

BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

TUT' RENTRÉE COURS 1



Le tutorat est gratuit. Toute vente ou reproduction est interdite

Toute vente ou reproduction est interdite.

BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

I. Particules, ondes et atomes

A. Masse, énergie et unité de mesure

1. La nomenclature des nuclides
2. Le gramme et la masse molaire atomique
3. L'unité de masse atomique
4. Énergie de masse

B. Les particules matérielles

1. L'électron
2. Le proton
3. Le neutron
4. Autres particules

C. Les rayonnements électromagnétiques ou photons

1. Représentation classique
2. Spectre des rayonnements
3. Représentation quantique

D. La dualité onde-particules

1. La relation d'Einstein
2. La relation de De Broglie

E. La structure électronique de l'atome

1. Le modèle planétaire de Rutherford
2. Le modèle de Bohr

BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

II. Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interaction élémentaire

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Émission d'énergie
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation des photons dans la matière
2. Les mécanismes d'atténuation
3. Les autres interactions
4. Probabilité et matière traversée

C. Interaction des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

I. Particules, ondes et atomes

A. Masse, énergie et unité de mesure

1. La nomenclature des nuclides
2. Le gramme et la masse molaire atomique
3. L'unité de masse atomique
4. Énergie de masse

B. Les particules matérielles

1. L'électron
2. Le proton
3. Le neutron
4. Autres particules

C. Les rayonnements électromagnétiques ou photons

1. Représentation classique
2. Spectre des rayonnements
3. Représentation quantique

D. La dualité onde-particules

1. La relation d'Einstein
2. La relation de De Broglie

E. La structure électronique de l'atome

1. Le modèle planétaire de Rutherford
2. Le modèle de Bohr

I.A. Masse, énergie et unité de mesure

Mesurer la masse d'un atome

- ◆ Le gramme
- ◆ L'unité de masse atomique

I.A.1 La nomenclature des nuclides



A : Le nombre de masse =
le nombre de nucléons

Z : Le nombre de protons

I.A.2 Le gramme

La masse molaire atomique

Elle correspond à la masse d'une mole d'atome i.e. la masse de N atomes

N : la constante d'Avogadro = $6,02 \cdot 10^{23}$

Référence : 1 mole de Carbone 12 pèse 12g

I.A.2 La masse molaire atomique et le nombre de masse

La masse molaire atomique en grammes s'exprime par le même nombre que le nombre de masse A de l'atome (à l'entier près).

Connaître la masse en grammes d'une mole d'un atome permet de connaître son nombre de nucléons! ☺

I.A.2 Application

→ 1 mole d'atome de ^{12}C pèse 12g

MASSE	Carbone	Hydrogène	Oxygène
1 mole d'atome (g)	12	1,007	...
Le nombre de masse A	12	...	16
1 atome (g)	$2 \cdot 10^{-23}$

Aide au calcul: $6/16 = 0,365$; $16/6 = 2,65$

I.A.2 Application

MASSE	Carbone	Hydrogène	Oxygène
1 mole d'atome (g)	12	1,007	15,994 soit environ 16g
Le nombre de masse A	12	1	16
1 atome (g)	$2 \cdot 10^{-23}$	$0,17 \cdot 10^{-23}$	$2,65 \cdot 10^{-23}$

I.A.3. L'unité de masse atomique

Elle est adaptée à l'échelle des atomes

Définition:

- ◆ elle correspond à $1/12^{\text{ème}}$ de la masse d'un atome de Carbone 12.
- ◆ C'est l'inverse du nombre d'Avogadro **$1u = 1/N$**

I.A.3. L'unité de masse atomique et la masse atomique

La masse d'un atome en u s'exprime par le même nombre que la masse molaire atomique en grammes.

I.A.3. Application

1 atome de ^{12}C pèse 12u

Masse	Carbone	Hydrogène	Oxygène
Masse atomique	12	1,007	15,994
Le nombre de masse	12	1	16
1 atome (g)	$2 \cdot 10^{-23}$	$0,17 \cdot 10^{-23}$	$2,65 \cdot 10^{-23}$
1 atome (u)	12	1,007	15,994

I.A.3 Énergie de masse

La masse est une forme d'énergie.

$$E = m \cdot c^2$$

c : la vitesse de la lumière dans le vide $3,00 \cdot 10^8$

I.A.3 Énergie de masse

Énergie d'une particule au repos

$$E = m_0 \cdot c^2$$

Énergie d'une particule en mouvement

Certaines particules voient leur masse varier avec leur vitesse. On parle de masse relativiste m .

m : masse relativiste en Kg

m_0 : masse initiale

v : la vitesse de la particule

c : la célérité de la lumière dans le vide.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

I.A.3 Énergie de masse, énergie totale d'une particule en mouvement.

L'énergie totale d'une particule en mouvement

$$E_T = E_0 + E_C$$

$$E_C = E_T - E_0$$

$$E_C = E_T - m_0c^2$$

$$E_C = \Delta m \cdot c^2$$

L'énergie cinétique E_C est liée à l'augmentation de la masse relativiste de la particule.

I.B. Les particules matérielles

I. Particules, ondes et atomes

A. Masse, énergie et unité de mesure

1. La nomenclature des nuclides
2. Le gramme et la masse molaire atomique
3. L'unité de masse atomique
4. Énergie de masse

B. Les particules matérielles

1. **L'électron**
2. **Le proton**
3. **Le neutron**
4. **Autres particules**

C. Les rayonnements électromagnétiques ou photons

1. Représentation classique
2. Spectre des rayonnements
3. Représentation quantique

D. La dualité onde-particules

1. La relation d'Einstein
2. La relation de De Broglie

E. La structure électronique de l'atome

1. Le modèle planétaire de Rutherford
2. Le modèle de Bohr

I.B.1. L'électron

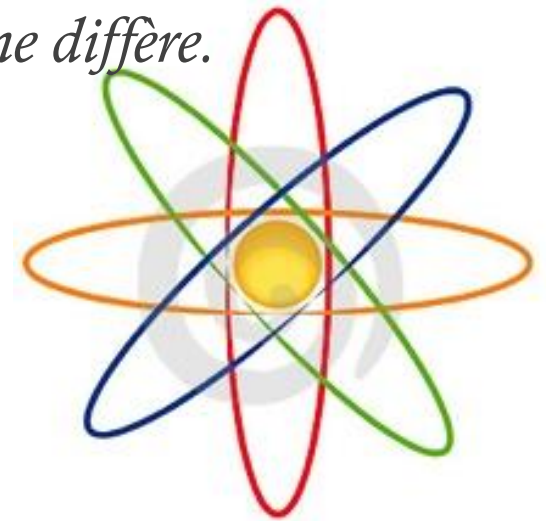
On distingue:

- ◆ **L'électron**: il provient du cortège électronique de l'atome
- ◆ **Le négaton** ou **particule β^-** : il provient du noyau atomique

Ils ont les mêmes caractéristiques, seule leur origine diffère.

Masse au repos: $1/2000 \text{ u} = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$

Charge: $-e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Coulombs}$



I.B.1 L'électron et l'électronvolt

L'électronvolt (eV) : unité particulière pour exprimer l'énergie qui est adaptée aux énergies mises en jeu dans l'atome.

Définition: Énergie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale, sous l'effet d'une différence de potentiel de 1V.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

I.B.2. Le proton

Le proton est une particule stable.

Masse: 1,007 u

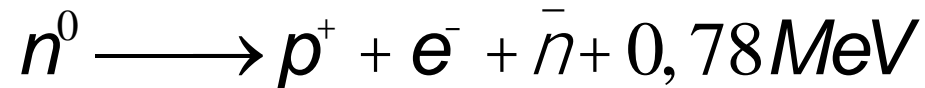
Pas de masse relativiste

Charge : $+e = 1,602 \times 10^{-19}$ Coulombs

I.B.3 Le neutron

Le neutron est **stable** dans le noyau.

Il est **instable** en dehors et se transforme selon l'équation suivante:



Masse au repos: 1,009 u

Pas de masse relativiste

Pas de charge

I.B.4. Autres particules

Le positon

- antiparticule de l'e⁻,
- de même masse : 1/2000 u
- de charge opposée +e.

