - Rayonnement X
- Interaction des particules chargées avec la matière
- Interaction des particules neutres avec la matière
- Interaction des photons avec la matière

Chapitre II: Dosimétrie fondamentale

- Dosimétrie des photons
- Dosimétrie des électrons
- Dosimétrie des neutrons

Chapitre III: Radiobiologie

- Grandeurs dosimétriques
- Effets déterministes
- Effets stochastiques
- Contexte de la radioprotection

Bases physiques des rayonnements

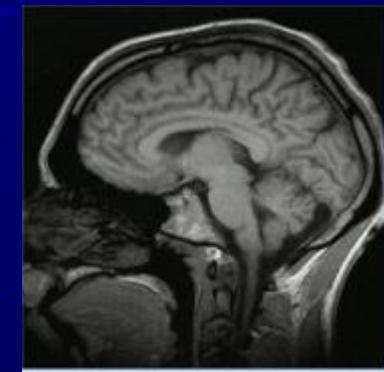
Qu'est ce qu'un rayonnement

- Mode de propagation de l'énergie dans l'espace, sous forme d'onde
- L'unité est l'électron volt (eV)

$$1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

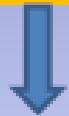
Utilisation des rayonnements en médecine

- Traitement du cancer au moyen de **rayonnements ionisants**
- Imagerie diagnostique au moyen des **rayons X**
- Imagerie par **ultrasons**
- Imagerie par **résonance magnétique nucléaire**
- Imagerie diagnostique au moyen de **radio-isotopes**
- (médecine nucléaire)



Classification des rayonnements

Selon la nature du rayonnement:



Rayonnements **électromagnétiques**/Rayonnements **particulaires**

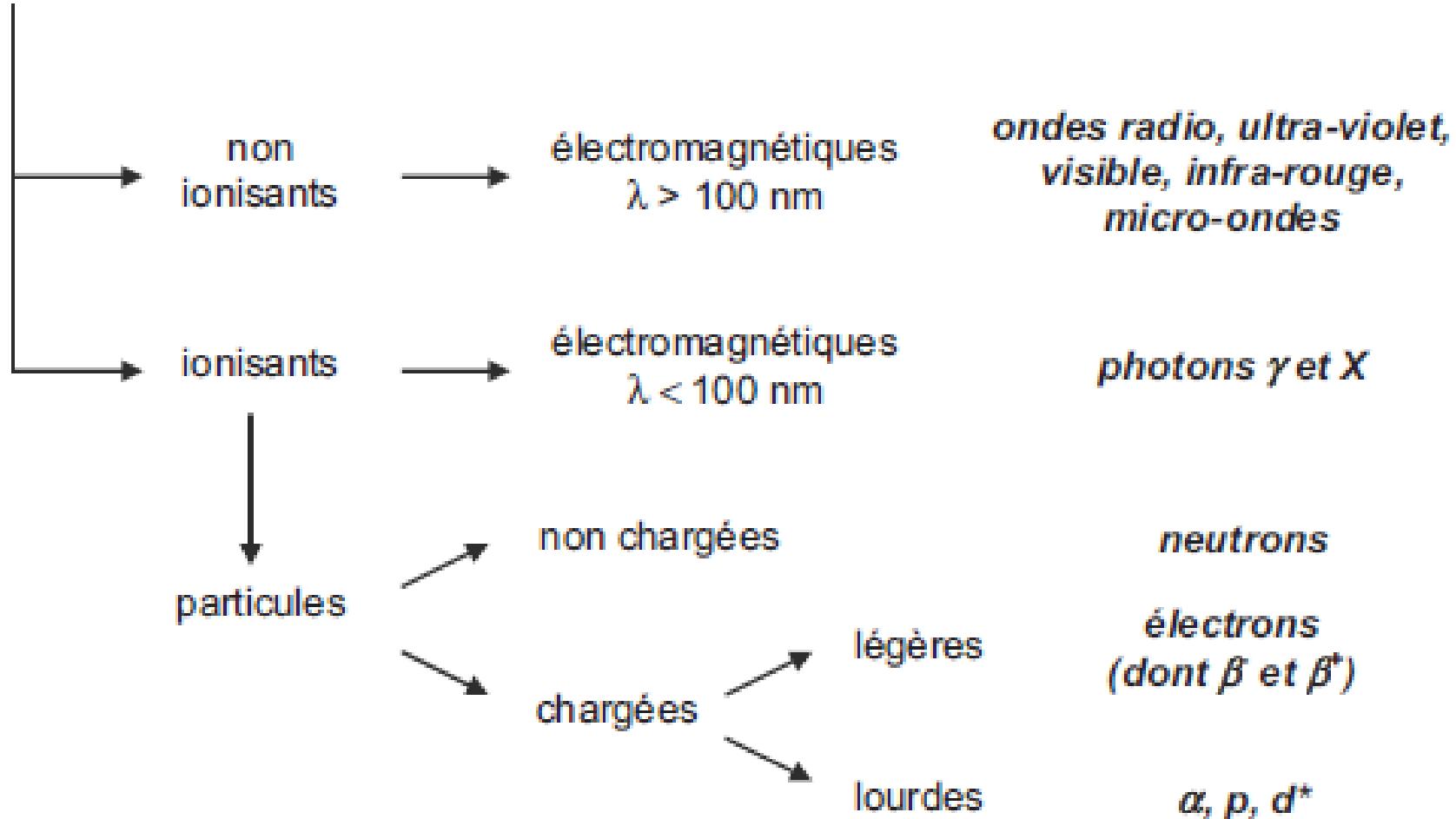
Selon les effets du rayonnement sur la matière:



Rayonnements **ionisants**/Rayonnements **non-ionisants**

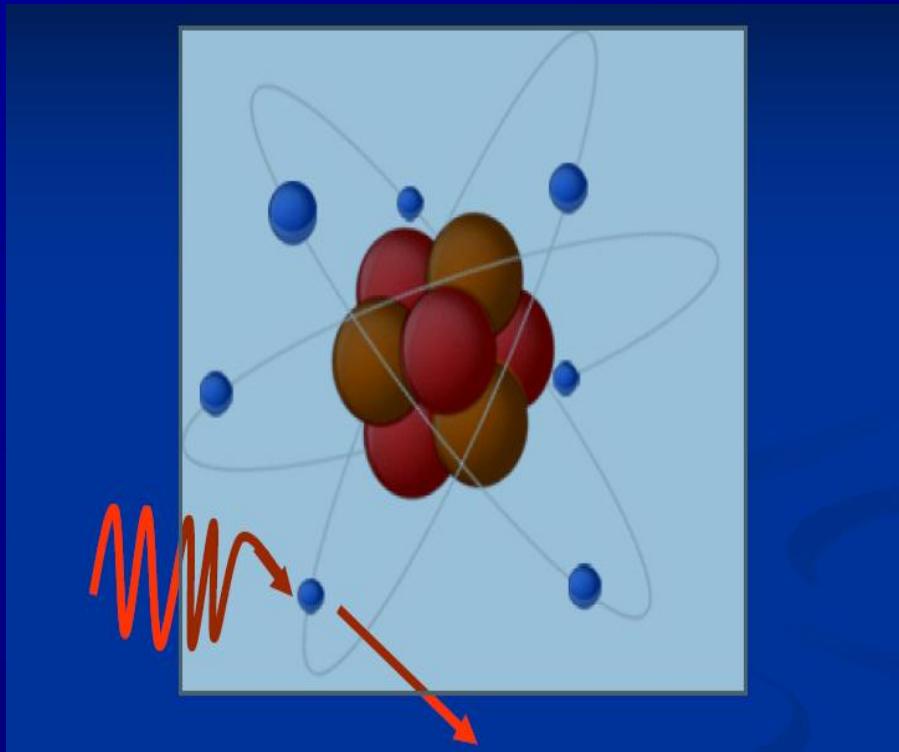
Classification des rayonnements

Rayonnement



* $\alpha : {}^4\text{He}^{++}$, p : proton (${}^1\text{H}^+$), d : deuton (${}^2\text{H}^+$)

Qu'est ce qu'un rayonnement ionisant?



Un rayonnement est dit ionisant s'il possède suffisamment d'énergie pour arracher un électron à un atome. Celui-ci n'est plus électriquement neutre, il est appelé « ion »

Qu'est ce qu'un Rayonnement ionisant

- Le phénomène d'ionisation est accompagné de la formation d'une paire d'ions:

-ion positif constitué par l'atome privé d'un électron
-l'ion négatif est formé par l'électron éjecté

- Conditions d'ionisation:

$\left. \begin{array}{l} - E_c \text{ (particules)} \\ - h\nu \text{ (photons)} \end{array} \right\} > E_i \text{ des électrons}$
En général, cette énergie $\approx 10\text{eV}$

- Ionisation:** électron arraché de sa couche: $E_c e = E_i - E_l$
- Excitation:** électron déplacé vers la couche périphérique (E plus faible). L'atome devient instable: état excité.

2 types de raisons de s'intéresser aux rayonnements ionisants

- Utilisation des rayonnements ionisants en médecine:
 - Diagnostique
 - Thérapeutique
- Conséquences des irradiations sur la santé

Quelles conséquences pour les patients?
Notion de bénéfice/risque

En médecine.....

Connaitre les conséquences et justifier la
prescription d'un examen irradiant est une
obligation légale pour tout médecin...

Rayonnement électromagnétique

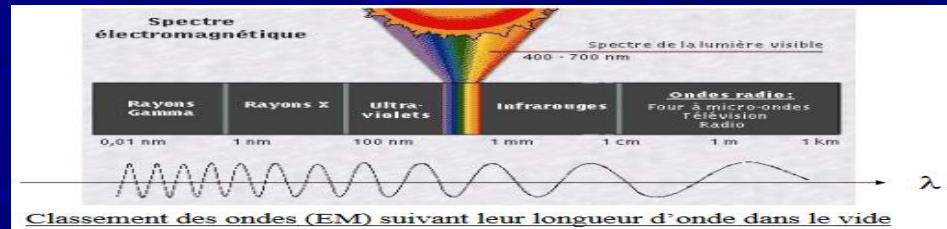
Le rayonnement: onde ou corpuscule?

Tout dépend de ce que l'on voit

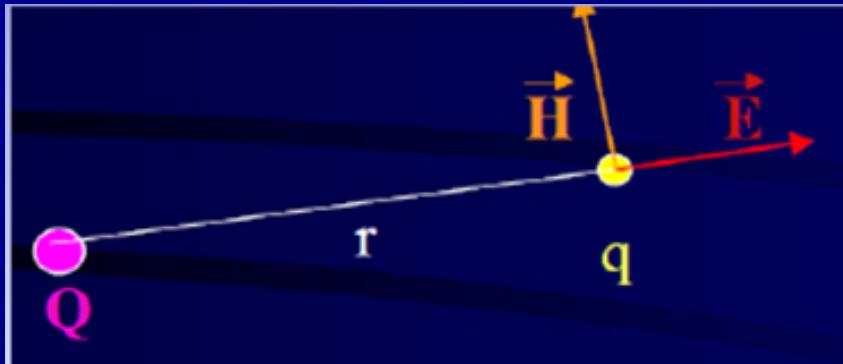


Jeune femme ou vieille sorcière ?

Rayonnement électromagnétique



Rayonnement électromagnétique:



Oscillation de la charge Q



Variation de E

Déplacement de la charge Q



Production d'un courant I

Création d'un champ magnétique H(Biot-Savart)

E perpendiculaire à H

Rayonnement électromagnétique

Description ondulatoire

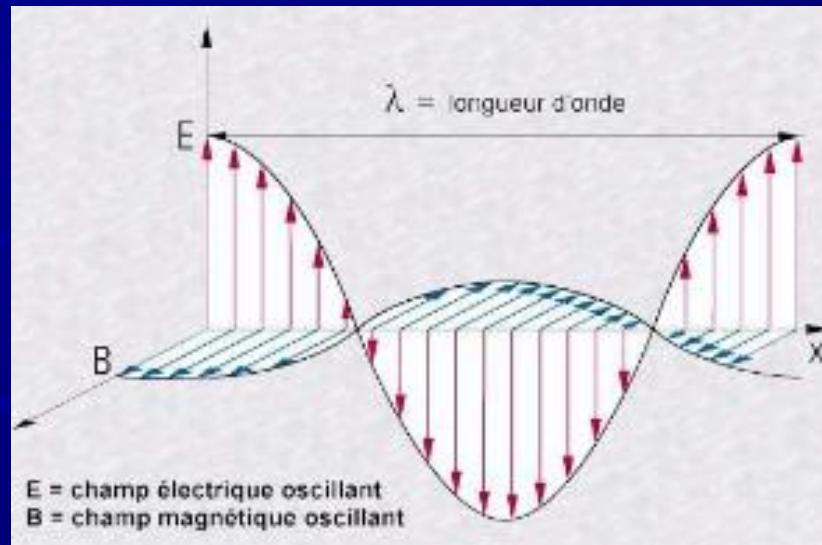
⇒ Equations de Maxwell

∀ x et t,

$$\mathbf{E}(x,t) \perp \mathbf{B}(x,t)$$

$$\mathbf{E}(x,t) = c \cdot \mathbf{B}(x,t),$$

Avec c, vitesse de la lumière dans le vide
(3.10^8 m/s)



- ✓ Les radiations électromagnétiques sont émises par les vibrations des électrons atomiques composants celle-ci
- ✓ Association d'un champ électrique sinusoïdal E et d'un champ magnétique B, de même période, qui lui est en tout point perpendiculaire

Rayonnement électromagnétique:

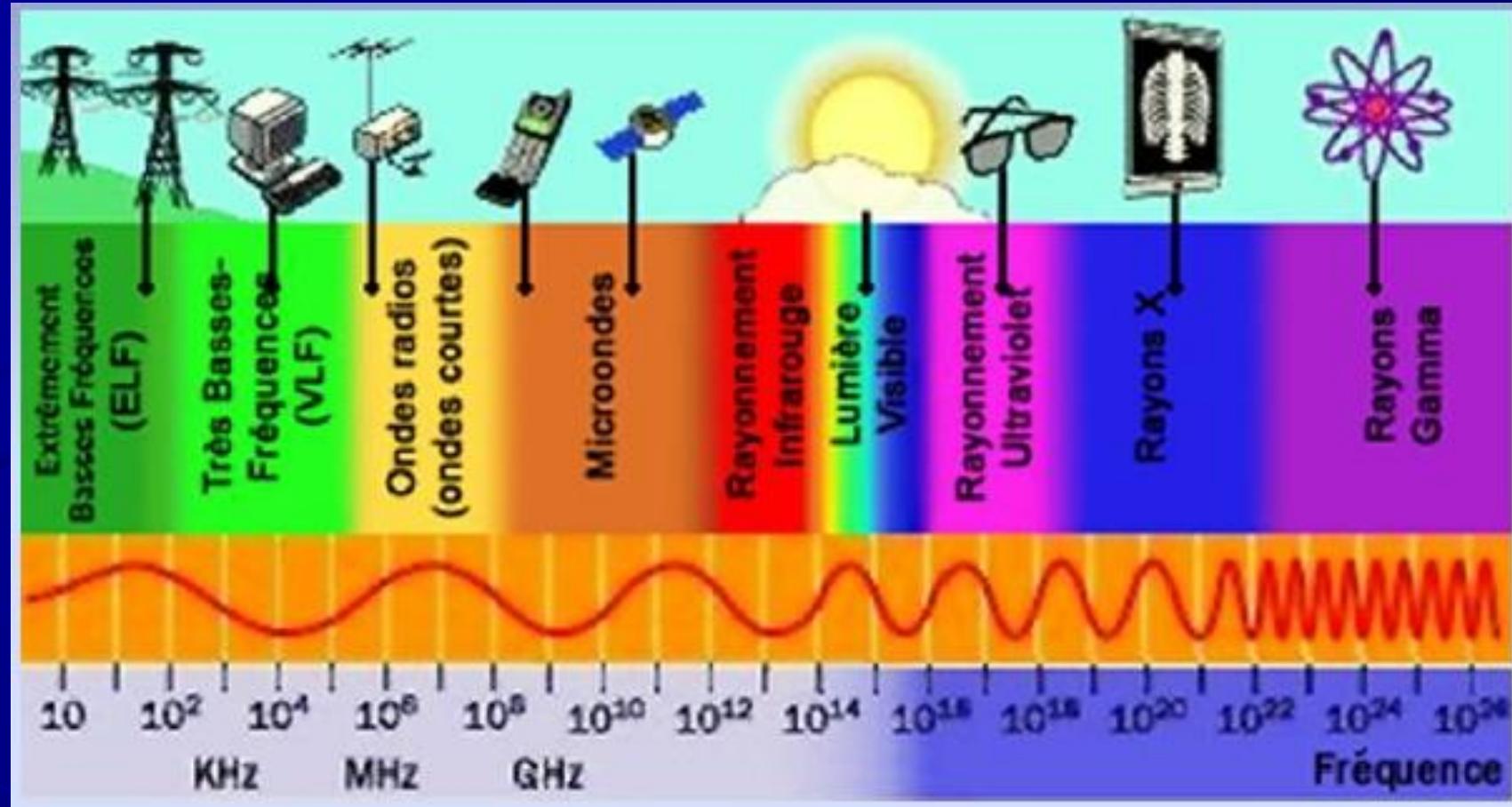
- Vitesse de propagation dans le vide constante

$$C = 2,98 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

- Rayonnement monochromatique défini par:

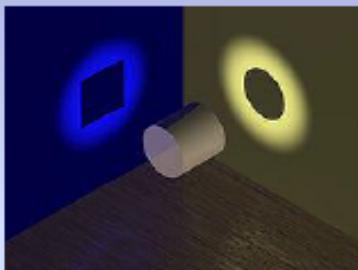
- Sa fréquence : $\nu = 1/T$
- Longueur d'onde dans le vide : $\lambda = CT = C/\nu$
- Nombre d'onde par unité de longueur : $\sigma = 1/\lambda$
- Sa pulsation : $\omega = 2\pi/T$

Spectre électromagnétique



Dualité onde corpuscule

Photon se comporte à la fois comme une **onde**
et un **corpuscule**



De Broglie suggère de généraliser
cette dualité à la matière

Métaphore du
cylindre : objet ayant
à la fois les
propriétés d'un
 cercle et d'un
 rectangle

$$\text{Photon: } p = \frac{E}{c} = \frac{\left(\frac{hc}{\lambda}\right)}{c} = \frac{h}{\lambda}$$

$$\text{Matière: } p = mv = \frac{h}{\lambda}$$

⇒ A toute onde, on peut associer un corpuscule de masse m et réciproquement (vitesse v)

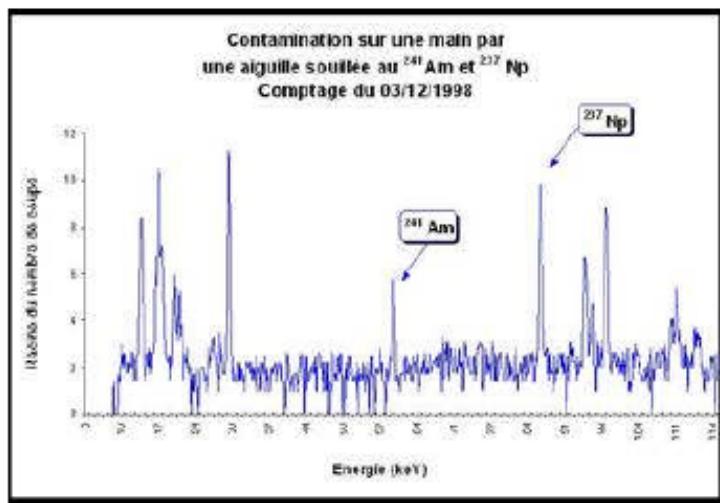
Longueur d'onde de de Broglie

$$\text{alors } \lambda = h / (m.v)$$

Les émissions gamma et X

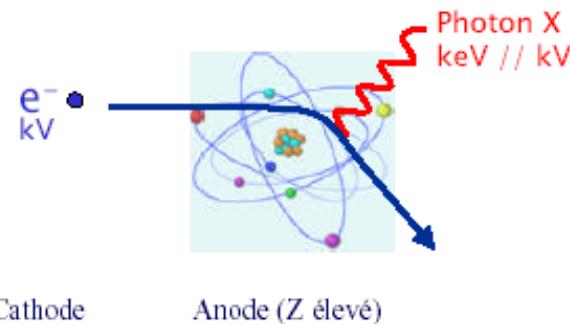
- Rayon gamma

- Origine nucléaire
- Spectre mono énergétique et caractéristique de la réaction nucléaire



- Rayon X

- Origine électronique
- Déviation et freinage dans le champ du noyau
 - Effet Bremsstrahlung
 - Poly énergétique
 - +/− fluorescence mono énergétique
- Spectre mixte E_{moy}



Les émissions gamma et X

- Ce sont des rayonnements électromagnétiques,
- Ils n'ont ni **masse**, ni **charge électrique**,
- L'émission gamma résulte souvent d'une **désexcitation** d'un élément issu d'une **désintégration** α ou β
- L'émission X résulte :
 - Réarrangement du cortège électronique,
 - Rayonnement de freinage,
 - Générateurs de rayons X.