Le neutrino

- Explique la radioactivité β
- Masse au repos quasi nulle
- Charge nulle

I.B.4. Autres particules

La particule alpha

- c'est le noyau de l'atome d'Hélium He^{2+}
- Masse au repos: 4,0015 u
- Charge: $2 \times +e = 3,204 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

I. Particules, ondes et atomes

A. Masse, énergie et unité de mesure

1. La nomenclature des nuclides
2. Le gramme et la masse molaire atomique
3. L'unité de masse atomique
4. Énergie de masse

B. Les particules matérielles

1. L'électron
2. Le proton
3. Le neutron
4. Autres particules

C. Les rayonnements électromagnétiques ou photons

1. Représentation classique
2. Spectre des rayonnements
3. Représentation quantique

D. La dualité onde-particules

1. La relation d'Einstein
2. La relation de De Broglie

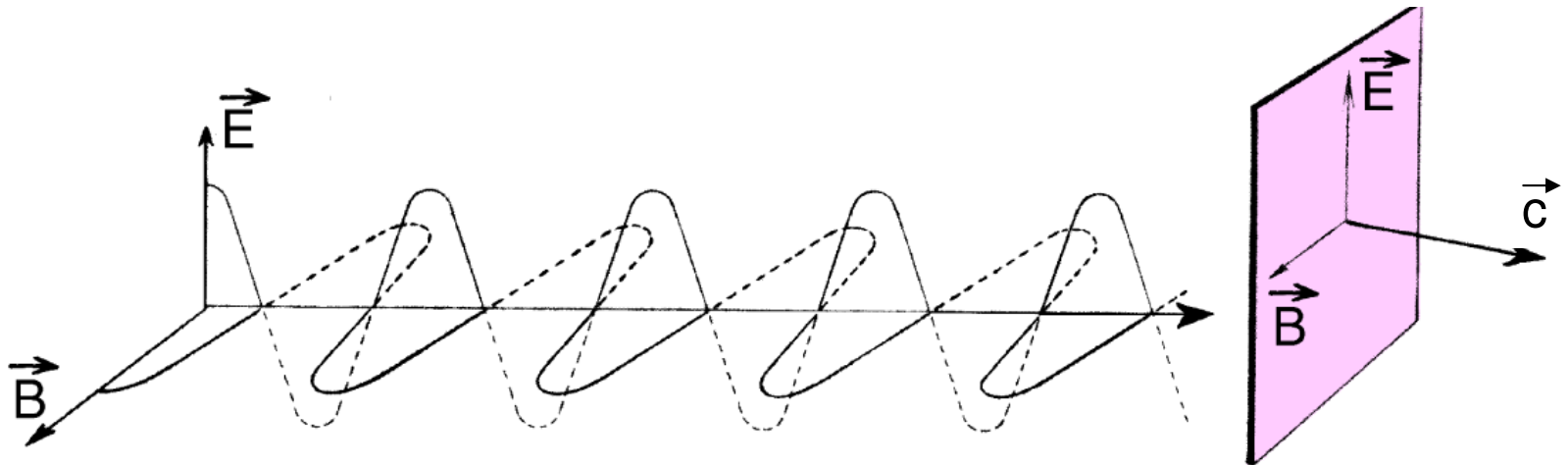
E. La structure électronique de l'atome

1. Le modèle planétaire de Rutherford
2. Le modèle de Bohr

I.C.1. Représentation ondulatoire classique

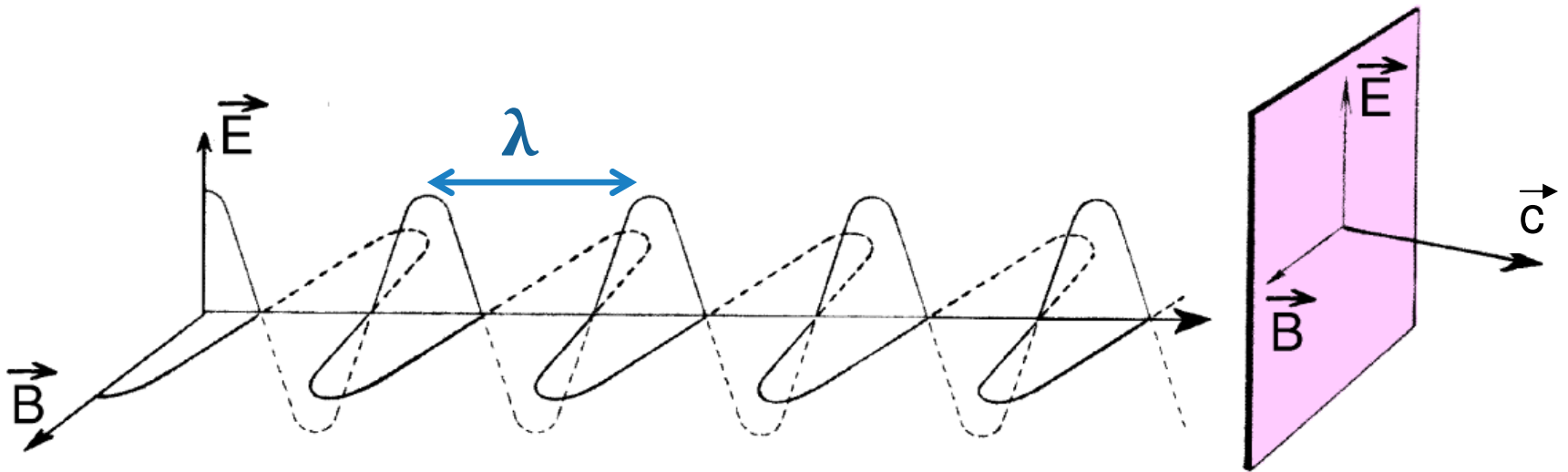
Champs électromagnétique qui se propage dans le vide à la vitesse de la lumière.

Définition : propagation d'un champs électrique et d'un champs magnétique qui vibrent en phase perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation.



I.C.1. Représentation ondulatoire classique

Les ondes EM sont définies par une longueur d'onde λ



I.C.1. Représentation ondulatoire classique

La fréquence ν

Définition: C'est le nombre de motifs par seconde.

Unité: Hz ou s^{-1}

c : vitesse de la lumière en $m.s^{-1}$

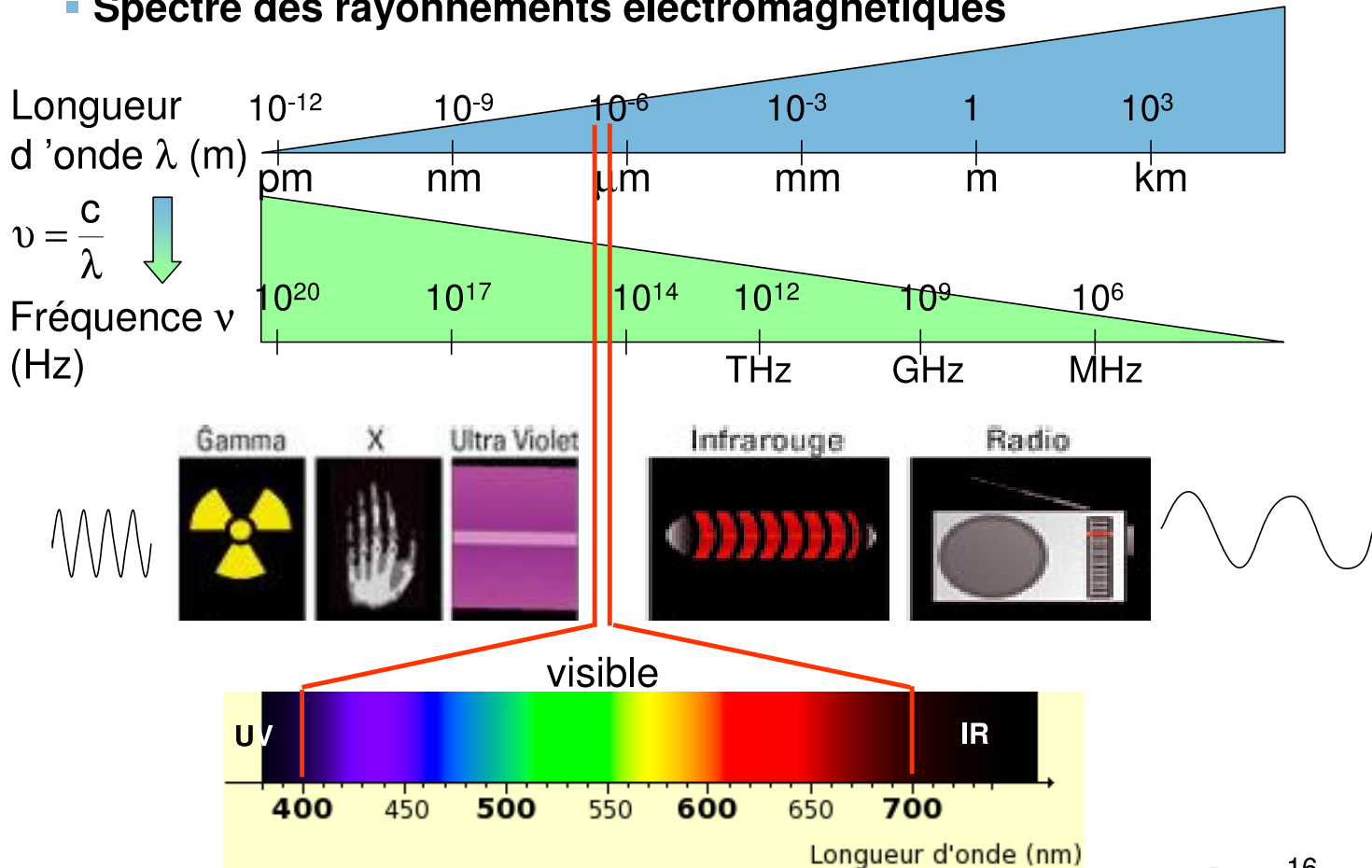
λ : longueur d'onde en m

ν : fréquence en Hz ou s^{-1}

$$n = \frac{c}{\lambda}$$

I.C.2 Spectre des rayonnements électromagnétiques

■ Spectre des rayonnements électromagnétiques



I.C.3 Représentation quantique

Une onde électromagnétique peut transférer de l'énergie sous forme de quantités discontinues:

- Multiples de la constante de la constante de Planck h

E : énergie en joules

h : constante de Planck = $6,62 \cdot 10^{-34} \text{J}\cdot\text{s}^{-1}$

c : vitesse de la lumière en $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

ν : fréquence en Hz ou s^{-1}

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

I.C.3 Application

Soit une onde de fréquence $\nu = 5 \cdot 10^8$ GHz:

- A. Son énergie est environ de $3,3 \cdot 10^{-25}$ J.
- B. Son énergie est environ de 2000 eV.
- C. Sa longueur d'onde est environ de 0,6 nm.
- D. Cette onde appartient au domaine du visible.

I.C.3. Application

Correction: BC

- ~~A. Son énergie est environ de $3,3 \cdot 10^{-25} \text{ J}$.~~
- B. Son énergie est environ de 2000 eV.
- C. Sa longueur d'onde est environ de 0,6 nm.
- ~~D. Cette onde appartient au domaine du visible.~~

I.C.3 Application

A. FAUX → Il ne faut pas oublier de convertir en Hz! 😊

$$\nu = 5.10^8 \text{ GHz} = 5.10^{17} \text{ Hz}$$

$$E = h\nu = 6,62.10^{-34} \times 5.10^{17} = 3,3.10^{-16} \text{ J}$$

B. VRAI

$$E = 3,3.10^{-16} \text{ J} = \frac{3,3.10^{-16}}{1,6.10^{-19}} \text{ eV} \gg 2000 \text{ eV}$$

I.C.3 Application

C. VRAI

$$n = \frac{c}{l} \Leftrightarrow l = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{5 \cdot 10^{17}} = 0,6 \cdot 10^{-9} \text{ m} = 0,6 \text{ nm}$$

D. FAUX: les rayonnements visibles ont des longueur d'ondes comprises entre **400 et 700nm**.

I.C.3 Représentation quantique

La relation de Duane et Hunt

E: énergie en eV

λ : longueur d'onde en nm

$$E = \frac{1240}{\lambda}$$

Cette relation est importante à connaître pour les calculs car elle donne directement le résultat en eV! 😊

I.C.3 Application

Soit un rayonnement d'énergie $E = 2,5 \text{ eV}$:

- A. Sa longueur d'onde est 5 nm
- B. Sa longueur d'onde est 500 nm
- C. Sa longueur d'onde est 0.5 microns
- D. Le rayonnement est visible.

I.C.3 Application

Correction: BCD

- ~~A. Sa longueur d'onde est 5 nm~~
- B. Sa longueur d'onde est 500 nm
- C. Sa longueur d'onde est 0.5 microns
- D. Le rayonnement est visible.

I.C.3 Application

On applique la relation de Duane et Hunt:

$$E = 2,5 \text{ eV}$$

$$E = \frac{1240}{\lambda} \Leftrightarrow \lambda = \frac{1240}{E} = \frac{1240}{2,5} \approx 500 \text{ nm} = 0,5 \mu\text{m}$$

A. FAUX

B et C. VRAIS

D. VRAI : il est compris entre 400 et 700 nm

I.D. La dualité en ondes-particules

I. Particules, ondes et atomes

A. Masse, énergie et unité de mesure

1. La nomenclature des nuclides
2. Le gramme et la masse molaire atomique
3. L'unité de masse atomique
4. Énergie de masse

B. Les particules matérielles

1. L'électron
2. Le proton
3. Le neutron
4. Autres particules

C. Les rayonnements électromagnétiques ou photons

1. Représentation classique
2. Spectre des rayonnements
3. Représentation quantique

D. La dualité onde-particules

1. La relation d'Einstein
2. La relation de De Broglie

E. La structure électronique de l'atome

1. Le modèle planétaire de Rutherford
2. Le modèle de Bohr

I.D.1. La relation d'Einstein

« *Les ondes électromagnétiques peuvent être considérés comme de nature corpusculaire: les photons* »

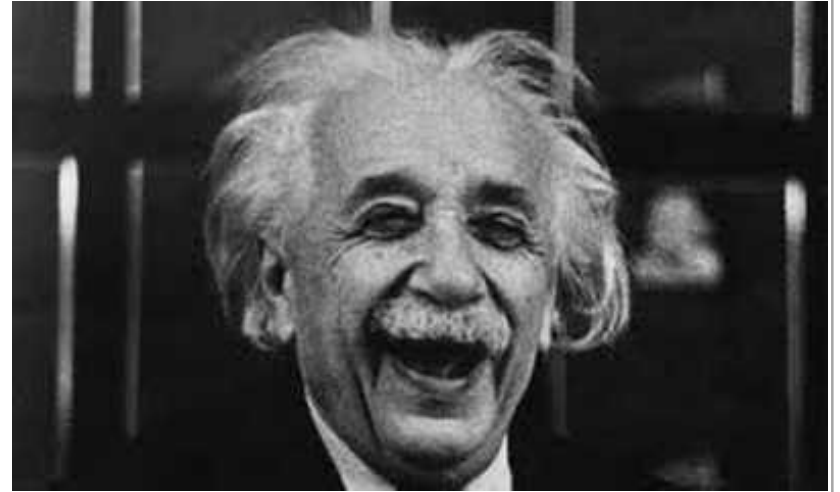
Les photons ont une masse exclusivement dynamique:

h : la constante de Planck

m : masse en Kg

c : vitesse de la lumière en $m.s^{-1}$

λ : longueur d'onde en m



$$m = \frac{h}{\lambda c}$$

I.D.2. la relation de De Broglie

Louis De Broglie montre que la relation d'Einstein vaut pour toutes les particules:

m: masse

λ : longueur d'onde

h: constante de Planck

v: vitesse



$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

« *L'électron est aussi une onde* »

I.D.2. Application

Soit le comportement ondulatoire d'un électron de vitesse $v = 2,5 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$. Quelle est sa longueur d'onde?

- A. $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}$
- B. $18 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
- C. $300 \text{ } \mu\text{m}$
- D. $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ nm}$
- E. $3 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$

I.D.2. Application

Correction: AE

A. $3 \cdot 10^{-12} \text{ m}$

~~B. $18 \cdot 10^{-11} \text{ m}$~~

~~C. $300 \mu\text{m}$~~

~~D. $1,8 \cdot 10^{-5} \text{ nm}$~~

E. $3 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 2,5 \cdot 10^8}$$

$$\gg 3 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ nm}$$

I.E. Structure électronique de l'atome

I. Particules, ondes et atomes

A. Masse, énergie et unité de mesure

1. La nomenclature des nuclides
2. Le gramme et la masse molaire atomique
3. L'unité de masse atomique
4. Énergie de masse

B. Les particules matérielles

1. L'électron
2. Le proton
3. Le neutron
4. Autres particules

C. Les rayonnements électromagnétiques ou photons

1. Représentation classique
2. Spectre des rayonnements
3. Représentation quantique

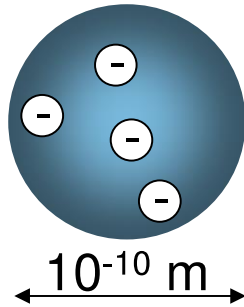
D. La dualité onde-particules

1. La relation d'Einstein
2. La relation de De Broglie

E. La structure électronique de l'atome

1. Le modèle planétaire de Rutherford
2. Le modèle de Bohr

I.E.1. Le modèle planétaire de Rutherford (1911)



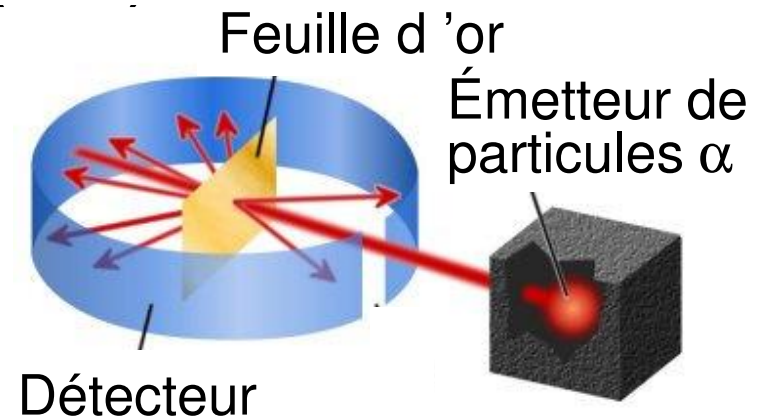
Ça c'est ce qu'on pensait avant...