Rayonnements particulaires

Rayonnements particulaires

The diagram illustrates three types of radioactive decay:

- Emission α :** A large nucleus emits an alpha particle (α), which is shown as a cluster of four nucleons (two protons and two neutrons). The nucleus is labeled "noyau d'hélium".
- Emission β^- :** A large nucleus emits a beta minus particle (e^-), which is shown as a single electron.
- Emission β^+ :** A large nucleus emits a beta plus particle (e^+), which is shown as a positron.

Particule alpha

À interaction obligatoire avec la matière

Particule bêta

Rayonnements particulaires

- Ces particules forment un faisceau de particules caractérisées par:

✓ une charge

✓ une masse au repos m_0

✓ une vitesse v

✓ une masse cinétique:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v^2 / c^2)}$$

Correction de la
masse selon la
relativité d'Einstein

✓ une impulsion (ou quantité de
mouvement):

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

✓ une énergie totale :

$$E = mc^2$$

Classement des rayonnements particulaires

Selon la masse

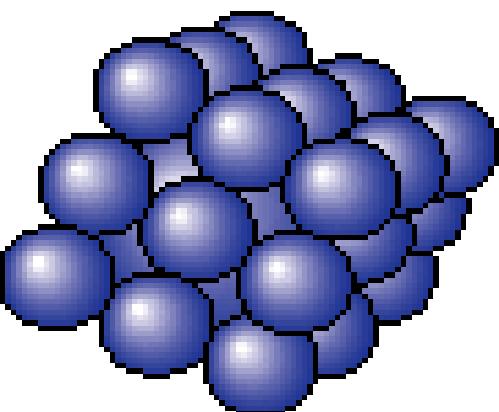
1. **Particules chargées légères (électrons) :** électrons, rayonnements β^- et β^+ , électrons de conversion interne, électrons Auger ...Toutes ces particules ne diffèrent que de par leur mode de production et sont de nature fondamentalement identique
2. **particules chargées lourdes :** protons, particules α , ions lourds, résidus de fission nucléaire...Le comportement dans la matière de ces entités est soumis aux mêmes lois que les particules chargées légères, cependant l'effet de la masse intervient

Selon la charge

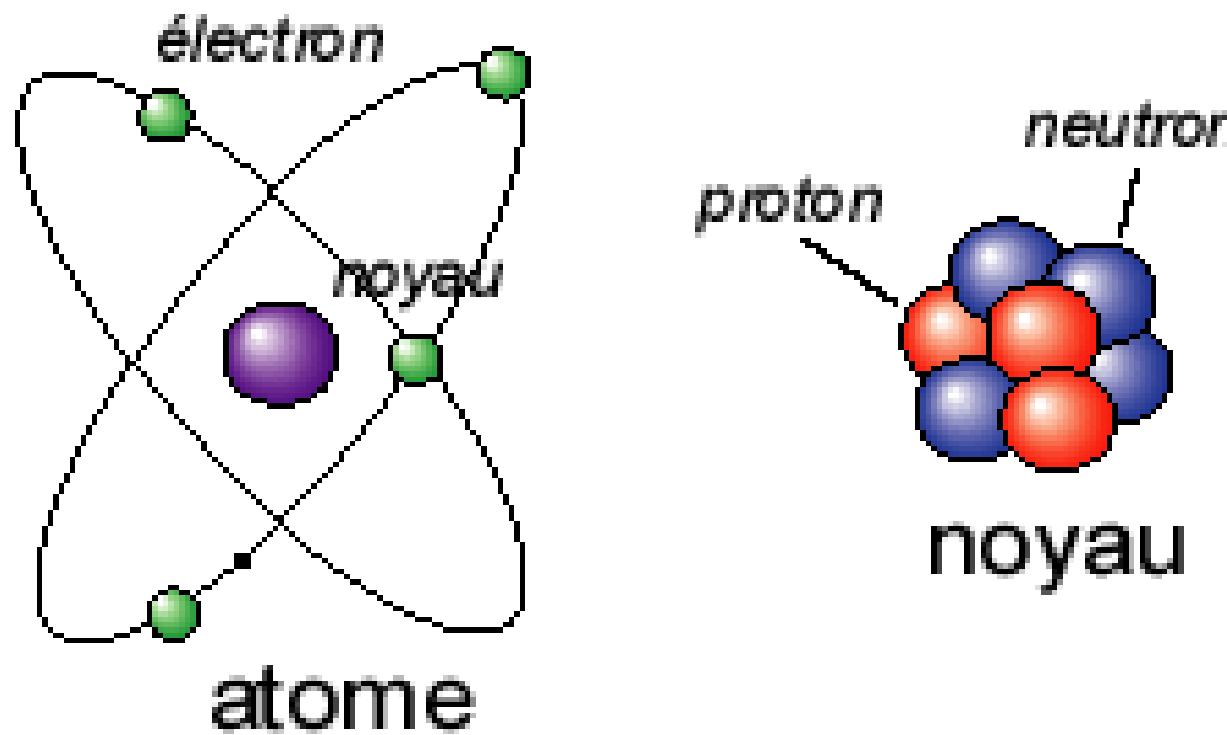
1. **chargés (électrons et positons)**, qui agissent avec les électrons de la matière cible
2. **neutres (neutrons)**, qui agissent sur les noyaux de la matière cible

Rayonnements radioactifs

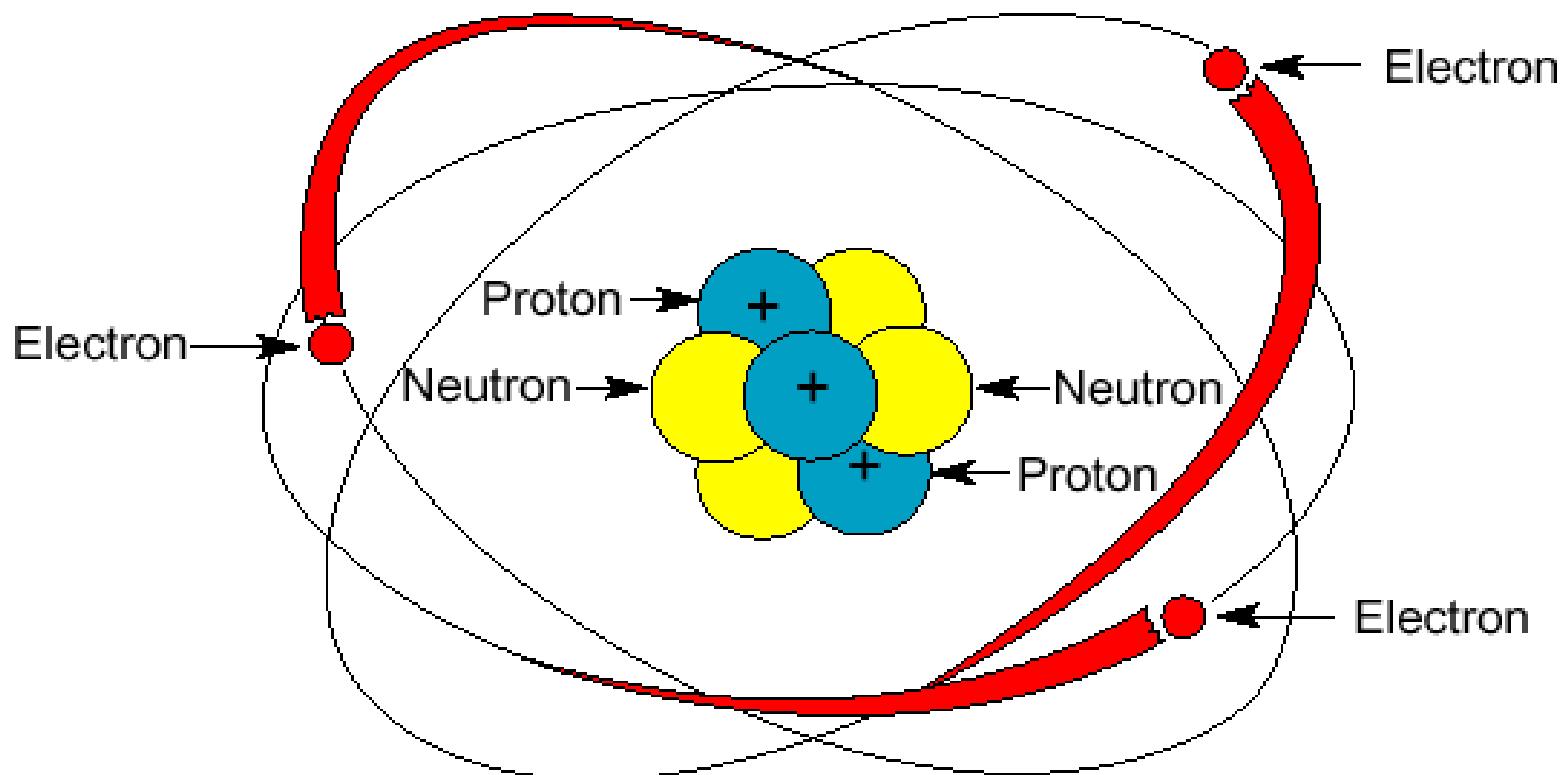
LA MATIÈRE



matière

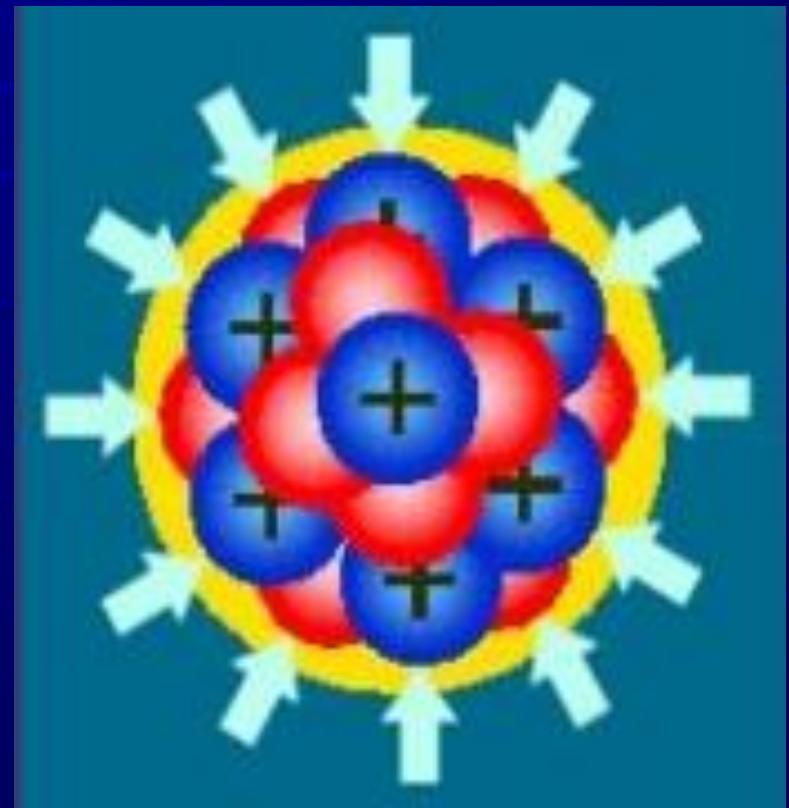


Le Noyau De l'Atome



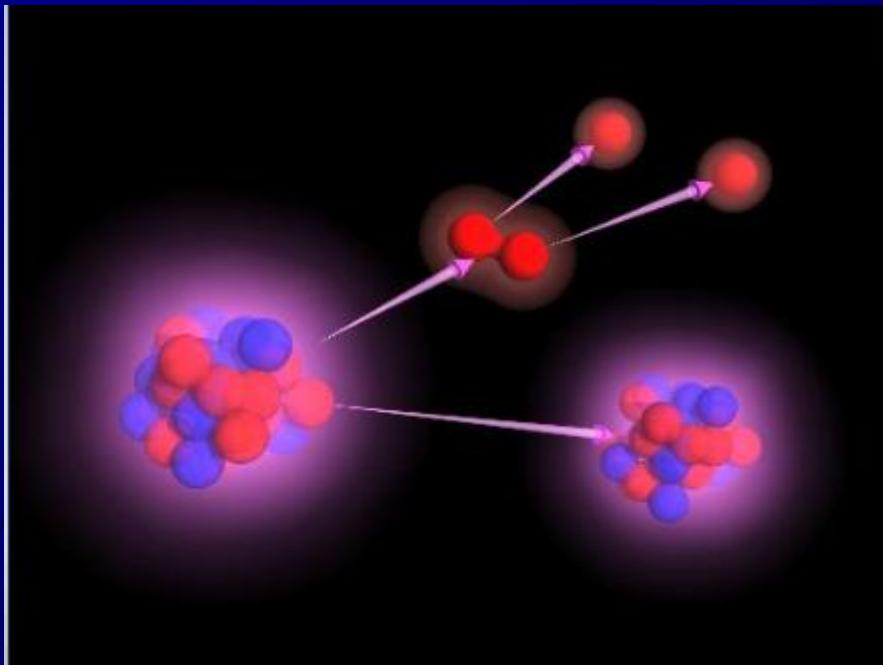
La Cohésion Du Noyau

Les protons et les neutrons sont liés les uns aux autres par des forces nucléaires intenses pour les maintenir ensembles, on dit alors que le noyau est stable.



La Radioactivité

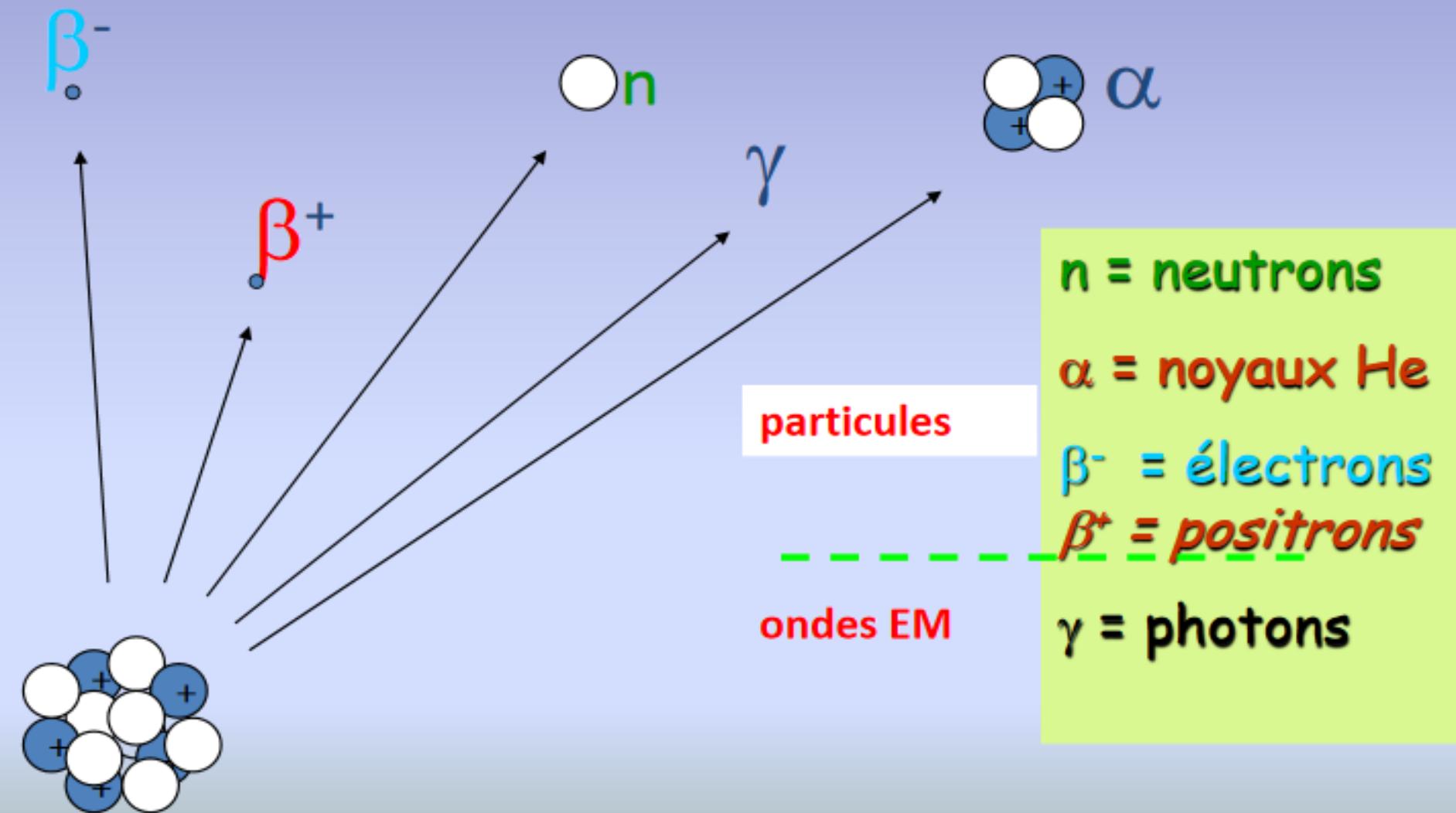
La radioactivité n'a pas été inventée par l'homme. C'est un phénomène naturel qui existe depuis l'origine de l'univers et qui imprègne notre environnement quotidien



Transformations radioactives

- Le noyau tend à évoluer vers un état stable, en émettant de façon spontanée un rayonnement: **transformation radioactive**
- Cette transformation est de 2 types:
 - 1- **Excès de nucléons**: aboutit à **une désintégration**. On obtient un élément chimique différent de l'élément de départ
 - 2- **Excès d'énergie**: aboutit à une désexcitation sans changement de Z

Rayonnements émis



Rayonnements émis



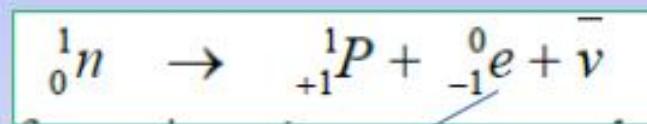
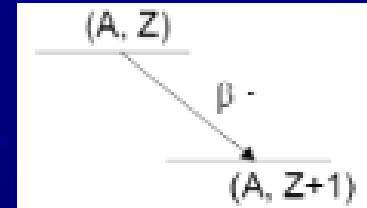
arrêt par une
feuille de papier

arrêt par quelques
mm d'aluminium ou
de plexiglas

atténuation par
du béton (environ 1 m)
ou du plomb (qq. cm)

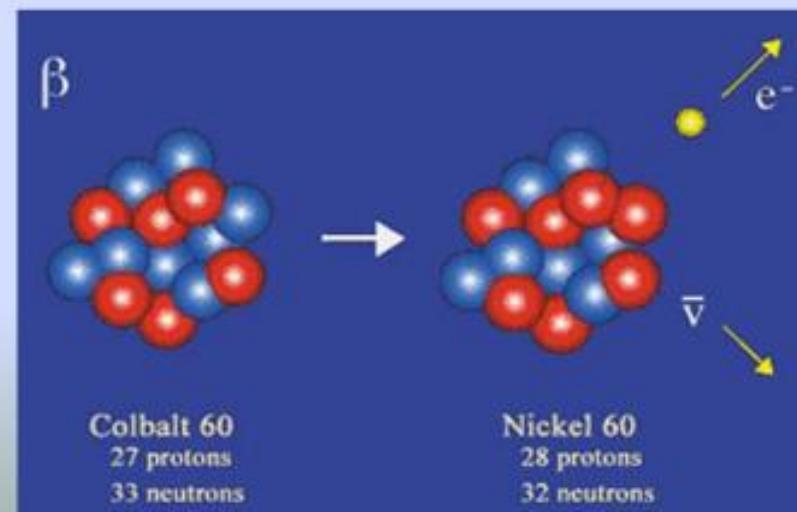
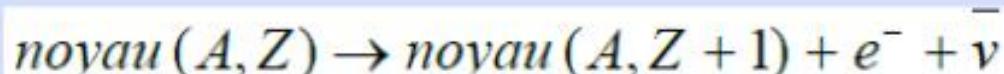
Emission β^-

Concerne les noyaux situés dans la zone A du diagramme N-Z, qui ont un excès de neutrons.