L'expérience de Rutherford

Rutherford mitraille de particules alpha une feuille d'or entourée d'un détecteur.

Résultat: la plupart des particules finissent sur le détecteur.

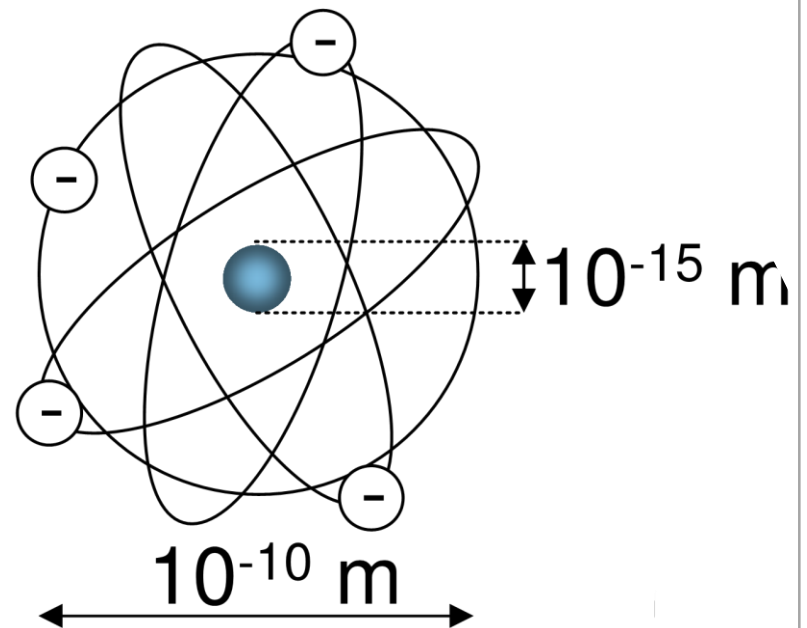
Interprétation: la matière est pleine de vide!



I.E.1. Le modèle planétaire de Rutherford

On déduit la structure de l'atome avec:

- La masse concentrée au niveau du noyau chargé +
- Un vide péri-nucléaire
- Les électrons chargés - gravitant à la périphérie du vide



I.E.2. Le modèle de Bohr

Il associe l'électron à une particule qui circule sur **orbite**.

L'orbite doit être compatible avec la **nature ondulatoire** de l'électron.

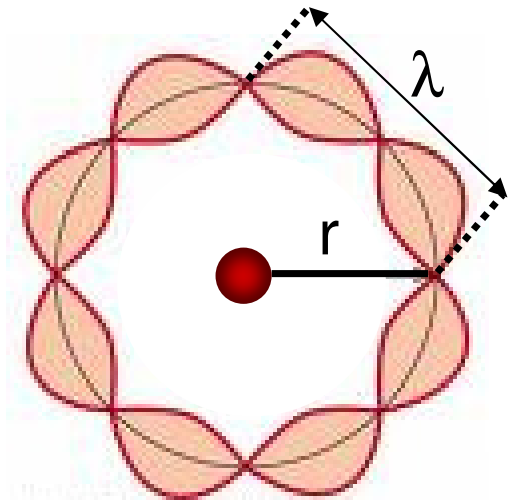
La circonférence de l'orbite (l) doit être un **multiple entier** de la **longueur d'onde λ** .

$$l = 2\pi r$$

$$l = n\lambda \quad n \text{ étant un entier naturel}$$

$$\text{On déduit } 2\pi r = n\lambda$$

r est donc quantifié



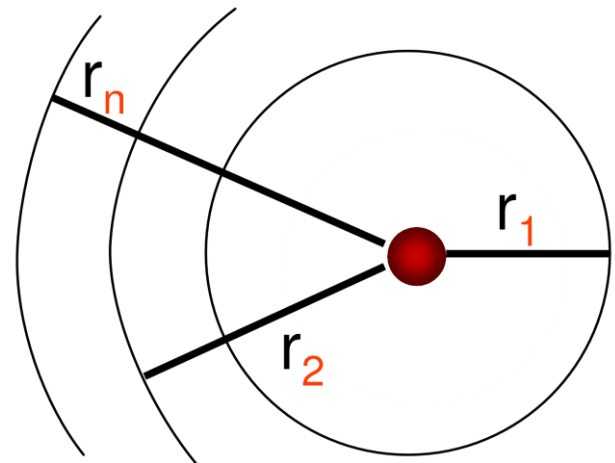
I.E.2. Le modèle de Bohr, conséquences

Les électrons sont situés sur des **orbites discrètes**.

L'orbite de l'électron définit son intensité de liaison au noyau.

L'énergie de liaison au noyau E_L

C'est l'énergie qu'il faut apporter à l'électron pour l'arracher de l'édifice atomique, hors de l'influence du noyau. Elle est toujours positive.



I.E.2. Le modèle de Bohr, conséquences

L'énergie de l'électron lui-même est négative, il est dans un puits d'énergie.

Exemple pour l'atome d'Hydrogène H_1

$$W_n = -13,6 \cdot \frac{1}{n^2}$$

n permet de quantifier le rayon de l'orbite de l'électron, l'énergie de l'électron dépend donc de cette orbite.

I.E.2. Le modèle de Bohr, conséquences

L'énergie de l'électron définit:

- Son orbite (r dépend directement de n)
- Son énergie de liaison: plus la couche est profonde et plus l'électron est lié au noyau.
 - On définit l'énergie de liaison E_L

$$E_L = |W_n|$$

Avec W_n , l'énergie de l'électron

I.E.2 Le modèle de Bohr, état fondamental / état excité.

L'état fondamental

À l'état fondamental, les électrons occupent toujours les couches les plus basses avant les autres.

Pour passer d'une couche à l'autre l'électron a besoin d'un quantum d'énergie.

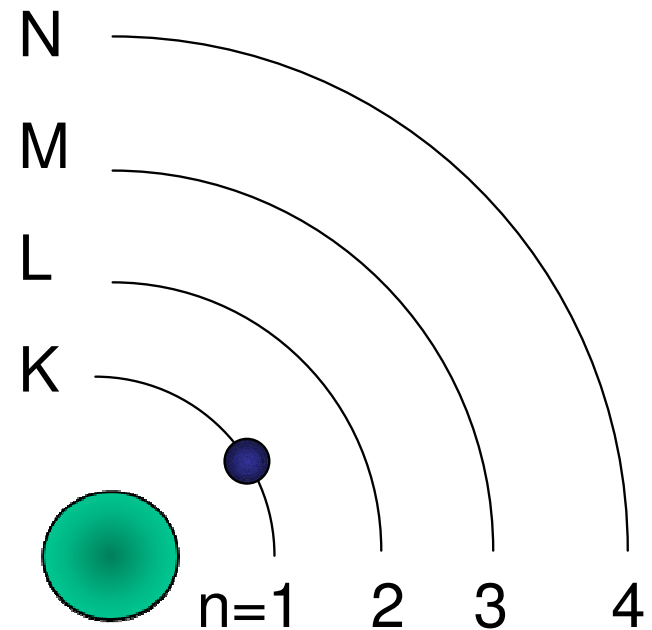
Ce quantum permet d'augmenter l'énergie de l'électron (elle devient moins négative) et donc de diminuer l'énergie de liaison. L'électron peut passer sur une couche plus périphérique. L'atome est dit « excité »

I.E.2. État fondamental, état excité

Exemple de l'Hydrogène H_1

À l'état fondamental, l' e^- occupe la couche K correspondant à W_1 , l'énergie de liaison maximale.

Pour passer à l'état excité, l' e^- doit absorber une énergie quantifiée.



I.E.2. L'énergie de l'électron, généralisation à un nombre Z d' e^-

Théoriquement,

$$W_n = -13,6 \cdot \frac{Z^2}{n^2}$$

En réalité, le cortège électronique modifie l'interaction électron-noyau par un « **effet écran** », pour en tenir compte:

Avec σ , la
constante
d'écran

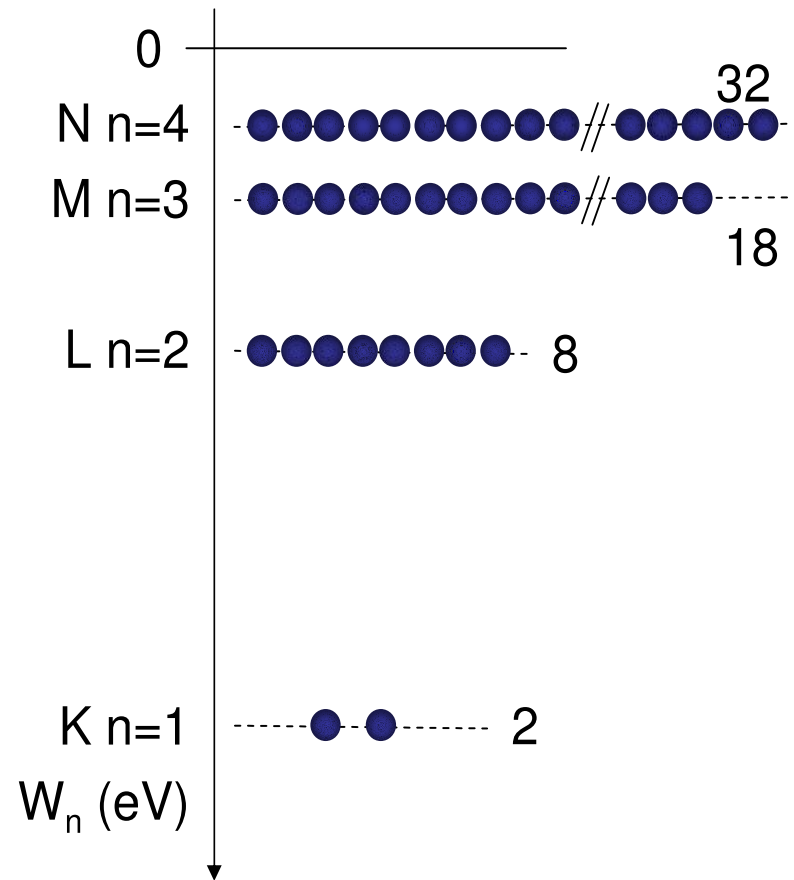
$$W_n = -13,6 \cdot \frac{(Z - \sigma)^2}{n^2}$$

I.E.2. Remplissage des couches

Remplissage des couches

Le nombre maximum d'électrons par couche:

$$2n^2$$



I.E.2. Application

QCM du concours 2004-2005

Quelle est l'énergie de l'électron (en eV) de la couche M (modèle de Bohr) du fer ($Z=26$) sachant que la constante d'écran est égale à 20,24?

A. -1021

B. - 451

C. - 50

D. - 23

E. - 9

I.E.2 Application

Correction: C

La couche M $\rightarrow n=3$

$$W_M = -13,6 \cdot \frac{(Z - S)^2}{n^2} = -13,6 \cdot \frac{(26 - 20,24)^2}{3^2} \gg -50 \text{ eV}$$

II.A. Interaction élémentaire

II. Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interaction élémentaire

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Émission d'énergie
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation des photons dans la matière
2. Les mécanismes d'atténuation
3. Les autres interactions
4. Probabilité et matière traversée

C. Interaction des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

II.A.1. Absorption d'énergie par l'atome

Un rayonnement est une forme de **transport d'énergie**.

Il peut interagir avec la matière, le plus souvent avec le **cortège électronique de l'atome**.

L'énergie du rayonnement sera **absorbée** par l'atome entraînant une **ionisation** ou une **excitation**.

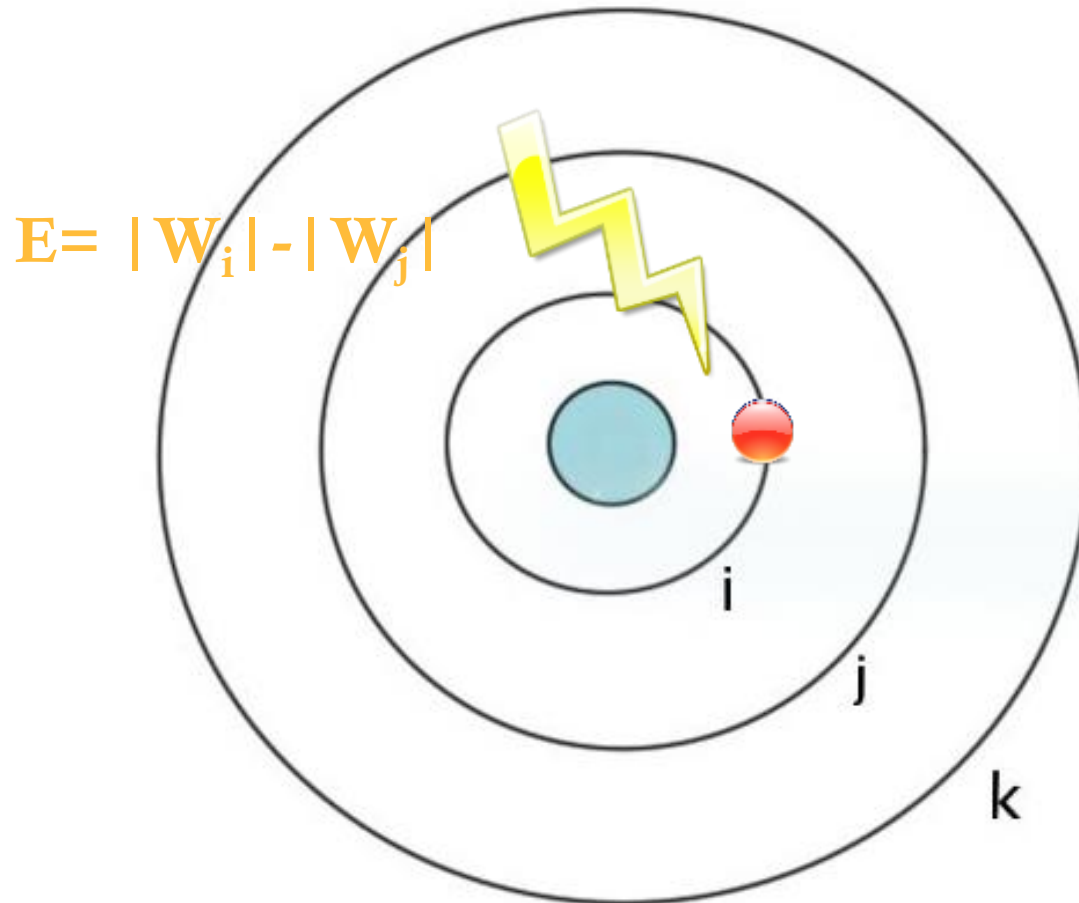
II.A.1 Absorption d'énergie par l'atome: excitation

C'est lorsque l'énergie du photon est inférieure à l'énergie de liaison $|W_i|$ de l'électron de la couche i.

Si l'énergie du photon est exactement égale à la différence d'énergie entre les couches i et j telle que:

$$E = h\nu = |W_i| - |W_j|$$

II.A.1 Absorption d'énergie par l'atome: excitation



II.A.1 Absorption d'énergie par l'atome: ionisation

C'est lorsque l'énergie du photon est supérieure ou égale à l'**énergie de liaison** $|W_i|$ de l'électron de la couche i .