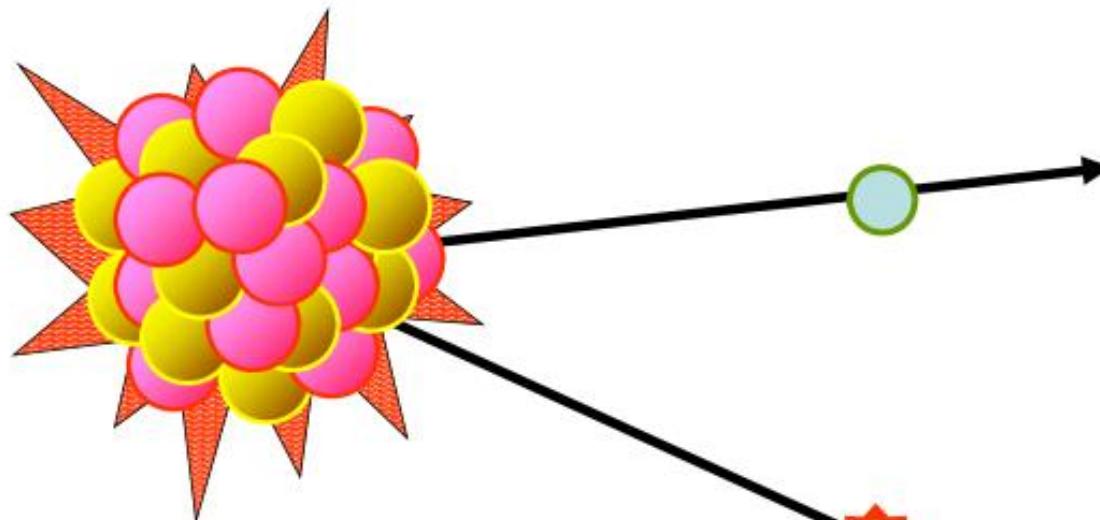
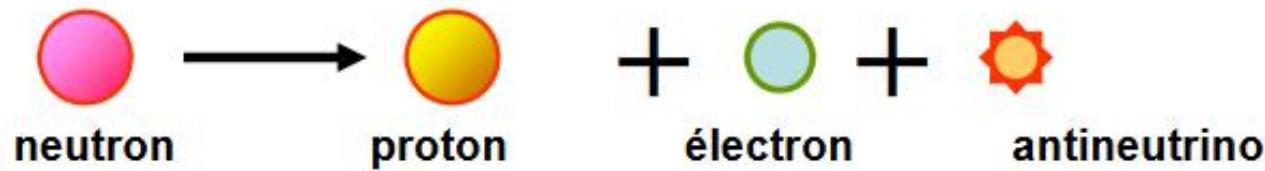


Rayonnement (β^-)

Antineutrino (particule neutre de masse très faible)



Emission β^-



Excès de neutron

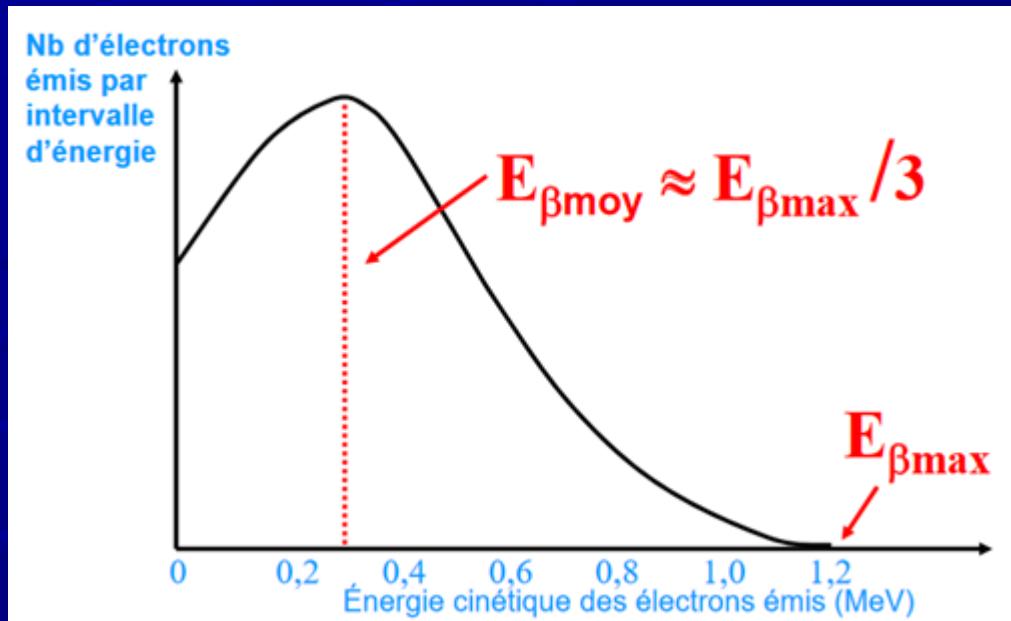
→ Désintégration β^-

Excès de neutron(s):

Emission β^-

- Un neutron se transforme en proton
- Il y a émission d' un électron
- Désintégration β^-

Emission β^-



Excès de protons (2 possibilités):

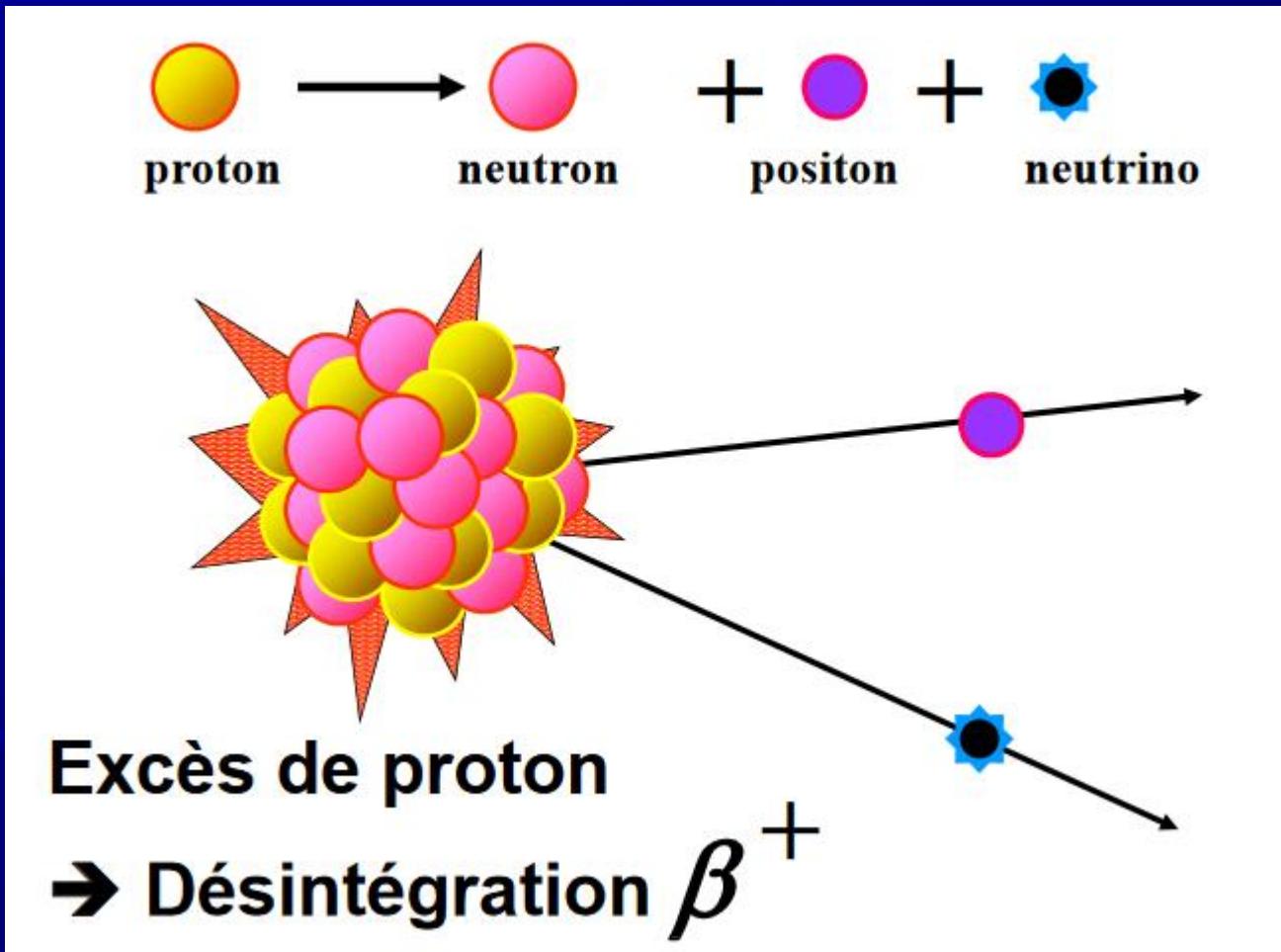
- Un proton « se transforme » en neutron
- Il y a émission d'un positon et (d'un neutrino)

→ **Désintégration β^+**

- Un proton se combine avec un électron pour donner un neutron
- Pas de particule chargée émise (mais émission d'un neutrino)

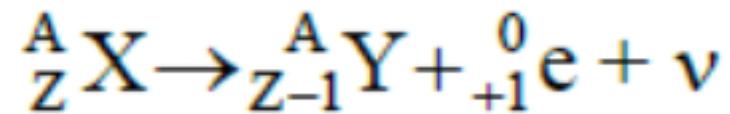
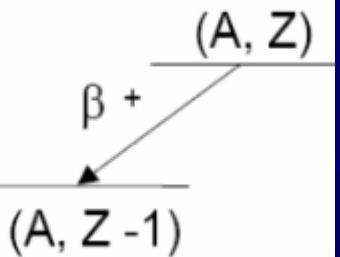
→ **Capture électronique**

Emission β^+ (positron)

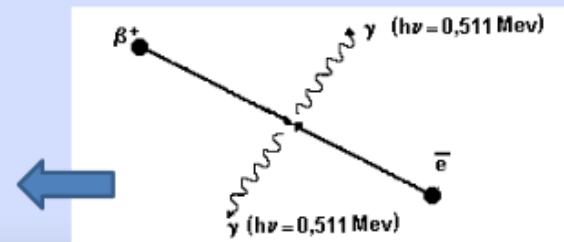


Emission β^+ (positron)

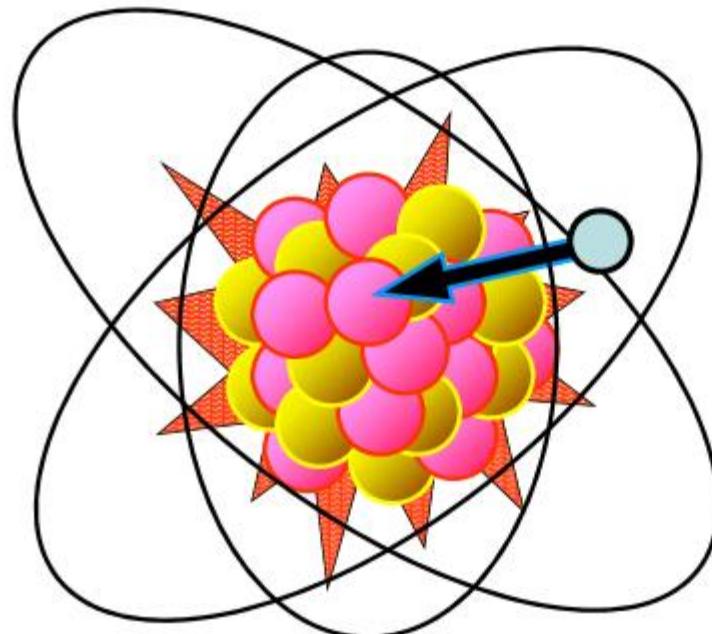
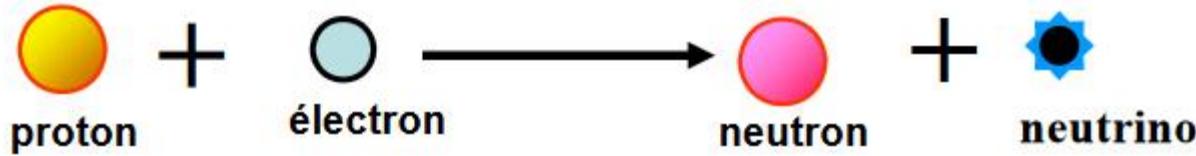
Concerne les noyaux situés dans la zone B, qui ont un excès de protons



β^+ , s'annihile en fin de son parcours avec un électron.

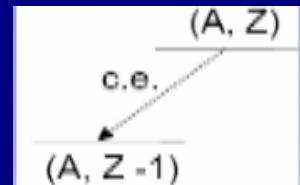


Capture électronique



Excès de proton → Capture électronique

Capture électronique

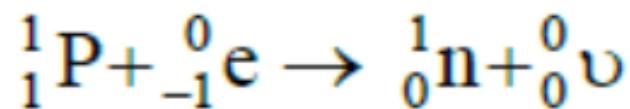


CE

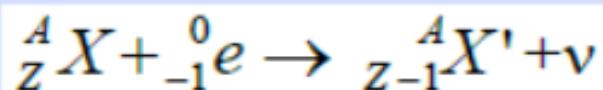
Capture d'un électron
par le noyau



P se transforme alors en un n

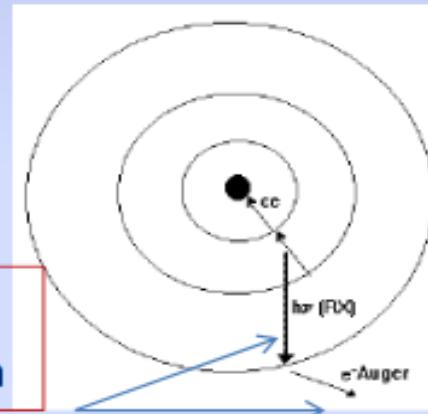


Equation de la désintégration :



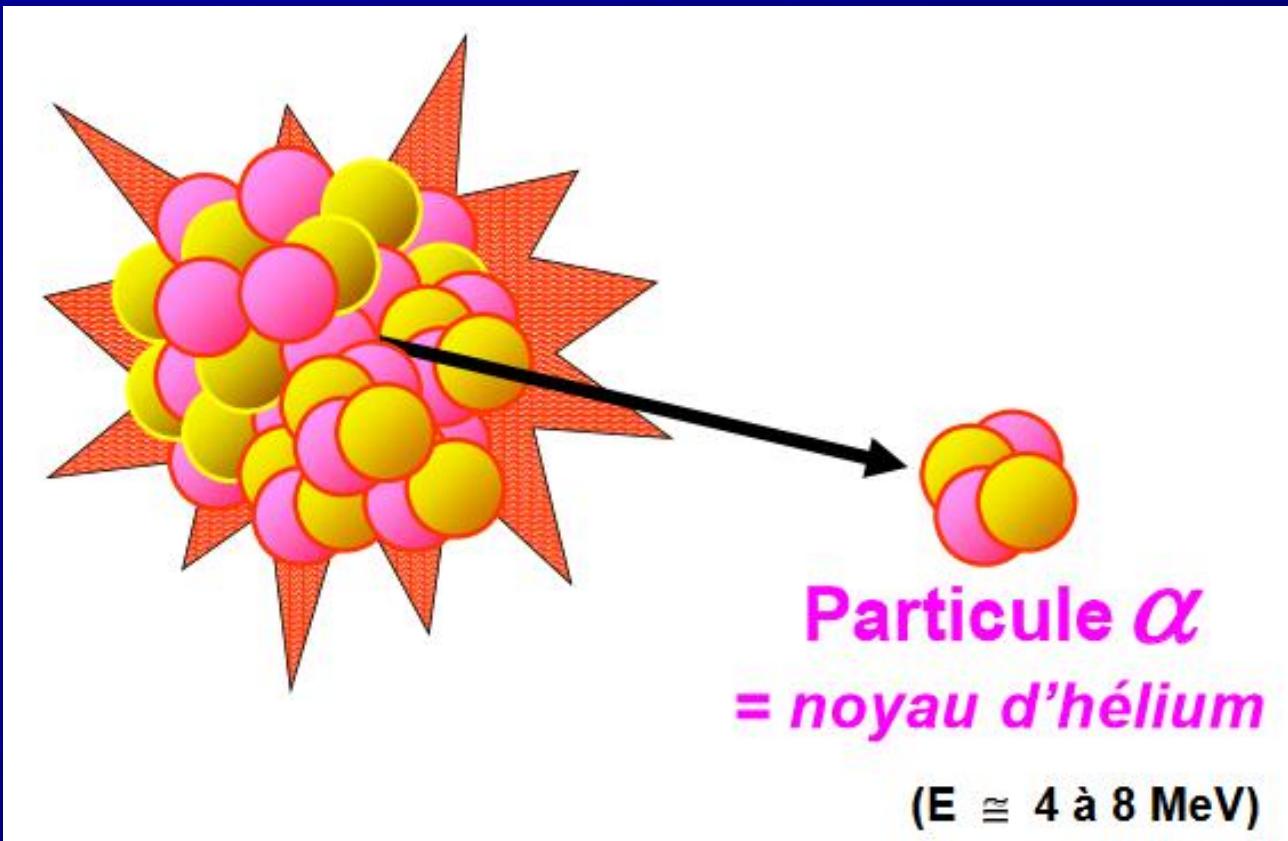
Transformation ne peut
s'effectuer que si

CE s'accompagne du
réarrangement électron



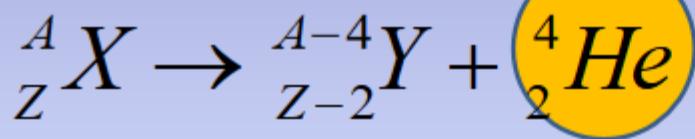
$$Q_{CE} = ([M(A, Z) + m_0({}_{-1}^0 e)]c^2 - M(A, Z-1)c^2) > E_{\text{Liaison de l'é capturé}}$$

Radioactivité α



Radioactivité α

Équation générale de la désintégration α

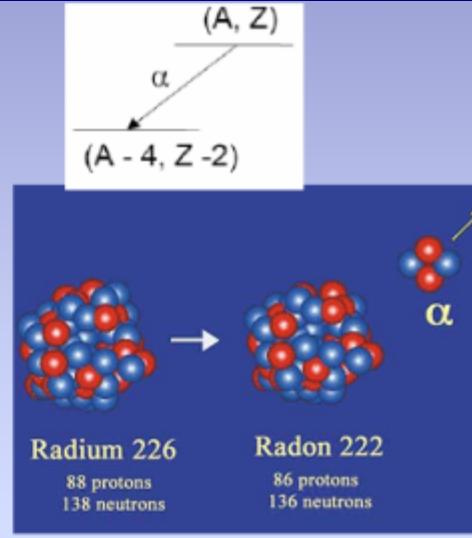


La plupart des désintégrations α se produisent avec des nuclides $A > 200$

Ils possèdent une grande énergie (MeV)

$$Q = (m_X - m_Y - m_{He})c^2$$

Énergie libérée au cours de la désintégration



Noyaux trop lourds dans la zone C

Après la transformation radioactive...