$$E = h\nu \geq |W_i|$$

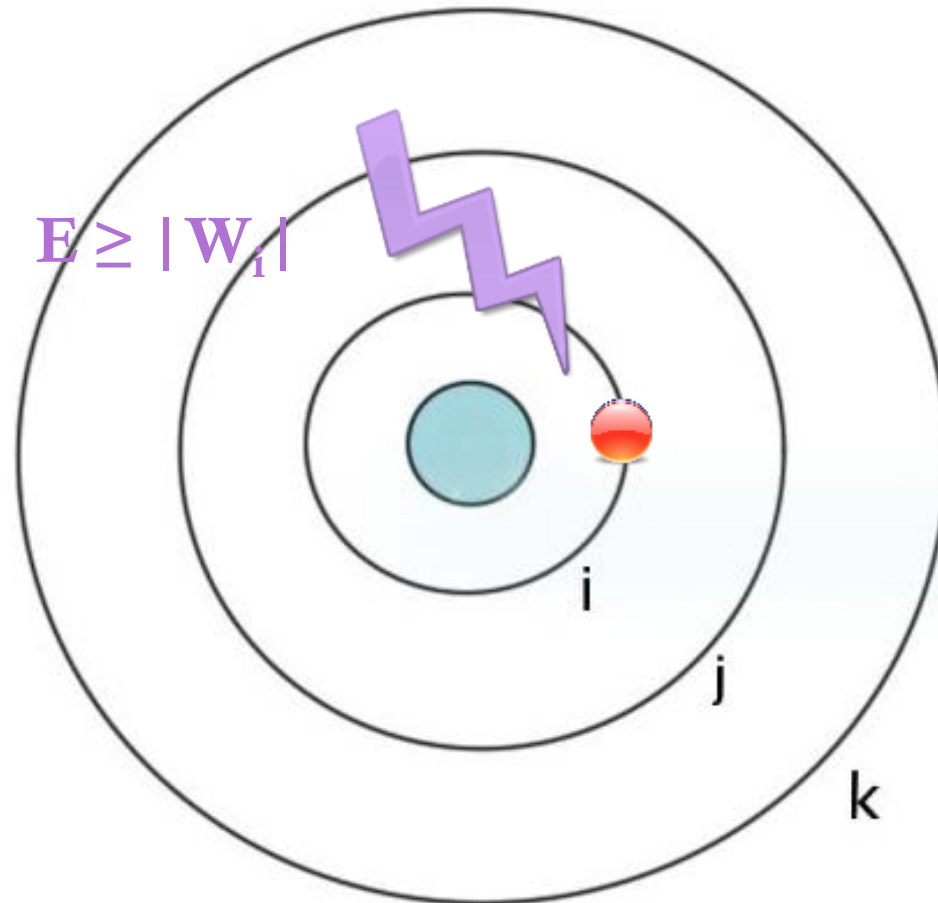
L'électron de la couche i est expulsé de la structure électronique de l'atome.

II.A.1 Absorption d'énergie par l'atome: ionisation

Lorsque l'énergie du photon est strictement supérieure à l'énergie de liaison de la couche i , l'excès d'énergie est emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique T :

$$T = E - |W_i|$$

II.A.1 Absorption d'énergie par l'atome: ionisation

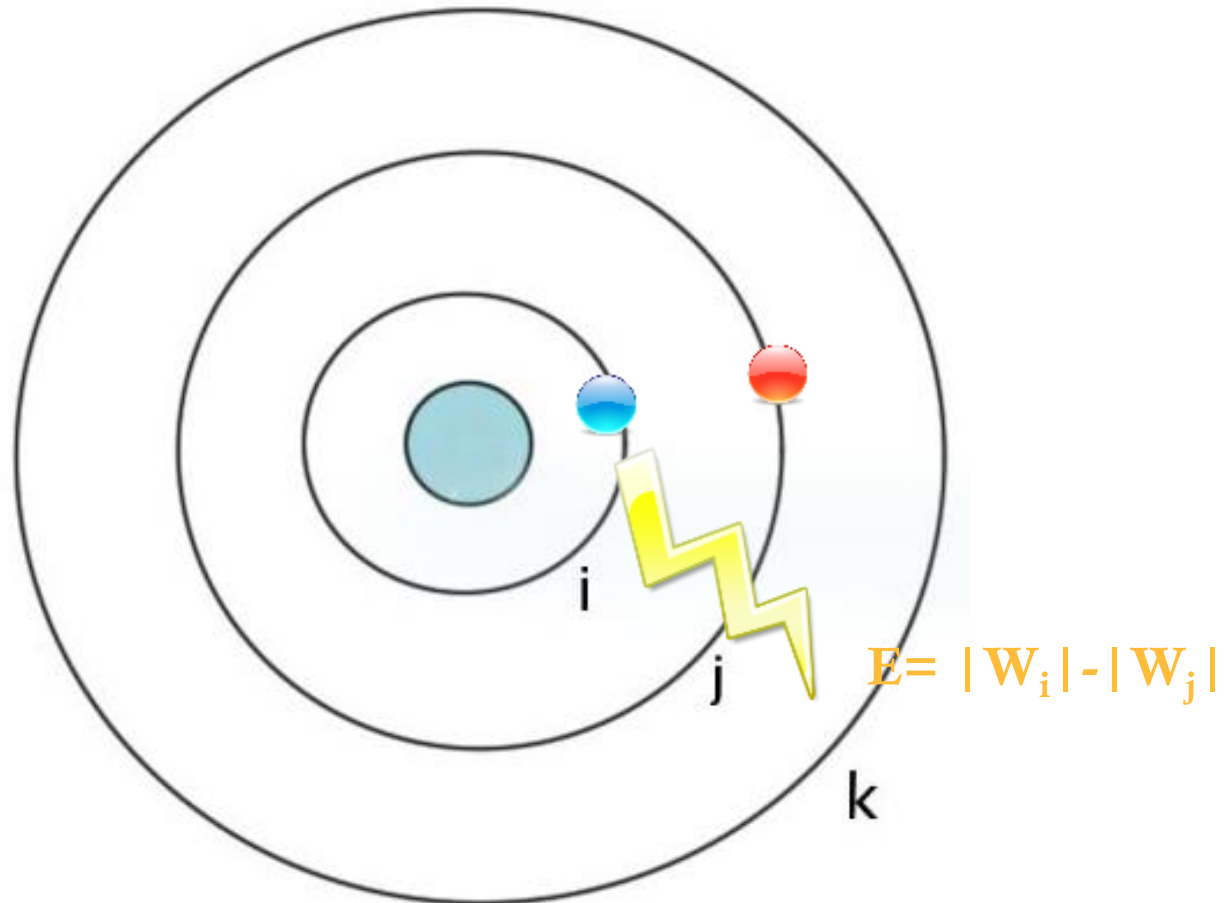


II.A.2. Restitution d'énergie

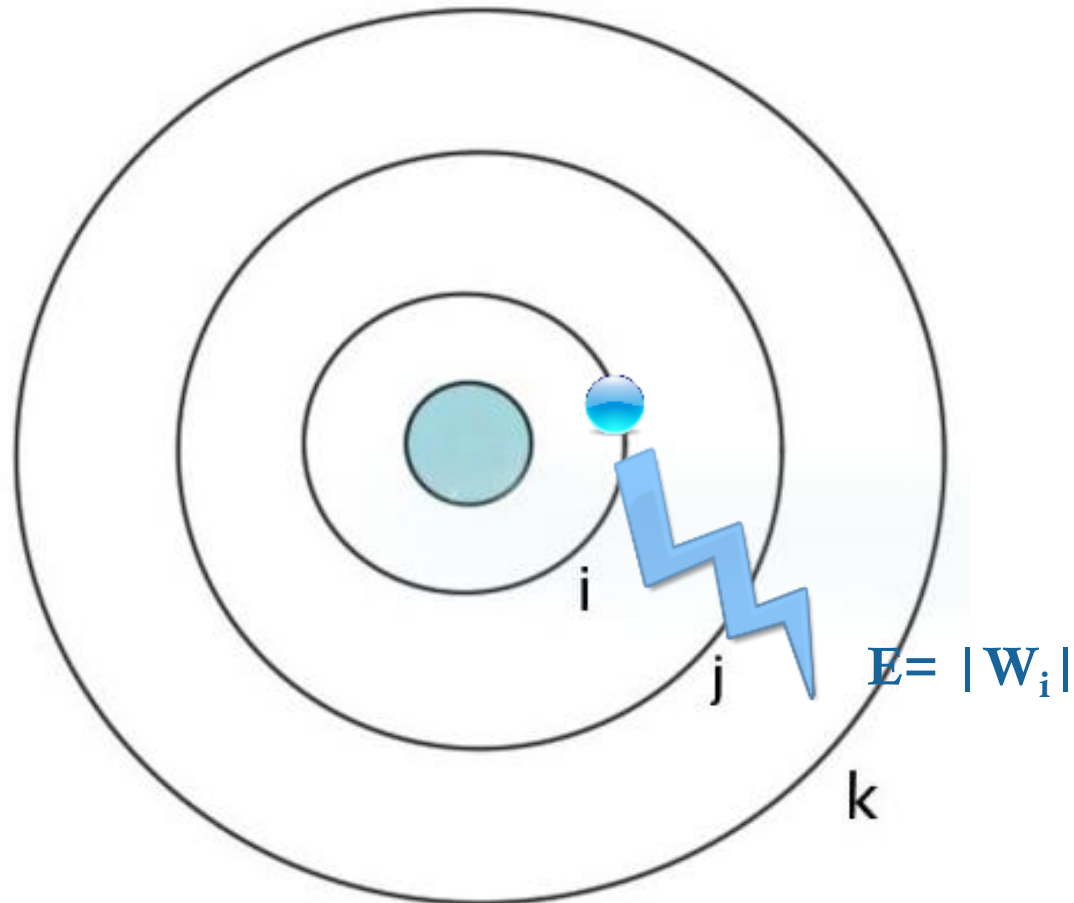
L'atome doit retrouver son état fondamental, pour cela il restitue son excès d'énergie.

Cette restitution d'énergie se fait par émission de fluorescence qui peut être suivie par émission d'électron(s) Auger.

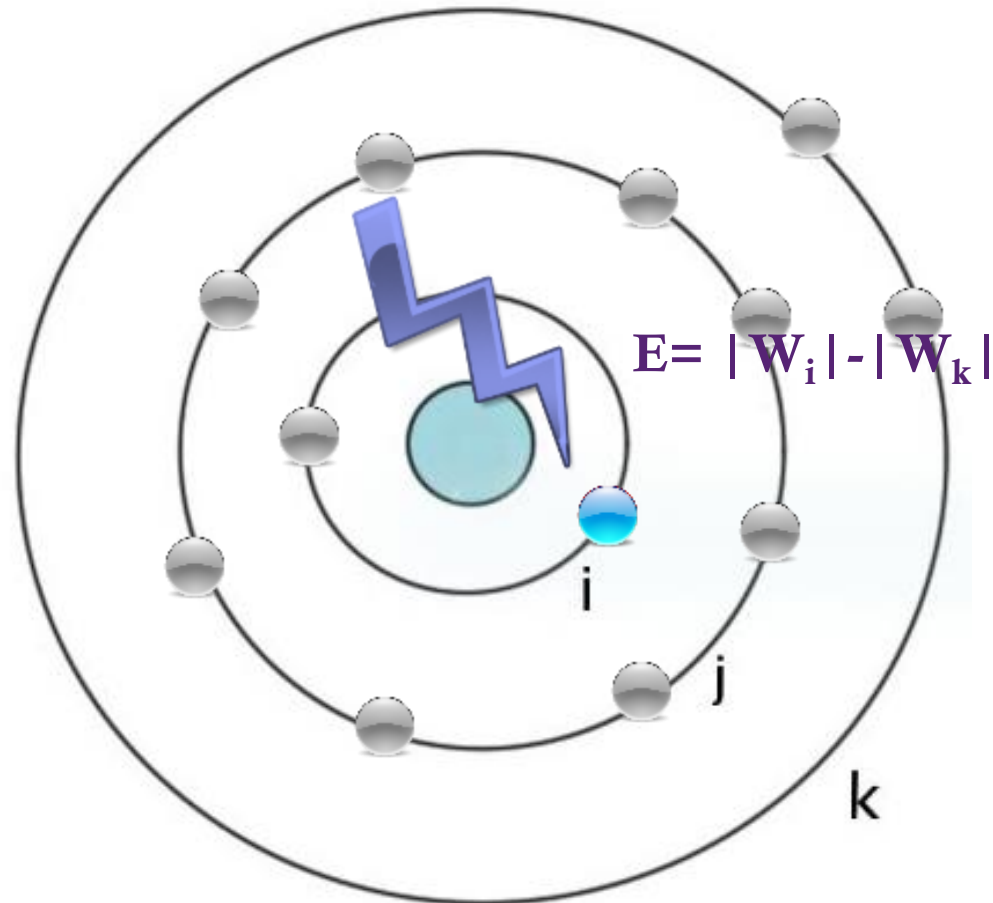
II.A.2. Restitution par émission de fluorescence: *après une excitation*



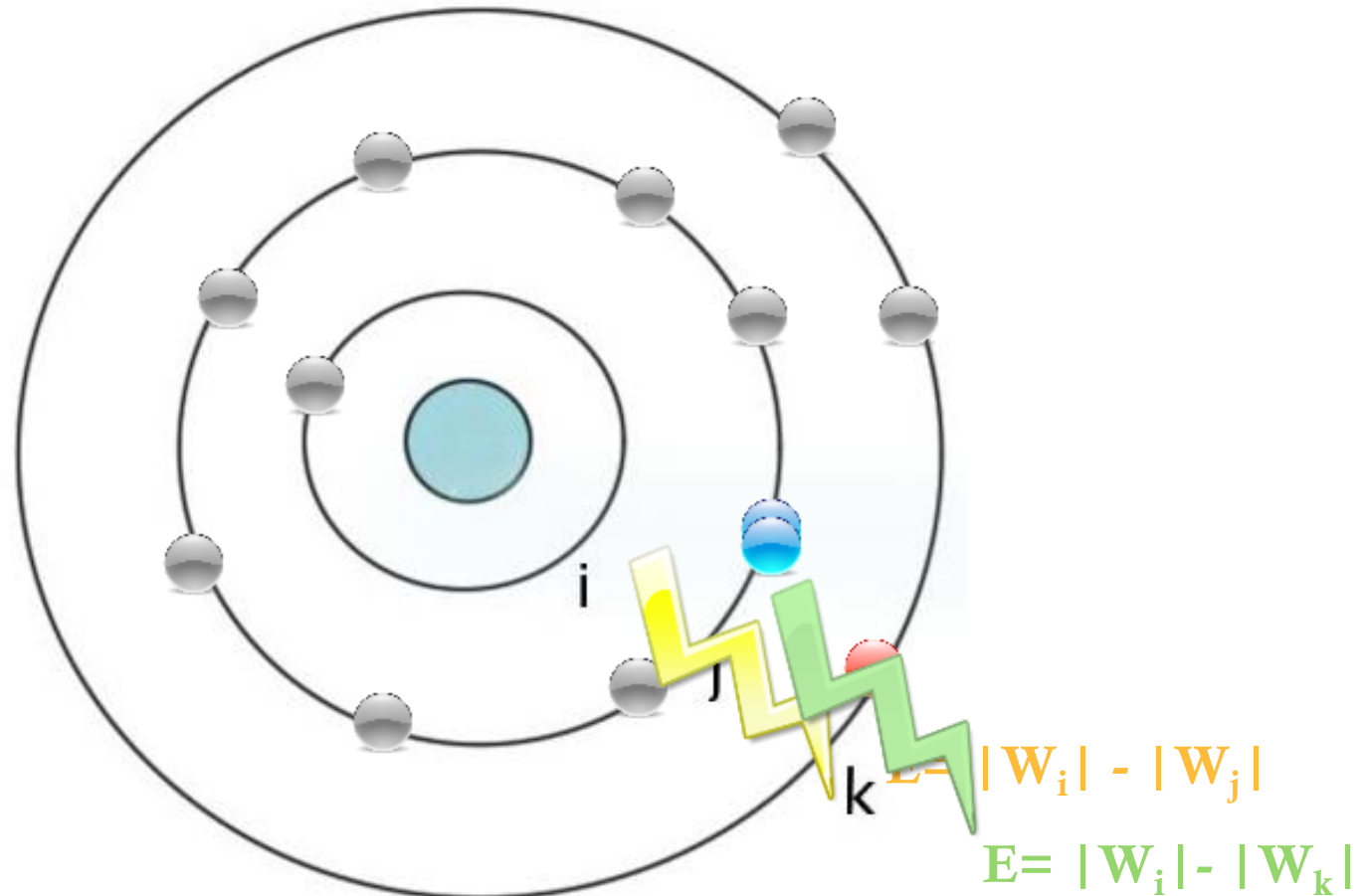
II.A.2. Restitution par émission de fluorescence: *après une ionisation*



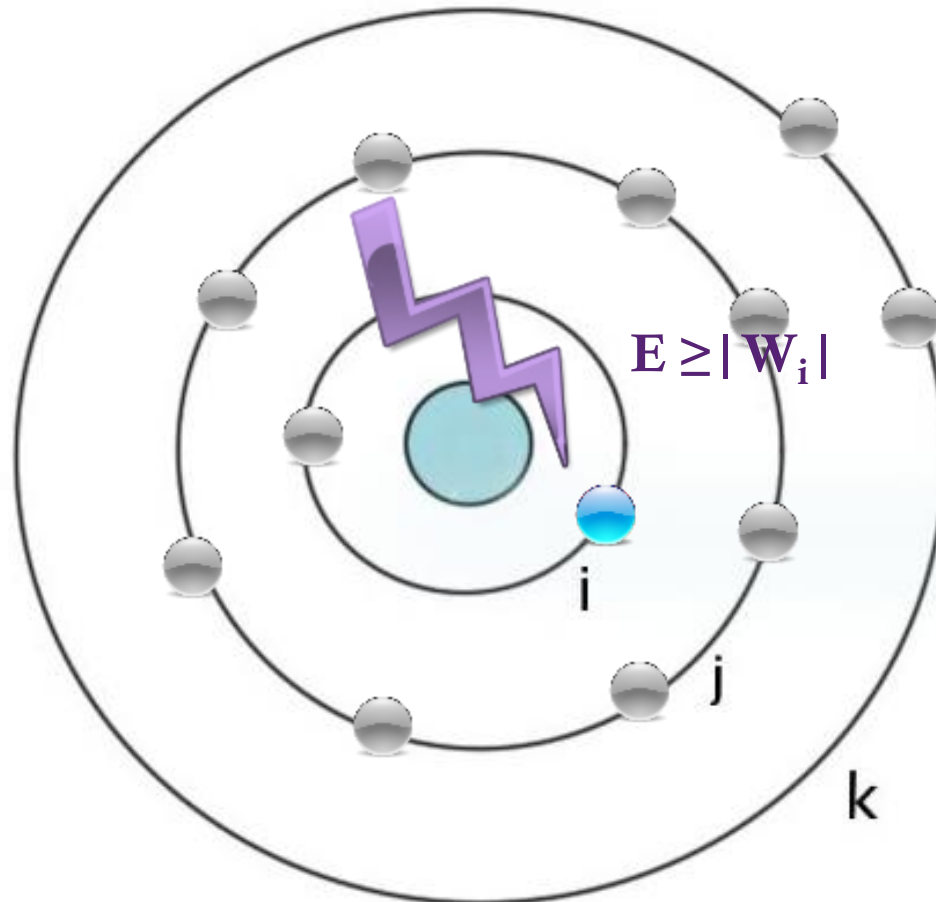
II.A.2 Excitation suivie de réarrangements successifs