- Le noyau « fils » peut être totalement stable...
- Mais le plus souvent il est encore dans un état « excité », avec un excédent d'énergie

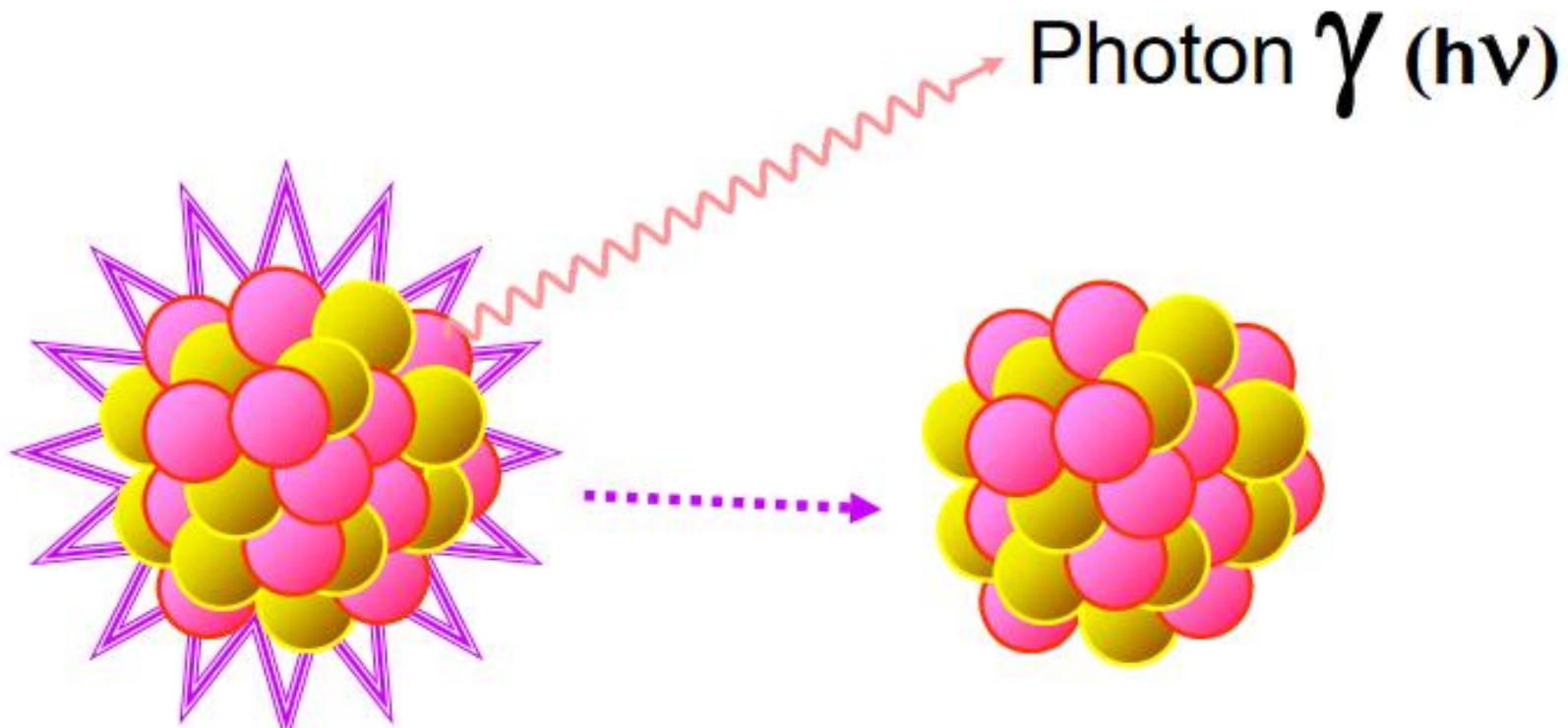
Désintégration radioactive

Phénomènes secondaires (1)

Le noyau « fils » est en général dans un état excité

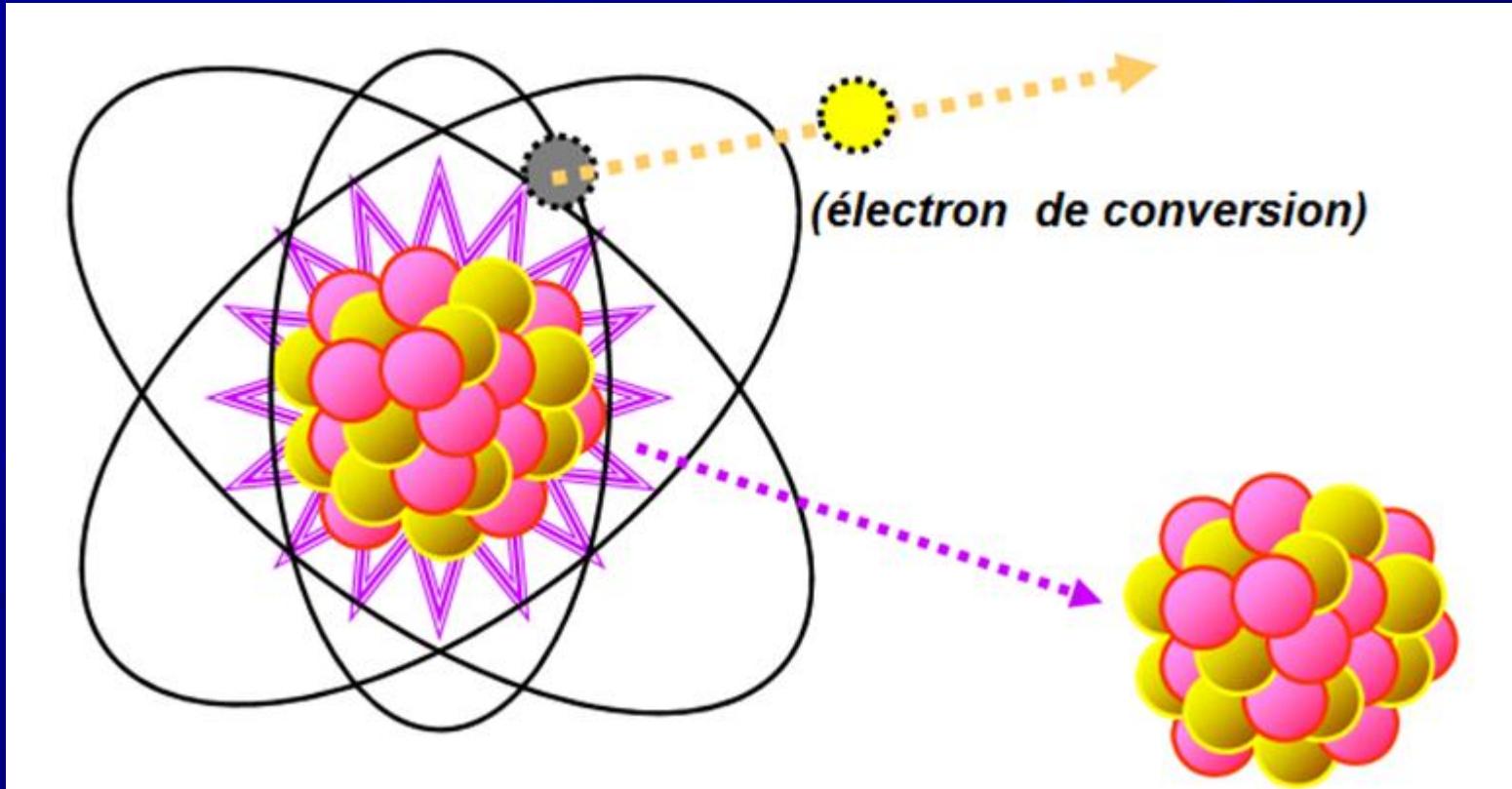
- Dans tous les cas la désexcitation se fait:
 - ✓ soit par émission d'un photon gamma (γ)
 - ✓ soit par émission d'un électron de conversion interne
- Dans le cas des émetteurs de positons
 - ✓ il y a un phénomène d'annihilation ($e^+ \longleftrightarrow e^-$) avec émission de 2 photons de 511kev

Emission gamma γ



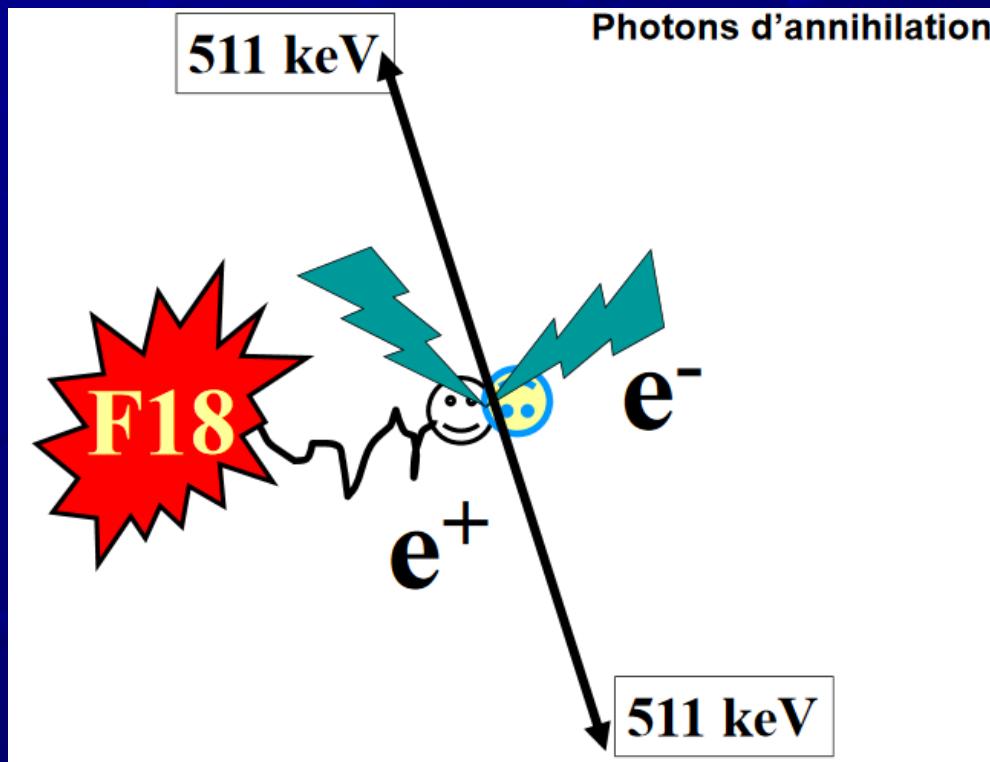
= *déexcitation du noyau*

Conversion interne



Phénomène d'annihilation

L'émission β^+ (e^+) se propage dans la matière en perdant son énergie. Au repos e^+ rencontre un e^- (matière): d'où annihilation



Désintégration radioactive phénomène secondaire (2)

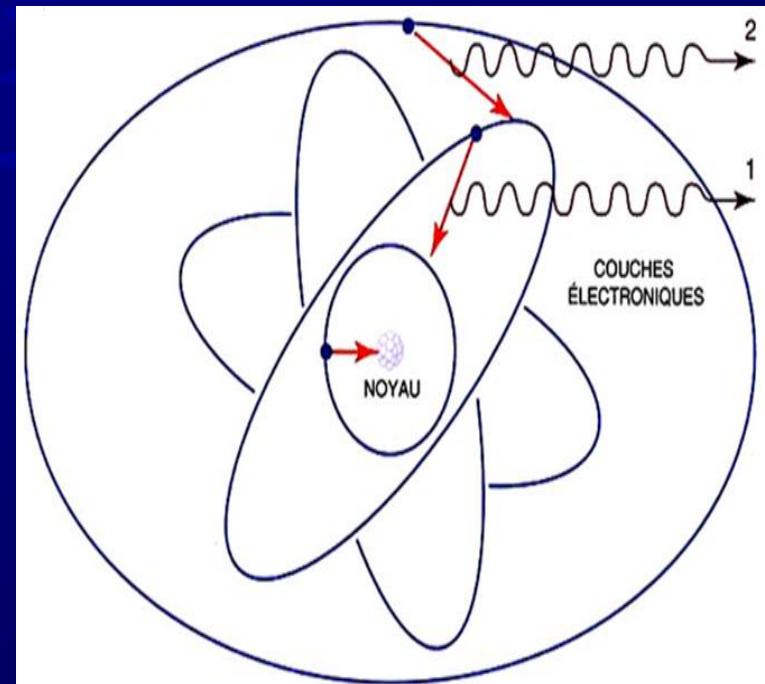
- ❖ Il peuvent se produire
 - soit l'émission d'un électron (conversion interne)
 - soit la capture d'un électron

Après désintégration radioactive, puis désexcitation du noyau, le cortège électronique de l'atome est perturbé

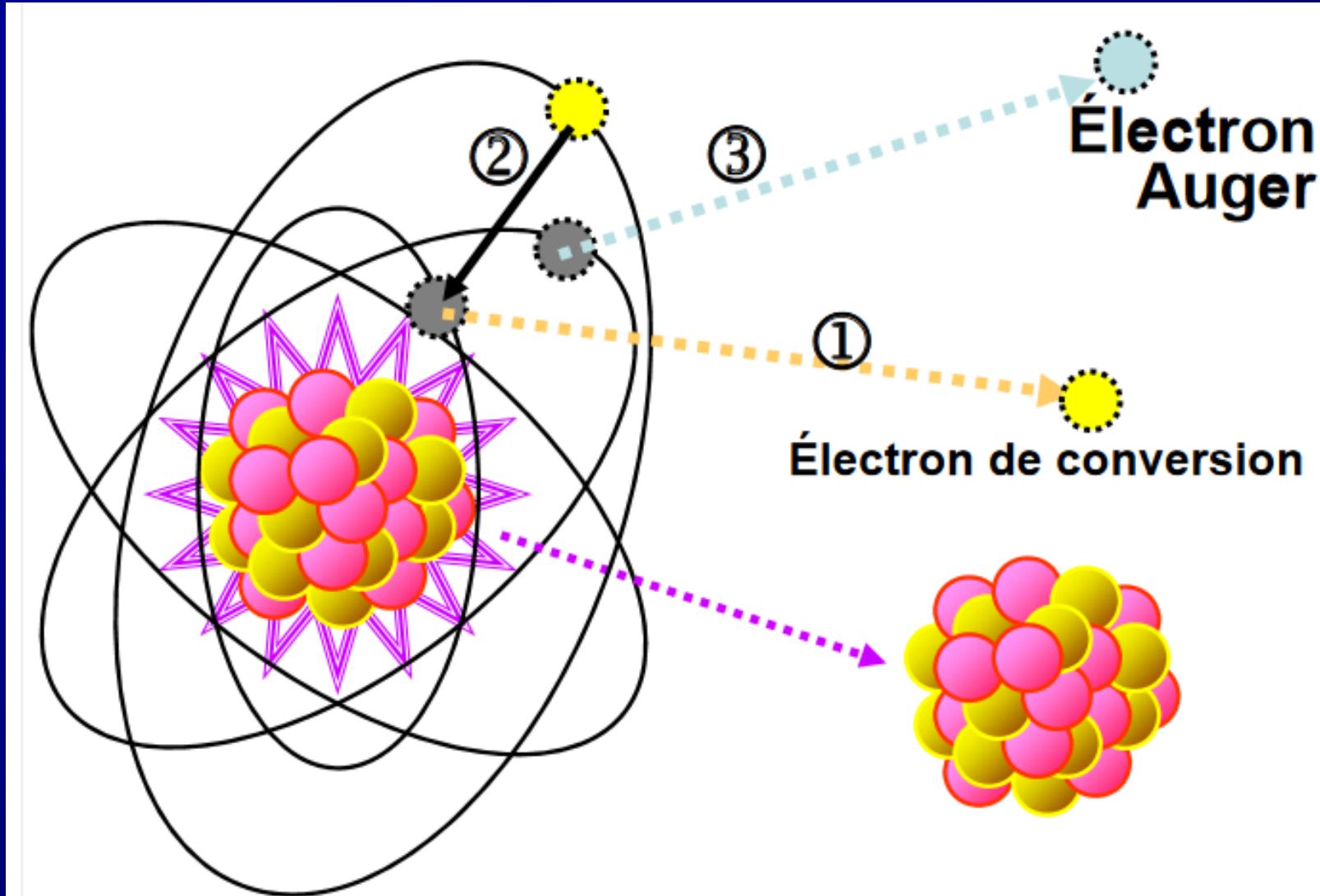
- ❖ Dans les 2 cas: création d'un « trou », d'où un réarrangement
 - soit par émission d'un rayonnement X de fluorescence
 - soit par émission d'un électron Auger

Capture électronique

- Le noyau capture un électron d'une couche interne de son cortège.
- Ce cortège se réarrange pour combler la lacune laissée par l'électron absorbé: des électrons des couches externes, représentées par des ellipses, sautent dans les trous situés au niveau inférieur.
- A chacun de ces sauts, un photon X ou ultraviolet est émis



Conversion interne



Remarque:

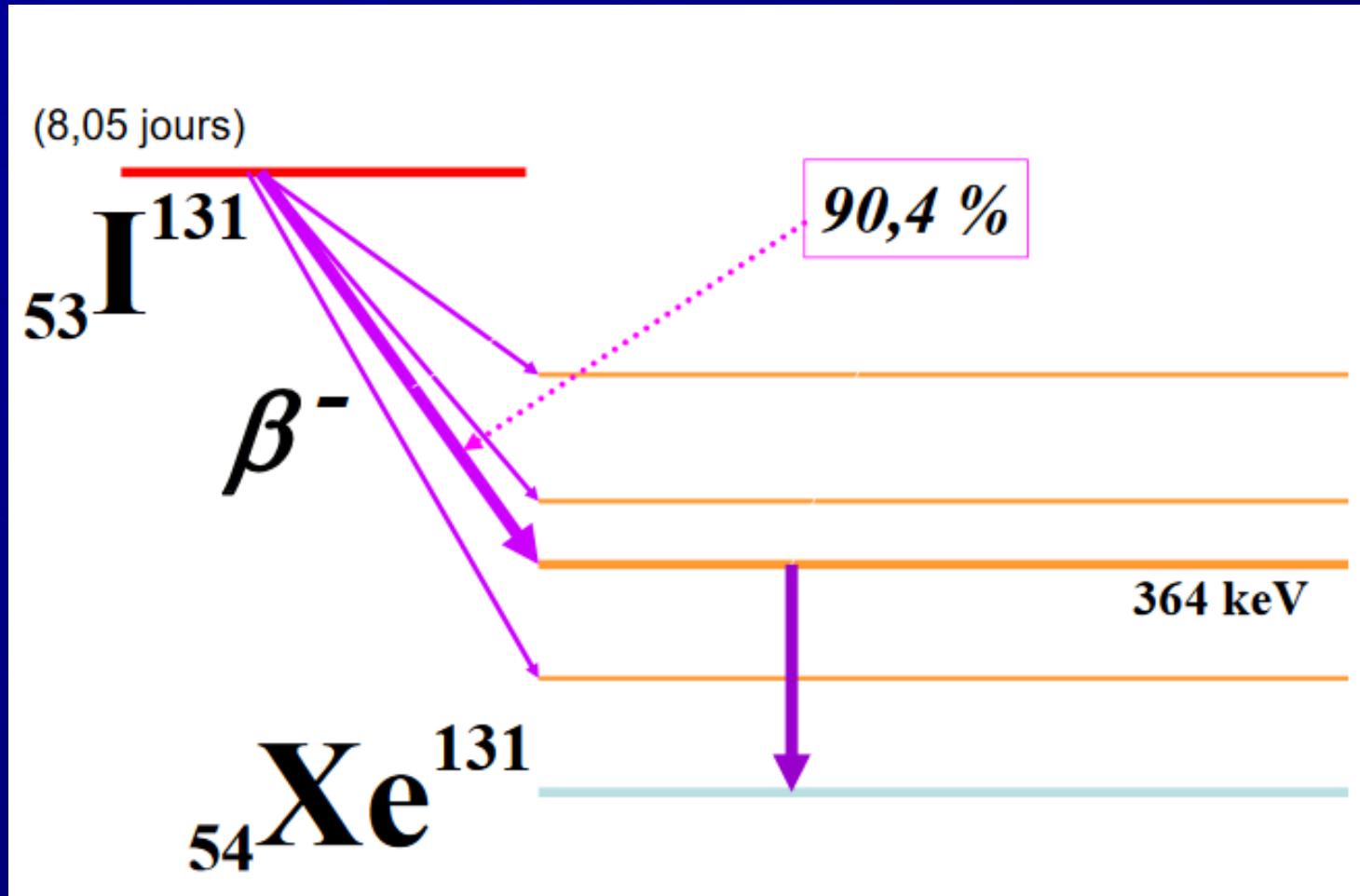
Les électrons émis par un atome radioactif sont de plusieurs types:

-Provenant du noyau: rayonnement β^-

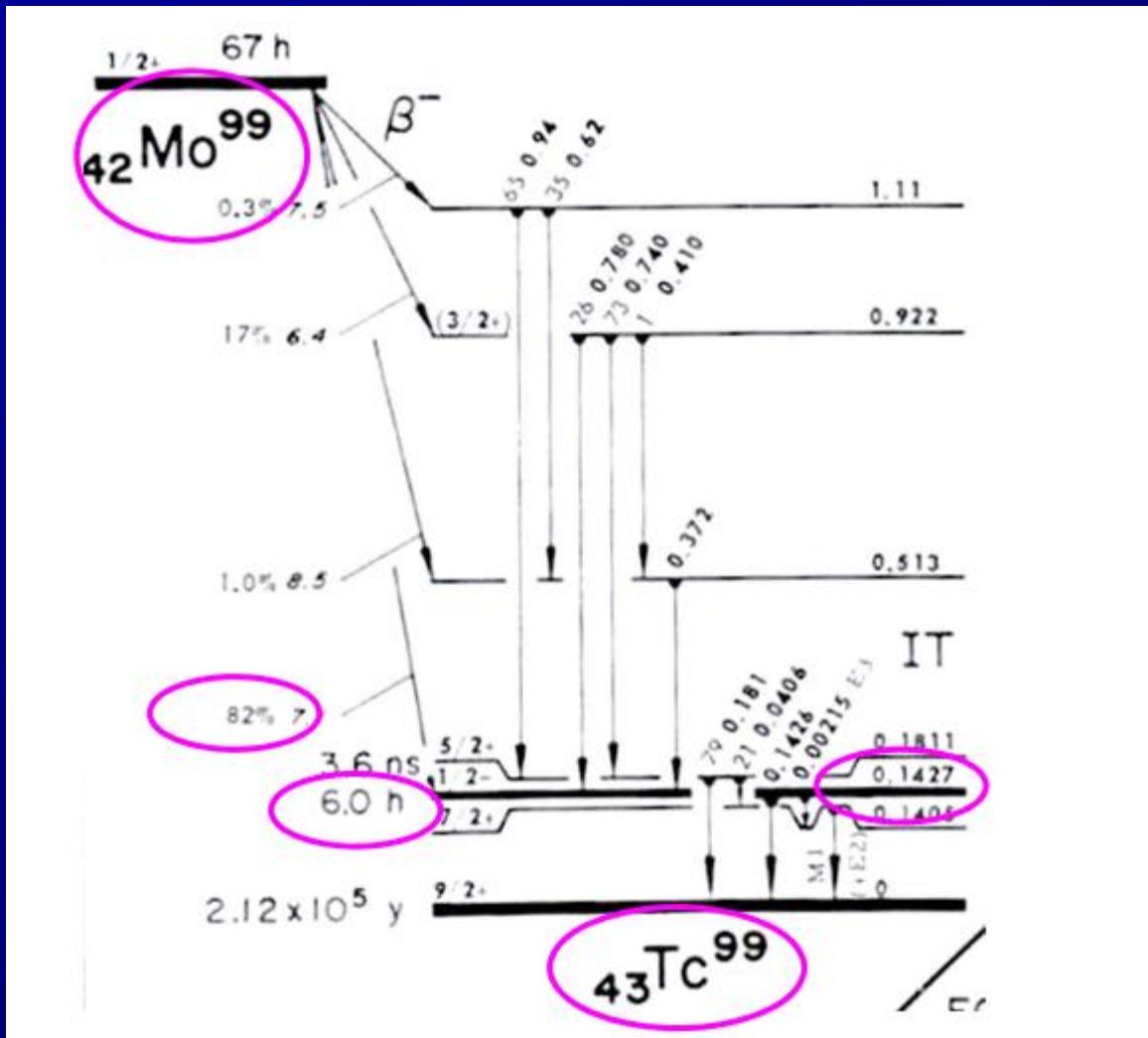
-Provenant du cortège électronique

- Electrons de conversion interne (désexcitation du noyau, alternative à l'émission d'un photon γ)
- Électron Auger (désexcitation de l'atome, alternative aux rayons X de fluorescence)

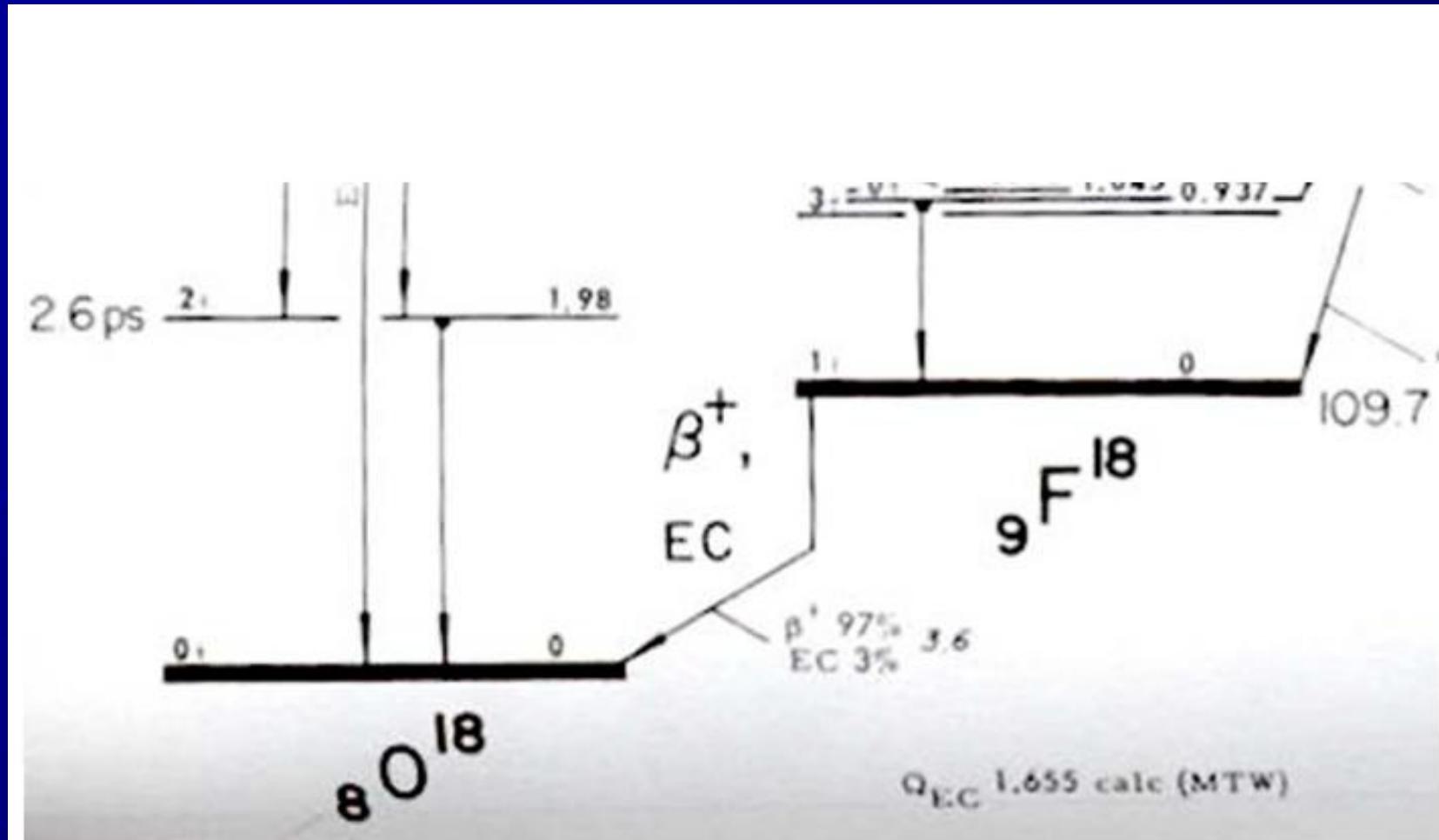
Schémas de désintégration



Schémas de désintégration



Schémas de désintégration



lois de la radioactivité:

- $N(t) = N(0) e^{-\lambda t}$: variation N en $f(t)$;
- Or ce qu'on mesure c'est *l'activité: A* d'une source*
- On mesure cette activité par le nombre de désintégrations qui s'y produit par seconde.
- $A(t) = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N(t);$
- $A(t) = \lambda N(0) e^{-\lambda t}$ soit $A(0) \rightarrow t = 0$

$$A(t) = A(0) e^{-\lambda t}$$

Rayons X

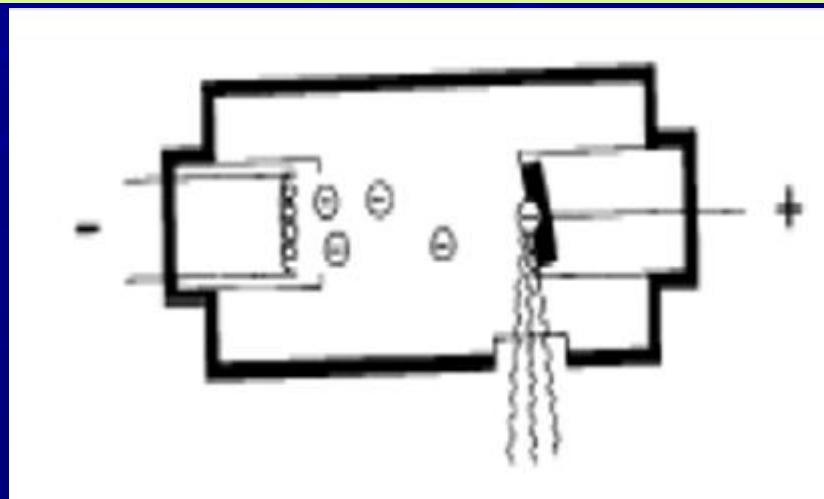
Et l'homme devient transparent



Production des rayons X

Nous avons besoin:

- Une source d'électrons
- Un haut voltage pour accélérer les électrons
- Une cible pour absorber les électrons et produire les RX



Production

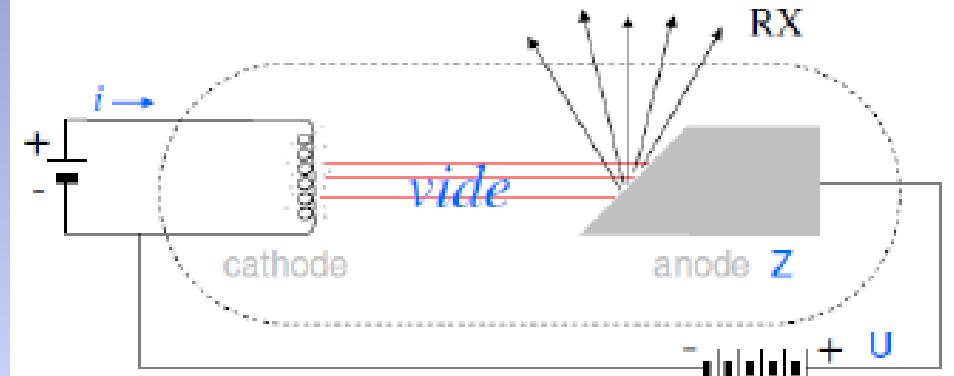
Les tubes à rayons X utilisent le bombardement électronique.

Les éléments radioactifs utilisent le rayonnement gamma émis par les noyaux de ces éléments.

Tube de Coolidge (1940)

Application médicale

Tube à vide contenant un filament chauffé par une base tension (BT) et une anode (masse métallique) portée à une forte tension positive (haute tension HT) par rapport au filament



1. Production d'électrons par un filament conducteur chauffé à rouge (effet thermoïonique)
2. Attraction des électrons vers une cible métallique portée à une très forte tension positive (anode = anticathode) par rapport au filament (cathode)
3. Décélération brutale des électrons lors de leur arrivée sur l'anode. L'énergie cinétique se transforme en chaleur (beaucoup) et rayons X (un peu)

Que peut on régler sur un tube à Rayons X

1. La **tension** (U) entre l'anode et la cathode *de façon directe en modifiant la tension d'alimentation*
2. L'**intensité** (i) qui traverse le tube entre anode et cathode *de façon indirecte en modifiant le chauffage du filament (plus la température du filament est élevée, plus l'intensité qui traverse le tube est élevée)*

Domaine de médecine

Tubes de radiodiagnostic



30 – 150 kV

Tubes de radiothérapie



Qlqs kV

Calcul de l'énergie X maximum

- ✓ L'électron est arrêté brutalement, en un seul impact. **Toute son énergie cinétique se transforme en un photon X**
- ✓ Chaque électron à une charge $e = -1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$. Sous l'action du champ électrique U , cet électron acquiert une énergie cinétique $E_c = e \cdot U$

✓ Energie du photon

$$E = hv$$

(Avec h constante de Planck 6.62×10^{-34} et v fréquence en Hz)

Energie maximum : $E_{\max} = eU$

✓ Calcul de la longueur d'onde minimum

$$\lambda_0 = c / v \quad \rightarrow \quad eU = hv = hC/\lambda \quad \lambda_0 = hC / eU$$

$$\lambda_0 = \frac{1.24}{U}$$

(λ_0 en nm et U en kV)

Longueur d'onde minimale

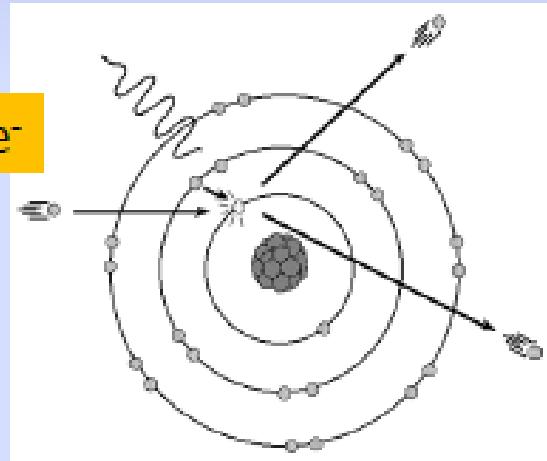
Mécanismes à l'origine des RX

Lors de la production ou l'émission des RX Deux mécanismes simultanés vont se produire

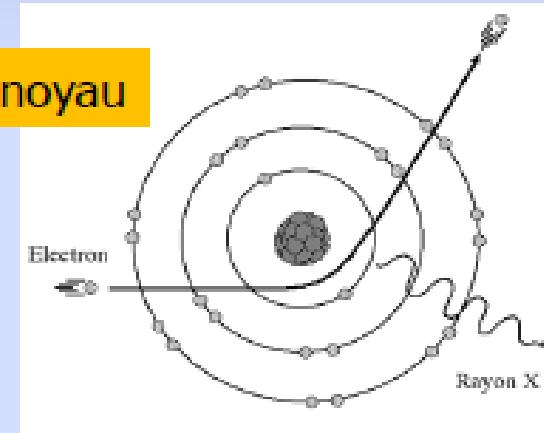
Collision (électrons des atomes de l'anode)

Freinage (noyaux des atomes de l'anode)

Interaction $e^- - e^-$



Interaction $e^- - \text{noyau}$

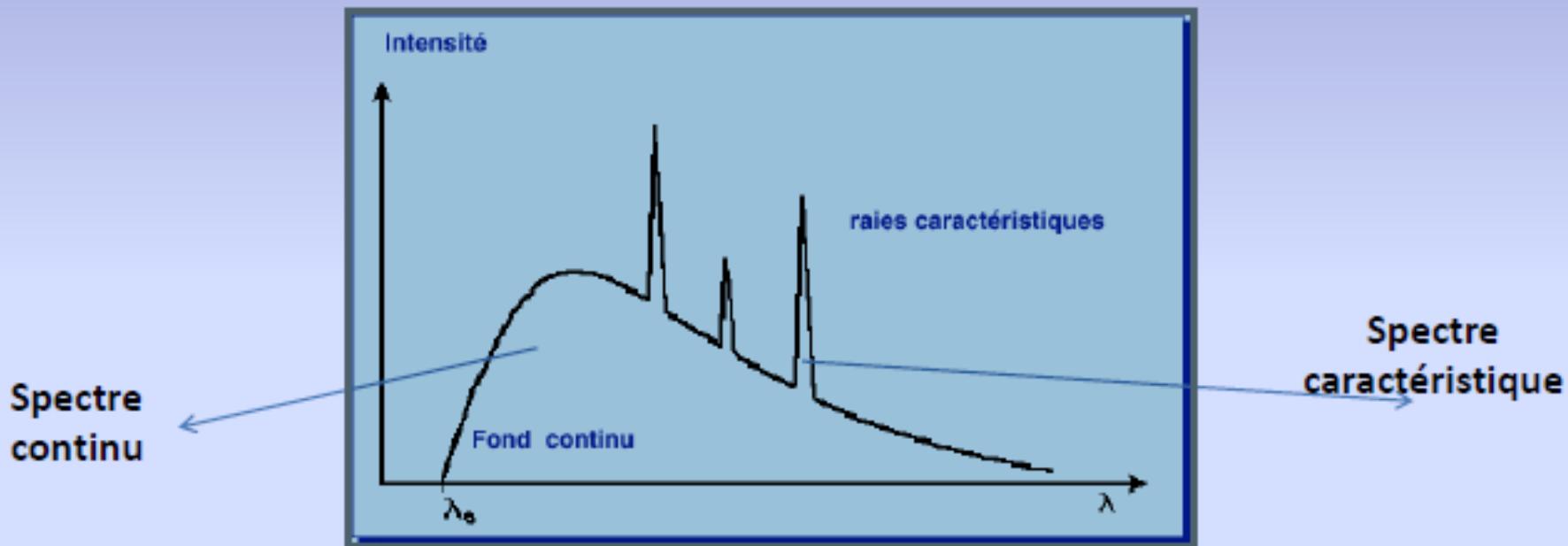


Spectre caractéristiques de RAIES
(sauts quantiques)

Spectre CONTINU

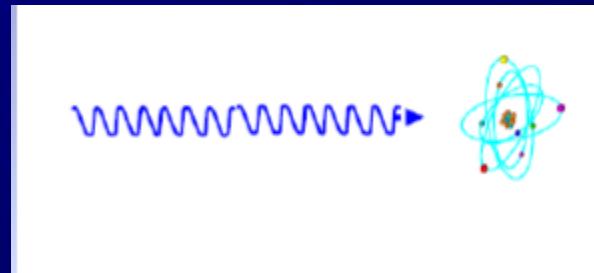
Spectre des rayons X

L'émission des RX est la conséquence des interactions qui se produisent entre les électrons rapides et les particules du métal (anode***) dans lequel ils pénètrent



*** Anode en Tungstène Numéro atomique élevé (74) offrant une forte probabilité d'interaction avec les électrons incidents et le cortège électronique cible et résistant à la chaleur dégagée lors du rayonnement

Interaction rayonnement matière



Rayonnements ionisants

- Les RI ne peuvent être détectés et caractérisés que grâce à leurs interactions avec la matière
- Ils cèdent leur énergie en totalité ou en partie au milieu qu'ils traversent
- La matière traversée subit des modifications dues au passage des radiations

Les grandes catégories de rayonnements

- ➊ Rayonnements chargés
- ➋ Rayonnements électromagnétiques (EM)
- ➌ Rayonnements neutres
- ➍ Un rayonnement particulaire ou électromagnétique est ionisant s'il est susceptible d'arracher des électrons à la matière (10eV)

Rayonnement directement ionisants et indirectement ionisants

- Rayonnements **directement ionisants**:
 - particules chargées légères: électron β^- , β^+ , ...
 - particules chargées lourdes: α , p, fragment de fissions, ions lourdes,..
- Rayonnements **indirectement ionisants**:
 - photons ou ondes EM (RX Ry)
 - neutrons
- Les effets biologiques d'une irradiation dépendent des **ionisations** et des **excitations** des atomes et des molécules le long des trajectoires de particules ionisantes

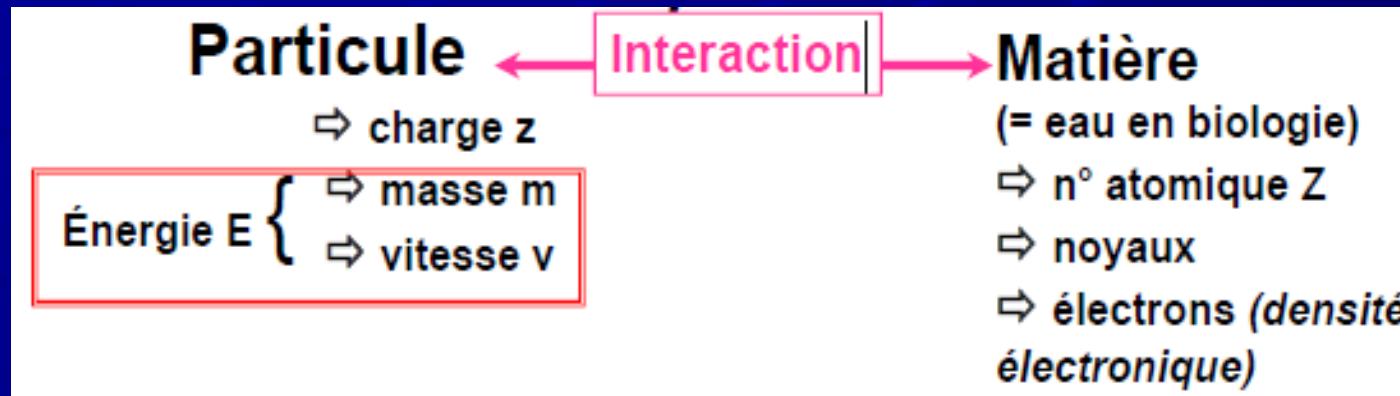
Interaction rayonnement matière

Cette interaction dépend de:

- La nature du rayonnement
- L'énergie de ce rayonnement
- La nature de la matière traversée

Interaction des particules chargées avec la matière

Interaction des particules chargées avec la matière



Particules chargées:

- Électrons (e^-)
- Protons (p^+)
- Particules α
- Positons (e^+)

Interaction des particules chargées avec la matière

Notion centrale: énergie transférée

-Effet thermique

-Excitations

-Ionisations

Interaction des particules chargées avec la matière

Interaction: 3 aspects

- L'interaction elle-même = transfert d'énergie
 - Nature
 - Mécanisme
 - fréquence/probabilité
- Conséquences sur la particule = ralentissement
- Conséquences sur le milieu = effets physiques et radiobiologiques (++++)

Interaction des particules chargées avec la matière

- Elles peuvent se faire:
 - Avec les électrons ++++++
 - choc « frontal » rare
 - choc « à distance » ++++
 - Avec les noyaux
 - Choc « frontal » (rare)
 - Interaction à distance: rayonnements de freinage (X)

Interaction des particules chargées avec la matière

Particule chargée quelconque:

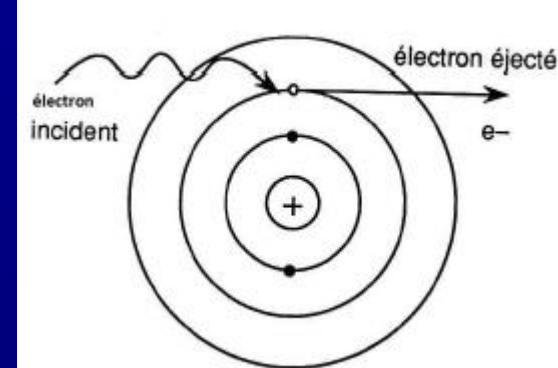
- Interaction obligatoire avec les électrons des atomes de la cible ou avec ses noyaux
- L'interaction avec les électrons est dominante jusqu'à 100Mev dans l'eau (malade) et 10Mev dans le plomb (radioprotection)

Interaction des particules chargées avec les électrons

Interaction avec un électron de l'atome cible

- L'énergie ΔE cédée par la particule incidente est transférée à un électron d'énergie de liaison W_l de l'atome cible
- 2 phénomènes peuvent se produire selon que ΔE est suffisante ou non pour éjecter l'électron de son orbite:



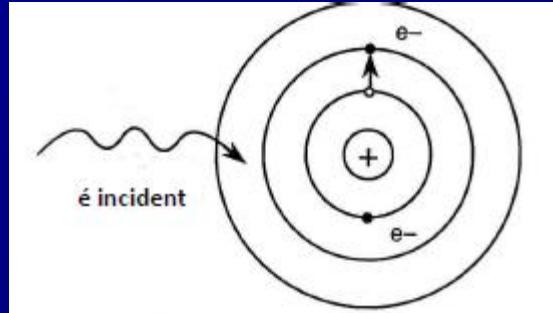


➤ Ionisation: si $\Delta E \geq W_l$:

Mécanisme fondamental pour les effets biologiques des rayonnements

- L'électron est éjecté de son orbite avec une énergie cinétique $\Delta E - W_l$
- Il se produit une **ionisation** de l'atome cible
- Crédit d'une paire d'ions formée par l'ion positif qui a perdu un électron et l'ion négatif qui a gagné un électron
- L'ionisation est suivi d'un **réarrangement** du cortège électronique avec émission de fluorescence X

➤ **Excitation si $\Delta E \leq WI$:**



- Le transfert d'énergie ΔE ne peut produire aucune ionisation mais porte l'électron à un niveau énergétique supérieur, avec **excitation** de l'atome cible
- l'énergie transférée est secondairement dissipé sous la forme d'une émission électromagnétique peu énergétique

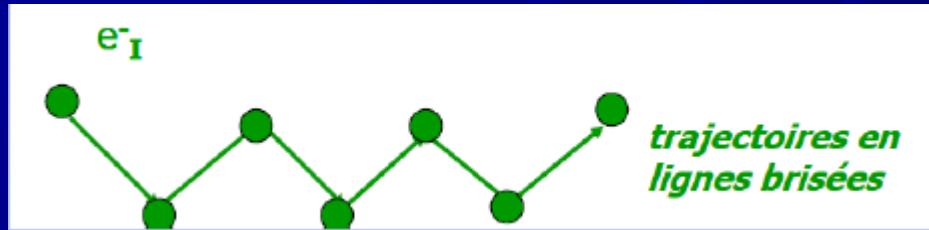
- ❖ Exemple :
- Dans le cas de l'eau, une ionisation nécessite un transfert d'énergie ΔE au moins égal à 16 eV. Mais pour une ionisation, se produisent environ 3 excitations qui représentent un transfert d'énergie d'environ 16eV. Les transferts d'énergie sont donc en moyenne de 32eV par ionisation (c'est-à-dire de paire d'ions créés).
- Dans l'air, cette énergie moyenne est de 34eV.

Particules chargées légères:

[électrons(négatons et positons)]

- Les électrons en **mouvement rapides** (Ec quelques Kev à qq Mev) sont obtenus par:
 - L'émission β^- des radioéléments
 - des accélérateurs d'électrons
 - La projection d'électrons secondaires par des photons X ou γ (Auger)

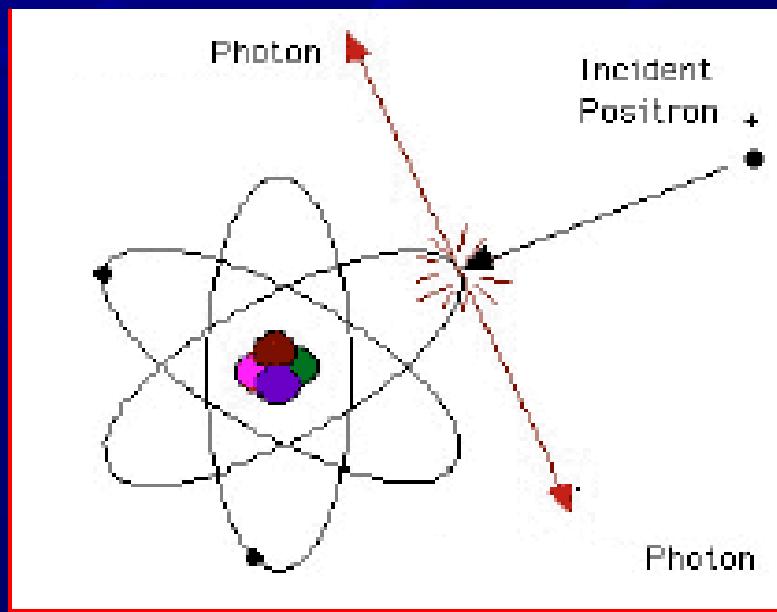
- Les trajectoires des particules sont des lignes brisées



- Profondeur de pénétration moyenne: distance qui sépare le point d'entrée de la particule dans le milieu cible du point terminal de la trajectoire

➤ Cas particulier du positon:

- ❖ Le **positon** a le **même type** et **caractéristiques** d'interaction avec la matière que l' **électron**.
- ❖ La principale différence entre **électron** et positon est la **réaction d'annihilation** pour ce dernier.

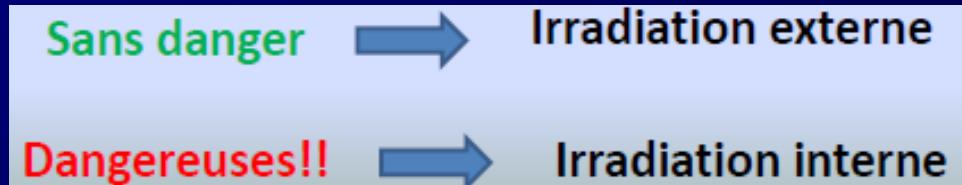
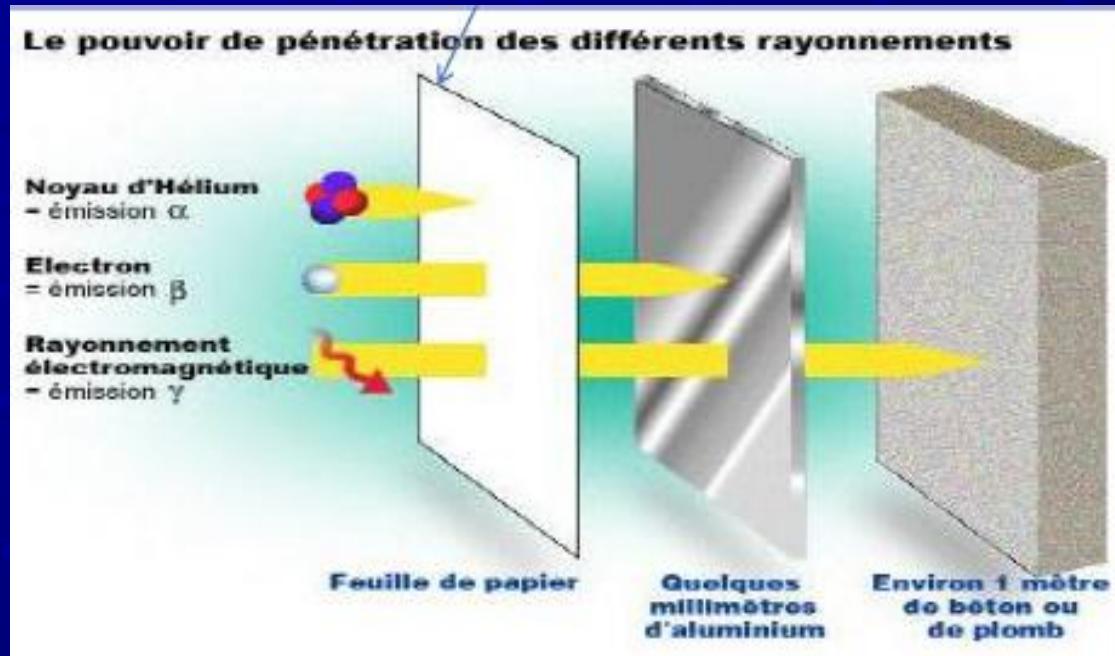


Particules chargées lourdes (α, p)

- Les transferts d'énergie sont importants
- La trajectoire est approximativement rectiligne
- L ne dépasse pas qq cm dans l'air et qq dizaines de μm dans l'eau

Particules chargées lourdes(α , p)

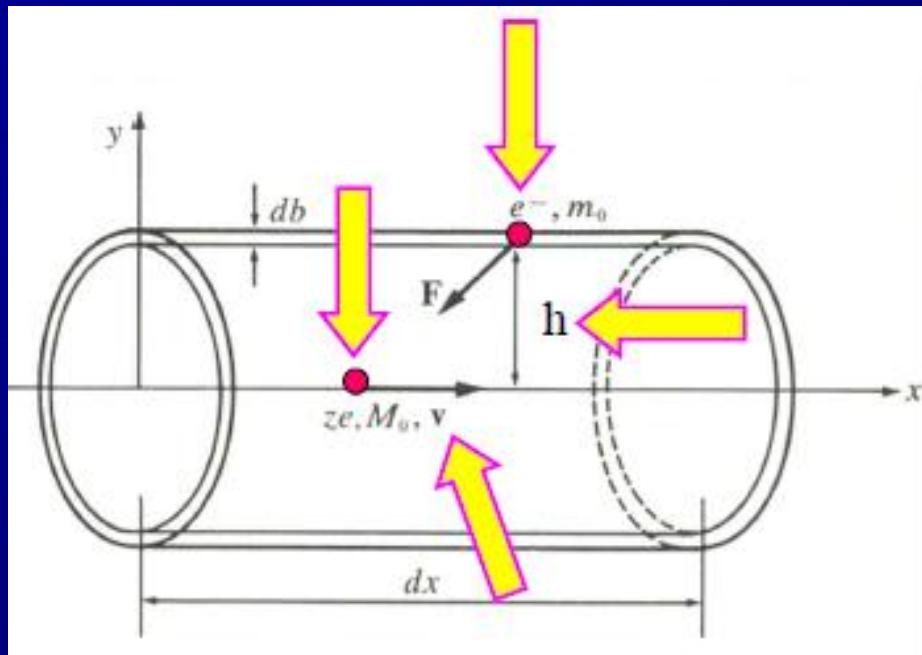
Ces particules sont totalement arrêtées par une simple feuille de papier ou par la couche cornée de la peau



Mécanisme d'interaction avec les électrons du milieu

- Mécanisme commun à toutes les particules chargées
= Interaction coulombienne
- La force coulombienne (positive ou négative) qui, pendant le bref passage de la particule au voisinage de l'électron, s'exerce entre les 2 charges électriques, communique une impulsion à l'électron
- Il ya transfert à l'électron cible d'une énergie Q prélevée sur l'énergie E de la particule incidente

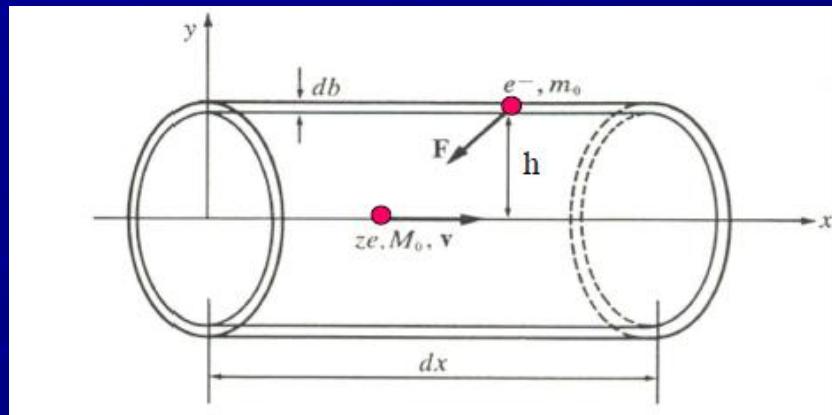
Cas le plus fréquent : Collision éloignée



L'impulsion croit avec la durée de l'interaction:

$$\Delta t \approx \frac{h}{v}$$

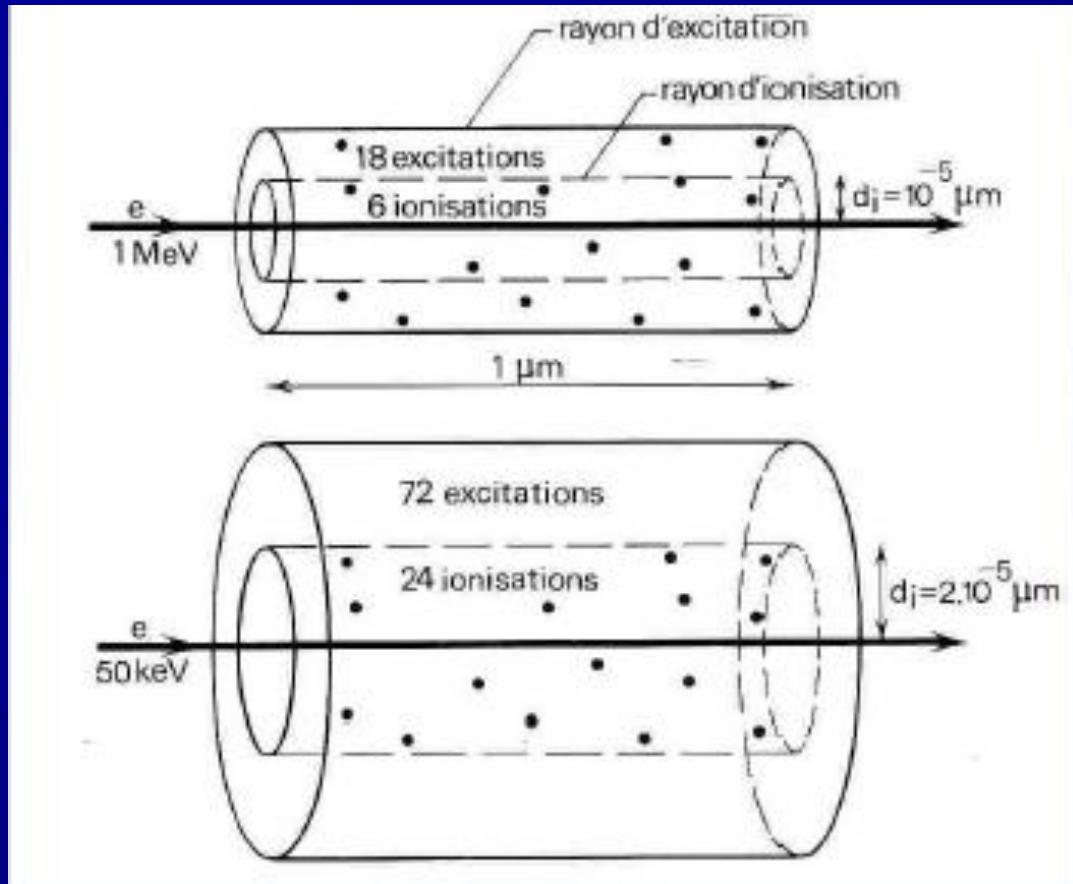
Mécanisme d'interaction avec les électrons du milieu



$$Q \cong K \frac{1}{h^2} \frac{z^2}{v^2}$$

- Pour une distance h donnée, Q est d'autant plus grand que la vitesse de la particule est plus faible.

➤ Répartition entre ionisations et excitations:



Distribution des ionisations
et excitations dans l'eau
pour 1 électron de 1 MeV et
50 keV

A 50 Kev la vitesse est plus faible, l'interaction est plus forte

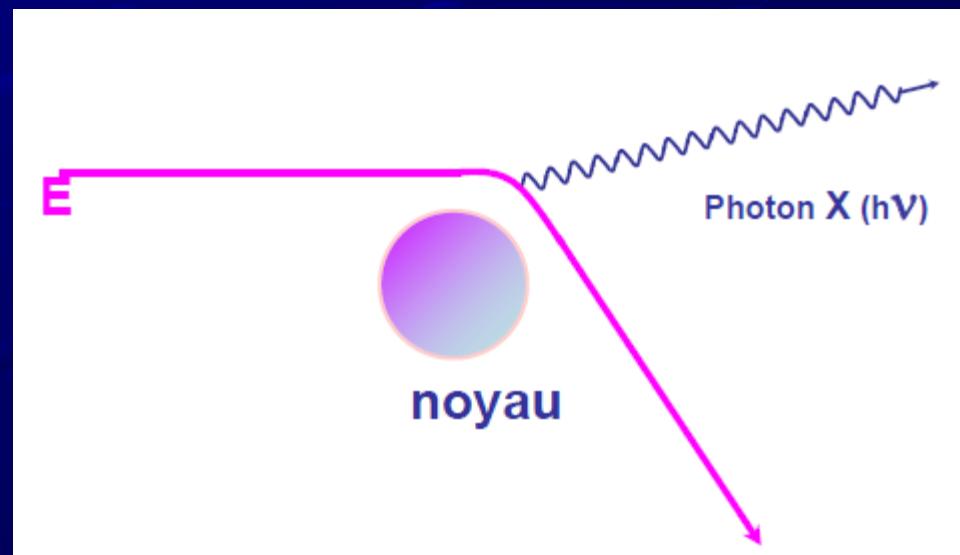
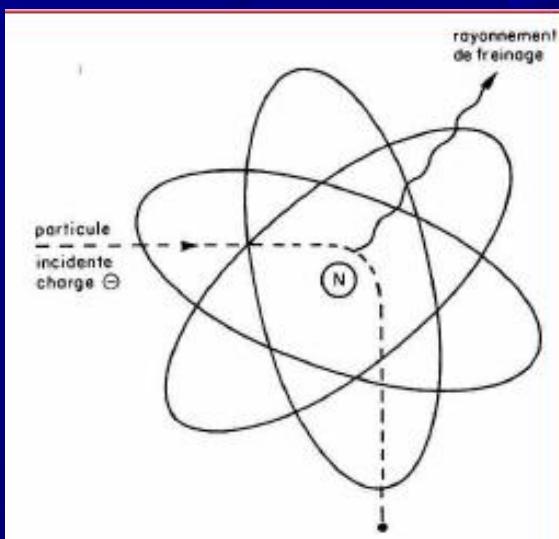


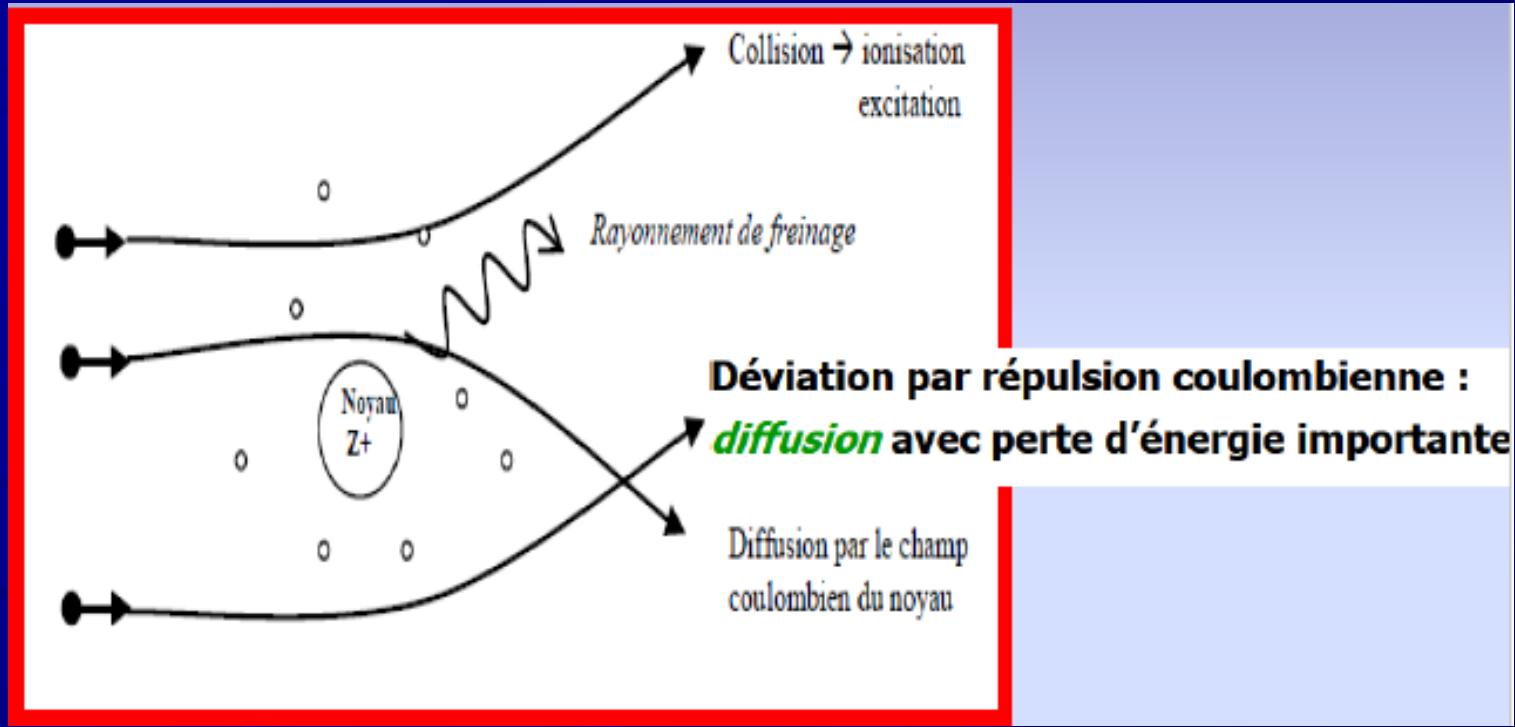
Il y a plus d'ionisation

Interaction des particules chargées avec les noyaux du milieu

Interaction avec le noyau de l'atome

- Quand les particules chargées passent à proximité du noyau d'un atome de la cible, leur trajectoire est déviée.
- Ceci entraîne une perte d'énergie cinétique, émise sous la forme de RX dit **rayonnement de freinage**





Modes d'interaction des particules chargées légères avec le noyau

Conséquences de l'interaction sur la particule

- Ralentissement
- Pouvoir de ralentissement
- Trajectoire et parcours

Pouvoir de ralentissement

Pouvoir de ralentissement:

$$S = \Delta E / \Delta X$$

- $Q = K \cdot 1/h^2 \cdot z^2/v^2$
- Q et S sont proportionnels à z^2/v^2
- A **vitesse égale**, toutes les particules portant une seule charge ont le même pouvoir de ralentissement

Pouvoir de ralentissement

1. Transfert d'énergie linéique ou (TEL)

- Le TEL est la quantité d'énergie transférée au milieu cible par la particule incidente par unité de longueur de trajectoire:

$$TEL = \frac{dE}{dx}$$

- le TEL s'exprime en Kev. μm^{-1}

$$TEL = K \frac{z^2}{v^2} n Z$$

k = constante

z = charge de la particule incidente

n = nb d'atomes de la cible par unité de volume
Z = numéro atomique de la cible

v = la vitesse de la particule incidente

Pouvoir de ralentissement

- **Effet de la masse:** Masse du proton = $1830 \times$ masse de l'électron
 - A la même vitesse v : Protons (vitesse v , énergie E_p) a le même pouvoir de ralentissement que les électrons ($E_e = E_p/1830$)
- **Effet de la charge:** particule α ($z = 2$): même vitesse v
 - Le pouvoir de ralentissement est: $2^2 = 4$ fois plus élevé
- ❖ Conséquence importante: 2 particules de même énergie de vitesse différentes ont des pouvoirs de ralentissement différents
- ❖ Ceci a une importance considérable sur le plan radiobiologique++

Trajectoire et parcours

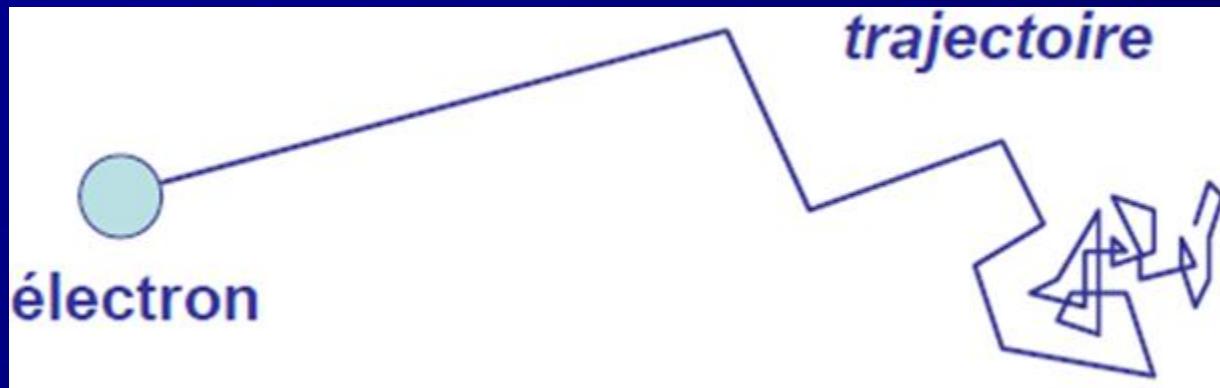
- Le parcours R et le pouvoir de ralentissement S des électrons dans l'eau en fonction de leur énergie cinétique initiale E est donnée dans le tableau suivant:

E keV	keV				MeV			
	10	30	50	100	0,5	1	5	10
S(keV/ μ m)	2,3	0,99	0,67	0,42	0,20	0,19	0,19	0,19
μ m					cm			
R	5	20	50	150	0,2	0,5	2,5	5

(d'après Tubiana M., Dutreix J., Wambersie A. Radiobiologie -Hermann 1986).

Trajectoire et parcours

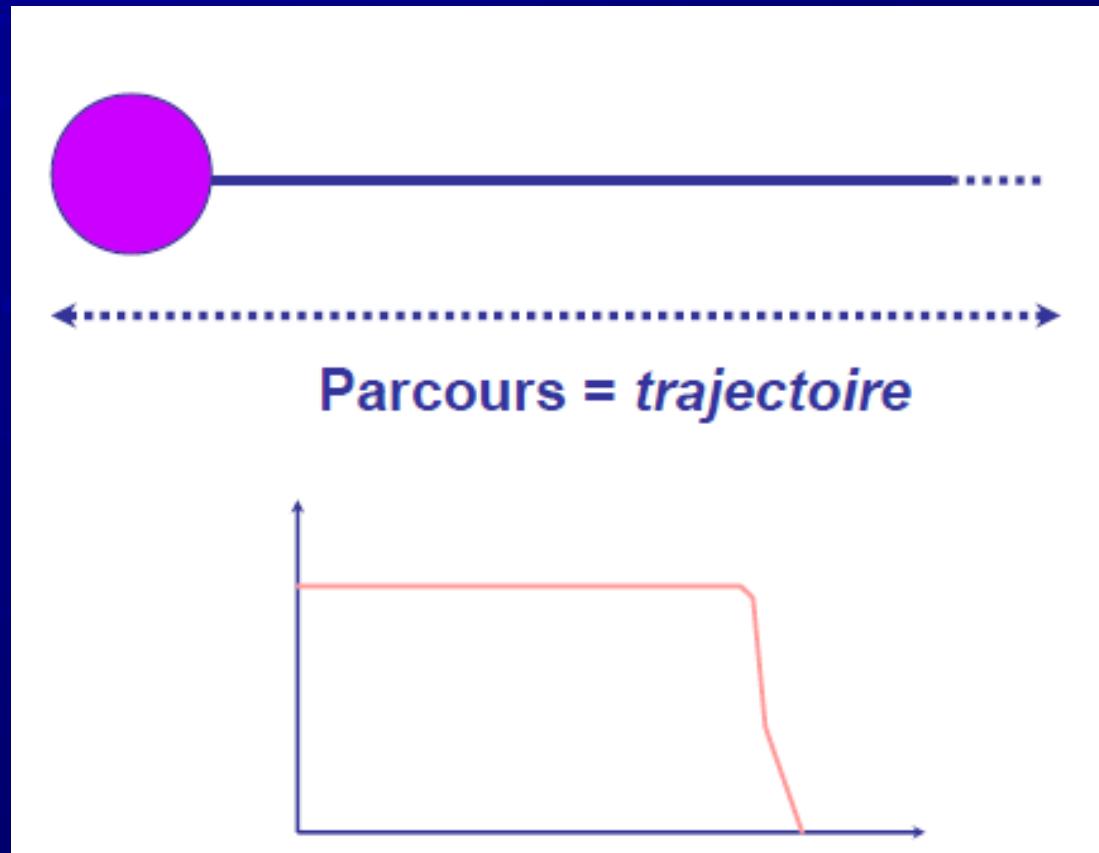
Parcours des électrons dans la matière



← →
(profondeur de pénétration dans les tissus)

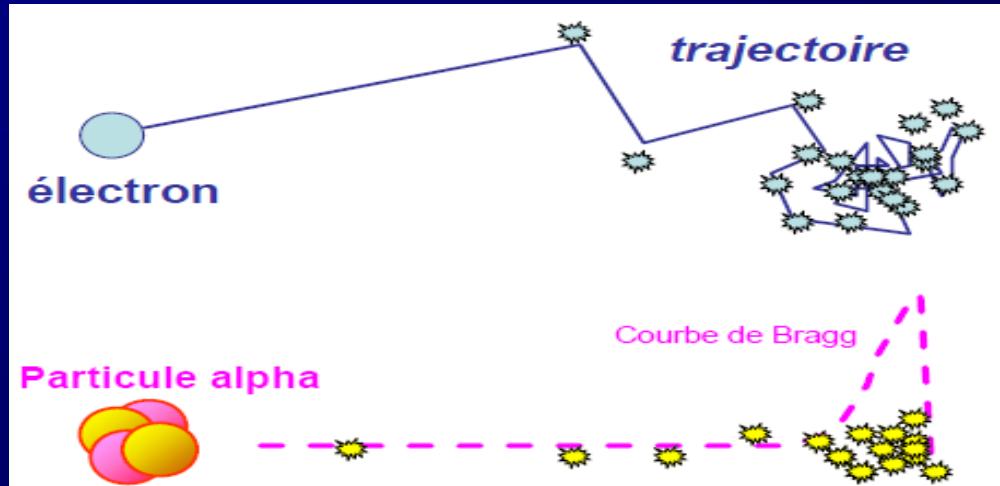
Trajectoire et parcours

Trajectoire des particules lourdes



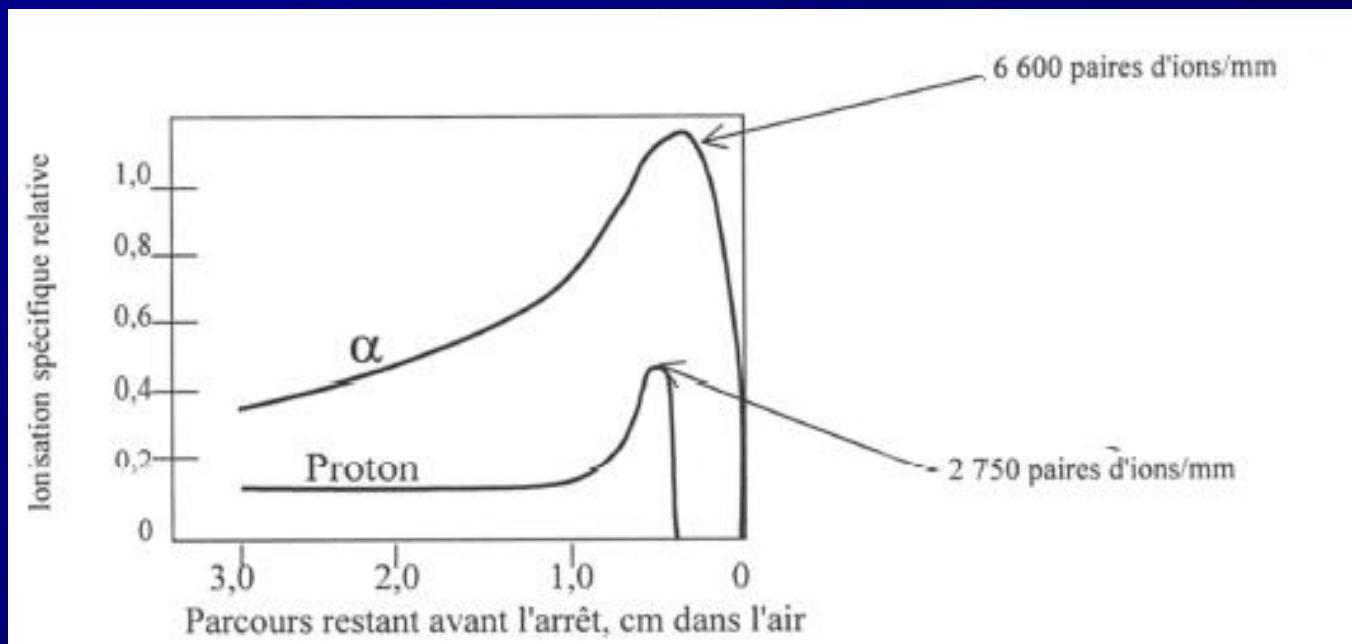
Trajectoire et parcours

- Le pouvoir de ralentissement dépend de la vitesse, par conséquent, il augmente quand la vitesse diminue (proportionnel à z^2/v^2)
- Donc plus la particule ralentit, plus le pouvoir de ralentissement augmente
- Les interactions sont beaucoup plus nombreuses en fin de trajectoire



Courbe de Bragg

- ✓ Avec les particules lourdes (protons, particules α), les ionisations sont plus nombreuses en fin de parcours: courbe de Bragg



Conséquences de l'interaction sur le milieu

- ❖ Transferts thermiques
- ❖ Excitations
- ❖ Ionisations

Conséquences de l'interaction sur le milieu

Chaque interaction entraîne dans le milieu un effet qui dépend de la valeur Q de l'énergie transférée par la particule:

- Q très faible: transfert thermique
- Q plus élevé mais $< 13\text{eV}$: excitation
- Q élevé: ionisations

Interaction des neutrons avec la matière

Interaction neutrons-matière

- Neutron: charge électrique nulle, durée de vie $\tau = 887\text{s} = 15\text{ minutes}$
- Selon l'énergie des neutrons, on les classe en 2 catégories:
 - Énergie $E < 1\text{eV}$, les neutrons sont dits **lents ou thermiques** car cette énergie correspond à l'agitation des atomes à la température ordinaire pour $T = 300\text{K}$, $E = 0,025\text{ eV}$
 - Énergie $E > 0,8\text{Mev}$, les neutrons sont appelés **rapides**. Dans ce domaine se trouvent les neutrons issus du processus de fission

Interaction neutrons-matière

- , les neutrons, particules non chargées, ont une interaction négligeable avec les électrons
- Leur énergie cinétique est absorbée par leur interaction avec les noyaux jusqu' à leur arrêt total
- La probabilité d'interaction avec les noyaux est très faible en raison du diamètre de l'atome.

Les neutrons sont très pénétrants

Interaction neutrons-matière

- Le ralentissement d'un neutron **rapide** se fait par choc avec les noyaux
- L'interaction des neutrons **lents** avec les noyaux se traduit par l'absorption du neutron

✓ La perte d'énergie cinétique est maximale pour un noyau d'hydrogène.



l'eau est un matériau très atténuant pour les neutrons rapides

Types d'interaction des neutrons

- 2 processus principaux d'interaction des neutrons avec les noyaux:
 - **La diffusion:** (prépondérante dans le domaine rapide), ralentissement des neutrons par transfert d'une partie de leur énergie au milieu , conduit à une modification de la trajectoire et à une variation de l'énergie de la particule incidente.
 - **La capture** (surtout importante dans le domaine thermique disparition du neutron par absorption)

Ralentissement des neutrons

Thermalisation

- Pour amener un neutron de 2Mev dans le domaine thermique 1/40eV. Il faut en moyenne
 - 18 chocs avec l'eau ordinaire (H_2O)
 - 24 chocs dans l'eau lourde (D_2O)
 - 85 dans le beryllium ($A = 9$)
 - 110 dans le graphite ($A = 12$)
- Ces corps grâce à leur pouvoir de ralentissement des neutrons constituent les principaux modérateurs (ralentisseurs) utilisés dans l'industrie et la recherche nucléaire

→ **Milieu de faible numéro atomique Z pour ralentir les neutrons**

DéTECTEURS DE NEUTRONS



DéTECTEURS He³ gaz
Bonne sensibilité

DéTECTEURS He³ gaz + sphère polyéthylène
Dosimétrie des neutrons

Application de l'interaction rayonnement matière en médecine

Intérêt double: diagnostique et thérapeutique

Diagnostique:

- Radiographie
- Scanner X
- Scintigraphie (gamma et TEP)

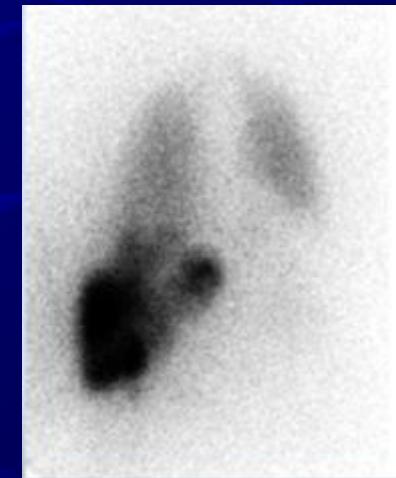
Thérapeutique:

- radiothérapie externe
- radiothérapie interne: curiethérapie

Application de l'interaction rayonnement matière en médecine



Scanner= utilisation des rayons X pour réaliser
cartographie des coefficients d'atténuation de l'organisme

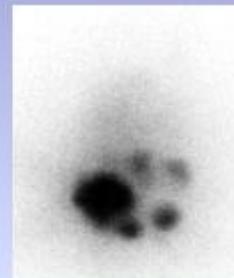
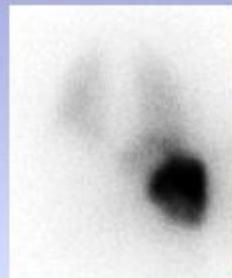


Scintigraphie: utilisation
des rayons γ pour étudier
une fonction de l'organisme

Radiothérapie métabolique

Utilisation des rayonnements β^-

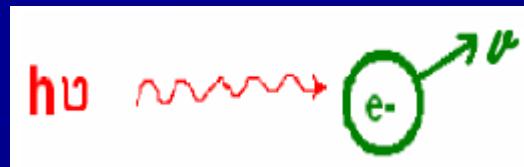
Lipiodol marqué à l'iode 131 (γ de 365 kev, β^- de 606 kev)



9 mois plus tard

Interaction des photons avec la matière

Interaction des photons avec la matière (RX,Ry)



- Les RX et les Ry ont le même comportement vis-à-vis de la matière.
- Lorsqu'un faisceau de photons traverse un matériau, il interagit, d'une manière **aléatoire**, avec les atomes de ce matériau et en ressort atténué.
- Cette **atténuation** est due à la fois à une **diffusion**, c'est-à-dire à un changement de direction des photons incidents, et à une **absorption**, c'est-à-dire un transfert de l'énergie des photons incidents au matériau traversé.

Interaction des photons avec la matière

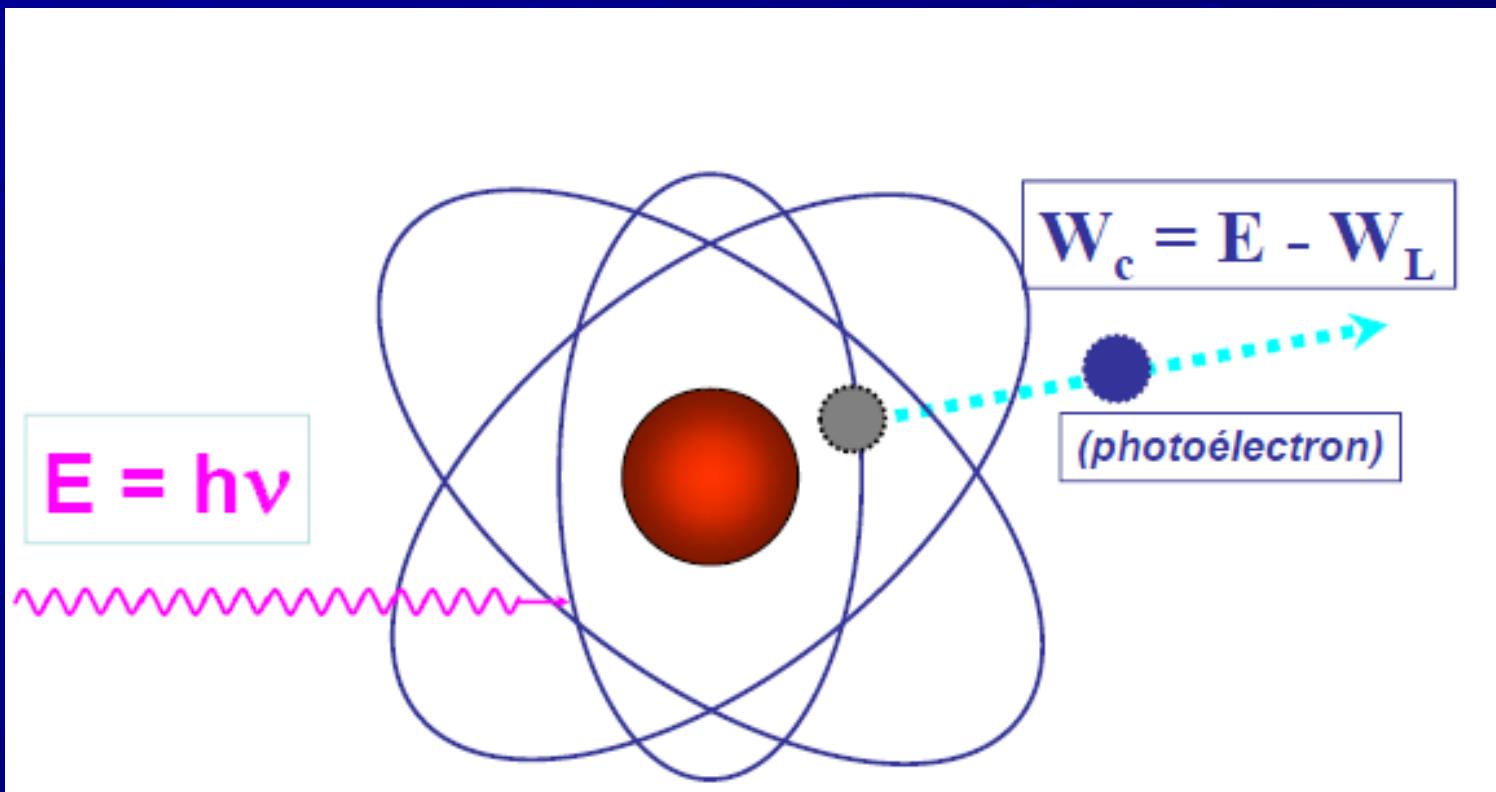
- Dans un premier temps interaction du photon avec un électron
- ✓ Non obligatoire: probabilité = coefficient d'atténuation ou d'absorption
- ✓ Loi d'atténuation
- L'électron éventuellement mis en mouvement se comporte alors comme une particule chargée (excitations, ionisations)
Rayonnement Indirectement Ionisant

Différentes types d'interactions

Interaction photon-matière

- les interactions des photons avec les électrons sont de trois types:
 - L'effet photoélectrique
 - L'effet Compton
 - La diffusion Rayleigh
- Les interactions des photons avec les noyaux sont de 2 types:
 - Les réactions photonucléaires
 - La production de paires d'électrons (effets de matérialisation)

Effet photoélectrique



Effet photoélectrique

❖ Conditions:

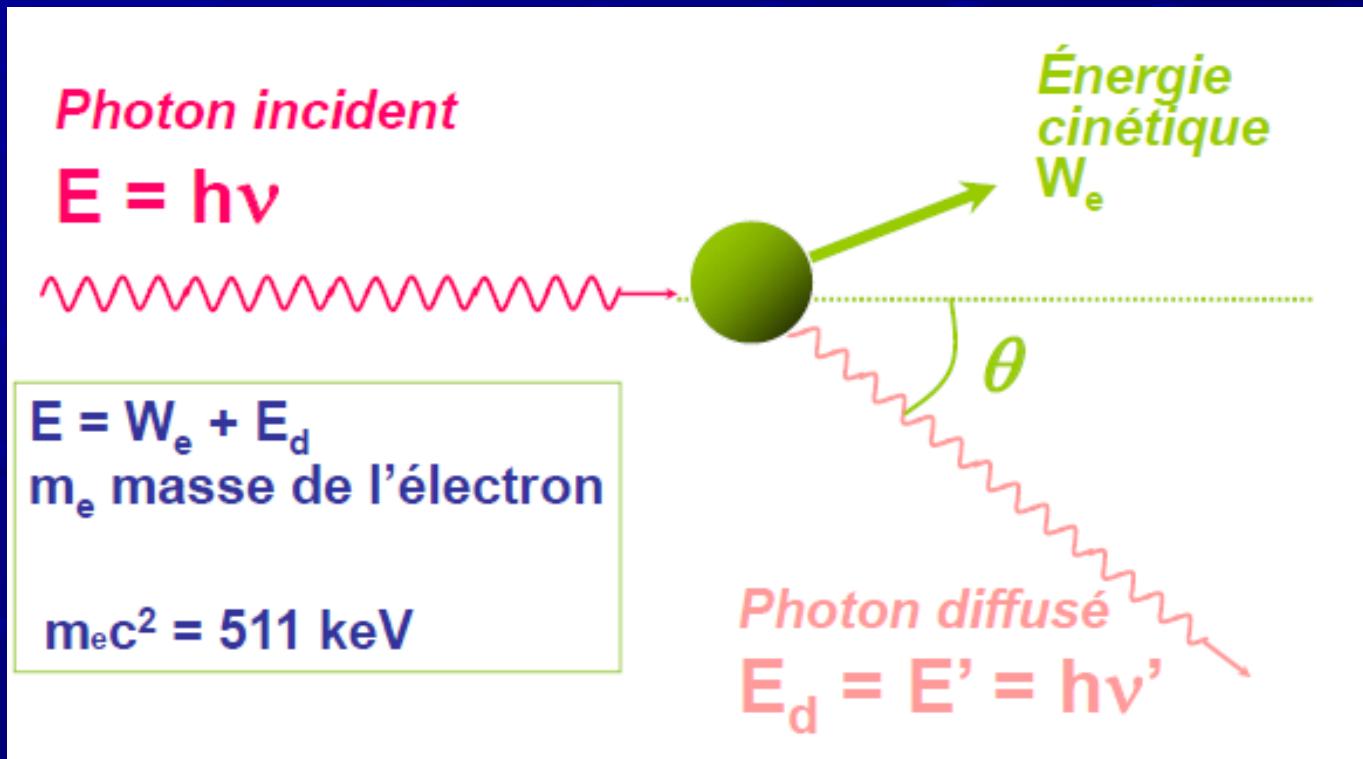
- Cet effet ne se produit que si l'énergie E du photon est supérieur à l'énergie E_l de liaison de l'électron $E > E_l$
- Électron lié du cortège électronique de la cible

❖ Phénomène secondaire:

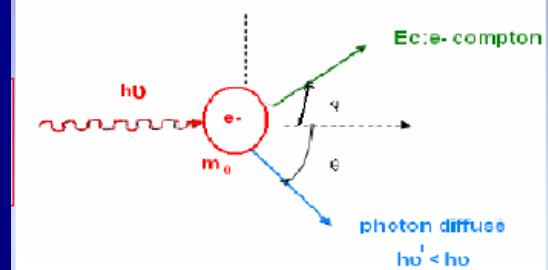
- L'électron expulsé épouse son énergie en ionisation et excitation
- Il laisse une place vacante et il y a par conséquence un réarrangement électronique
- Cette place vacante va être comblée par un électron d'une couche plus externe

Effet Compton

« collision » ou « choc élastique »



Effet Compton



- Le photon incident interagit avec un électron **libre** ou **faiblement lié** d'atome
- L'énergie du photon incident est partagée entre le **photon diffusé** et l'**électron Compton**
- Bilan énergétique:
$$\frac{1}{E_{\text{diff}}} - \frac{1}{E_i} = \frac{1 - \cos\theta}{m_0 c^2}$$
- Relation de Compton-Debye:
$$\lambda_{\text{diff}} - \lambda_i = \frac{h}{m_0 c^2} (1 - \cos\theta)$$

Effet Compton

$$\frac{W_e}{E_d} = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie diffusée}} = \frac{E(1-\cos\theta)}{mc^2}$$

proportionnel à E

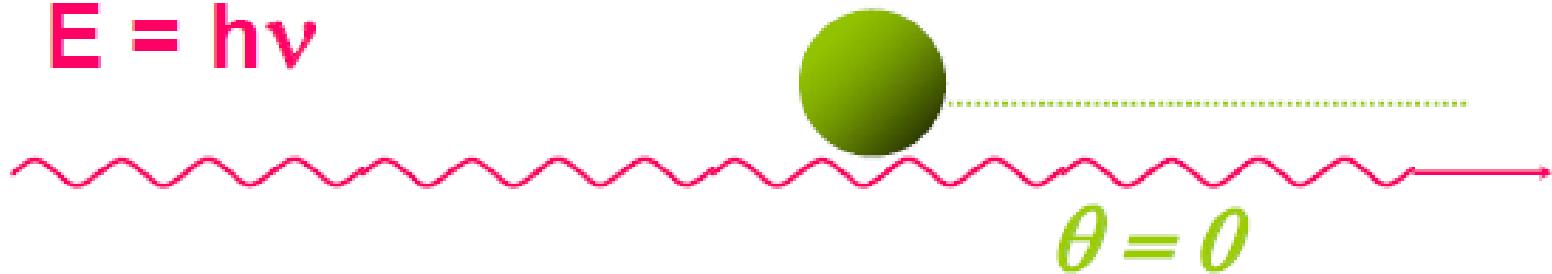
- ❖ Ce qui compte pour les effets radio biologiques, c'est l'énergie communiquée à l'électron, c'est-à-dire l'énergie absorbée
- ❖ Plus l'énergie du photon incident est grande, plus la fraction d'énergie transférée à l'électron est grande

Effet Compton

Photon incident

$$E = h\nu$$

Énergie
cinétique
 $W_e = 0$

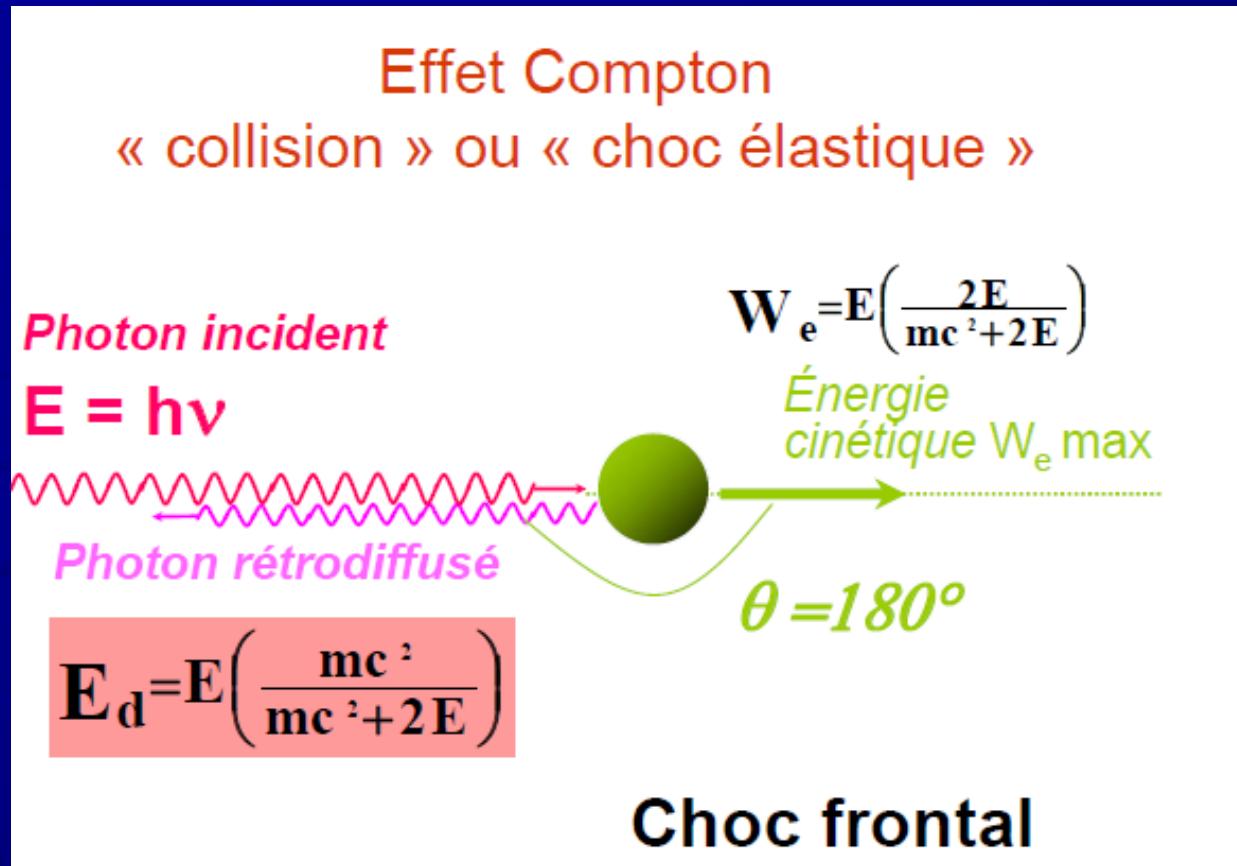


Choc tangentiel

Choc tangentiel ($\theta = 0$): diffusion rasante

Le photon garde sa trajectoire et toute son énergie

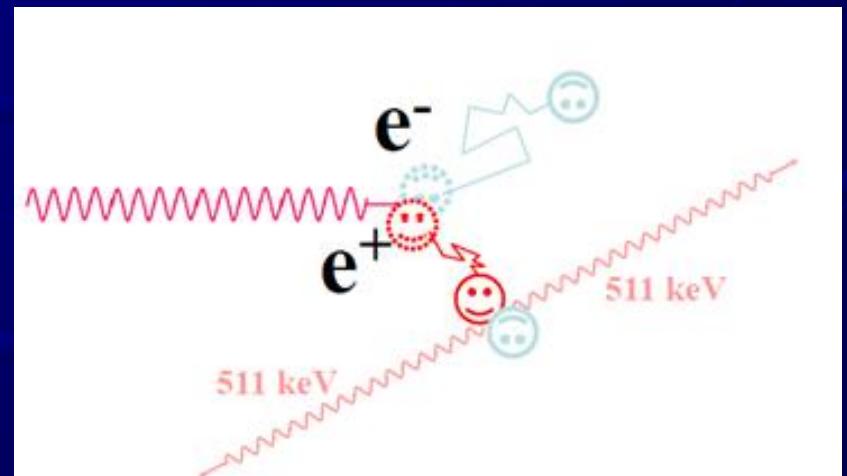
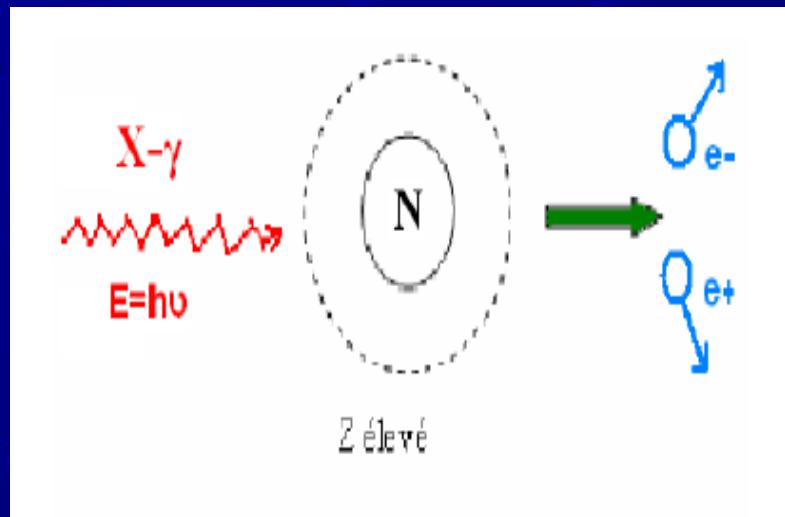
Effet Compton



Rétrodiffusion ($\theta = 180^\circ$): choc frontal, l'énergie cédée à l'électron est maximum, celle du photon diffusé est minimum il retourne

Effet de matérialisation (création de paires)

- Le processus se produit pour des photons très énergétiques passant à proximité d'un noyau $h\mu \geq 1,022 \text{ MeV}$



Effet de matérialisation (création de paires)

Conséquence:

- L'électron (e^-) perd son énergie E_c en excitation/ionisation
- Le positon (e^+) s'annihile en rencontrant un électron libre de la matière

Coefficient d'atténuation (π)  Probabilité d'interaction
par production de paire

$\pi = 0$ lorsque $E < 1,022 \text{ MeV}$

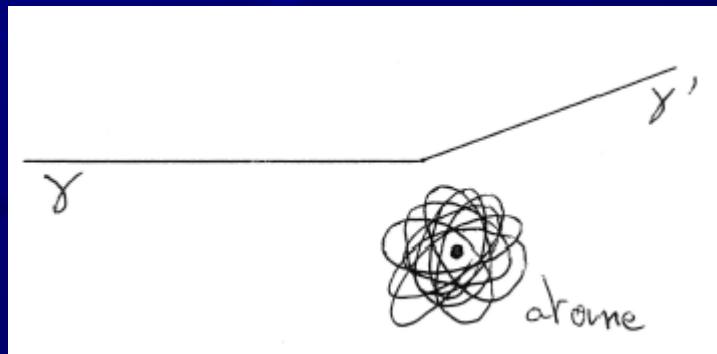
Autres types d'interaction

Absorption par le noyau

- Si le photon a une énergie correspondant à l'énergie nécessaire pour porter le noyau d'un état énergétique à un autre niveau énergétique possible, **le photon peut être capturé et le noyau se trouve ainsi excité**. C'est ce que l'on appelle **la résonance**.
- La désexcitation du noyau peut se faire par émission d' un ou plusieurs rayonnements .

Diffusion de Thomson et Rayleigh

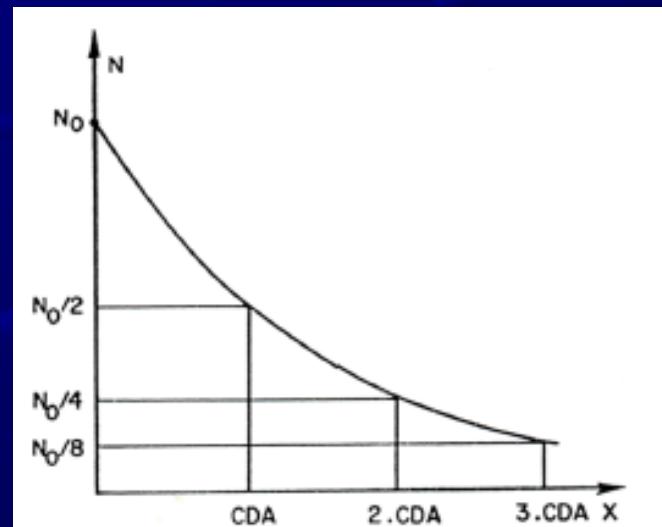
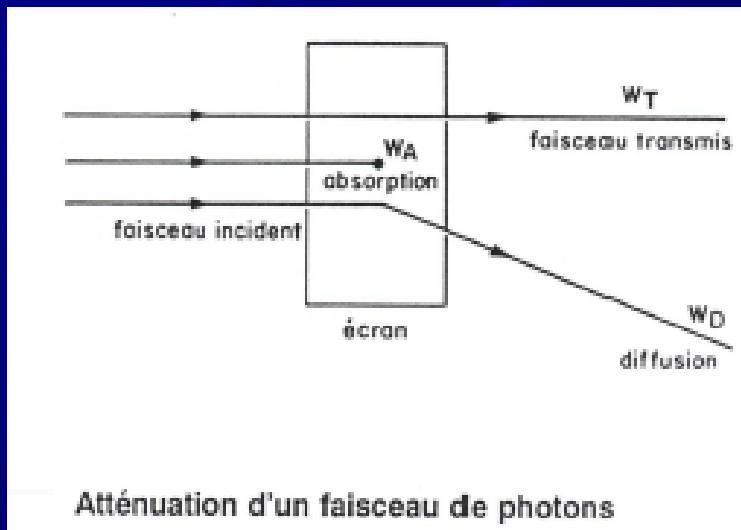
- Ce type d'interaction met en jeu un photon de **faible énergie**; le photon rebondit **sans modification de son énergie**, mais avec modification de sa trajectoire.
- Ce phénomène concerne les photons de faible énergie (infrarouge, lumière visible, rayon, X mou)



Loi d'atténuation $N(x) = N_0 e^{-\mu x}$

- Il faut distinguer:

- Énergie transférée et énergie absorbée (la différence correspond à l'énergie diffusée)
- Atténuation et absorption



Variations du nombre de photons qui traversent un écran sans interaction en fonction de l'épaisseur x de l'écran
Le nombre de photons transmis décroît de manière exponentielle mais ne s'annule pas.

Coefficient d'atténuation: effet photoélectrique T

- T: est le coefficient linéaire lié à l'effet photoélectrique
- τ/ρ est le coefficient d'atténuation massique
- Relation approchée de Bragg et Pierre
- K est une constante qui ne dépend pas du matériau
- ρ est la masse volumique et Z est le numéro atomique de l'écran (cible)

$$\frac{\tau}{\rho} \approx k \frac{Z^3}{E^3}$$

L'effet photoélectrique est important surtout pour les éléments lourds et les photons peu énergétiques.

Coefficient d'atténuation σ : effet Compton

- σ : est le coefficient d'atténuation linéaire de l'effet Compton
- σ/p : est le coefficient d'atténuation massique



{ Indépendant de Z
↓ Lentement quand $E \uparrow$

L'effet Compton existe, mais il reste peu probable lorsque Z est élevé

Probabilité de l'un des effets en fonction de Z et E:

- Faibles énergies (<100kev) l'effet photoélectrique est largement prédominant
- Energies moyennes (100 à qqMev), l'effet Compton est prédominant
- Energie élevées (>5Mev), la matérialisation est l'effet prédominant