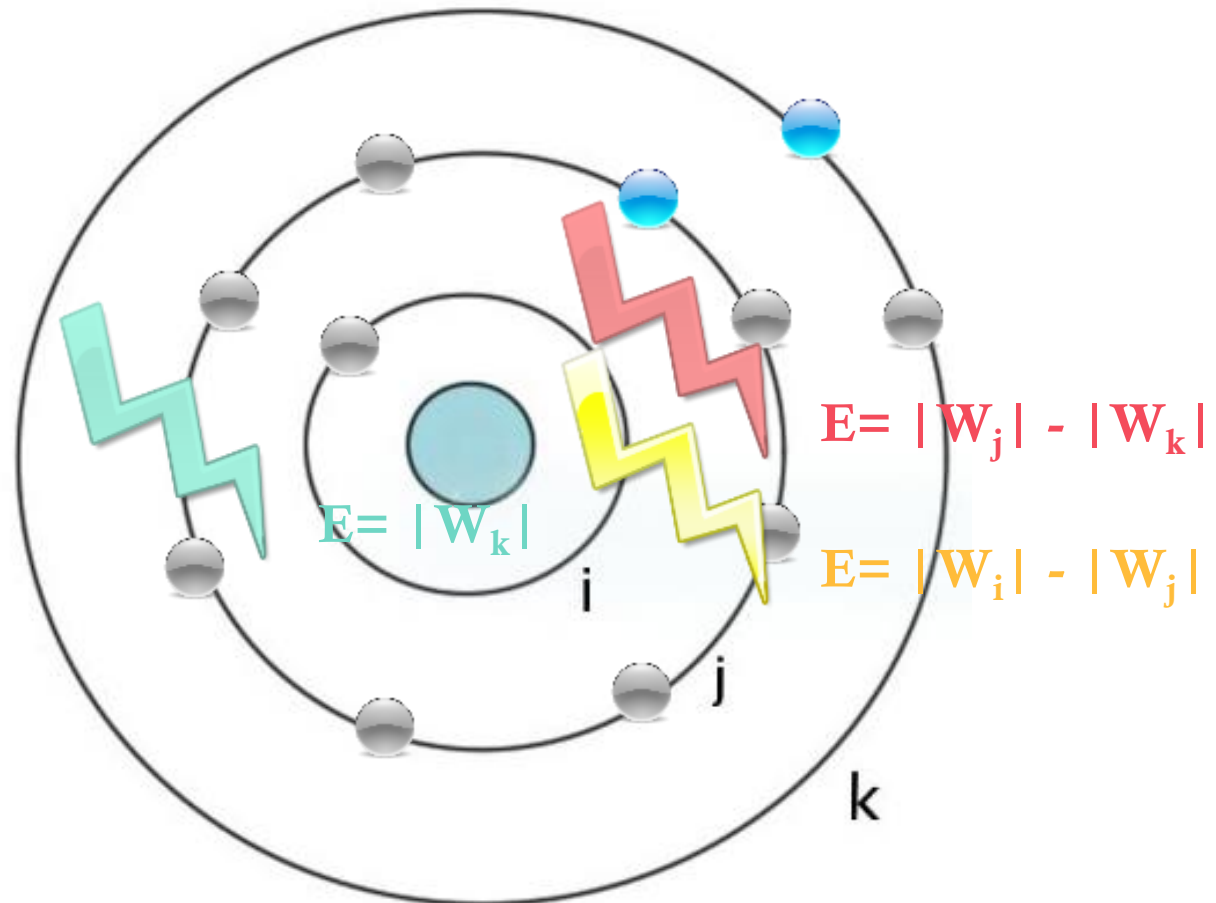
II.A.2 Excitation suivie de réarrangements successifs



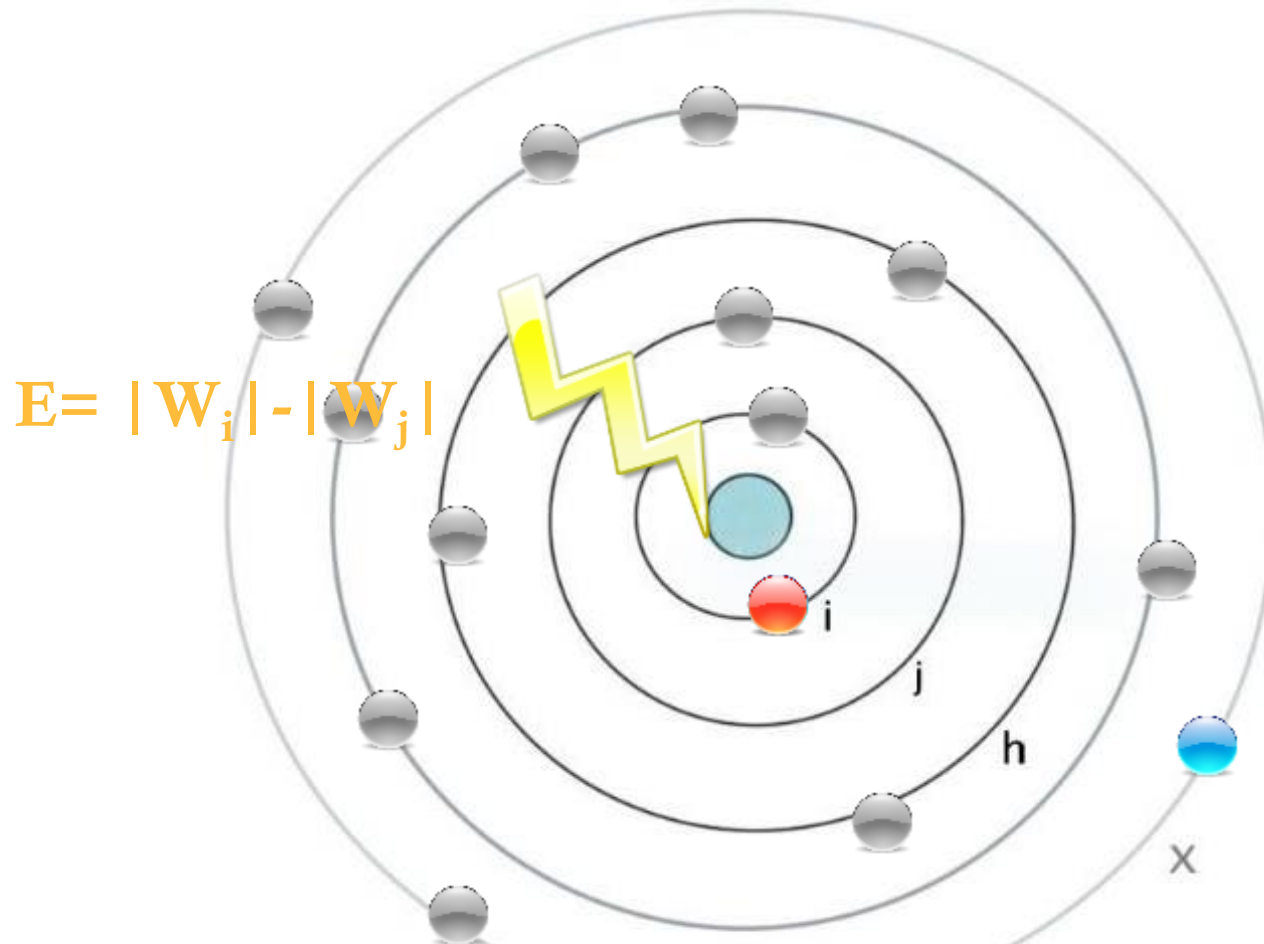
II.A.2 Ionisation suivie de réarrangements successifs



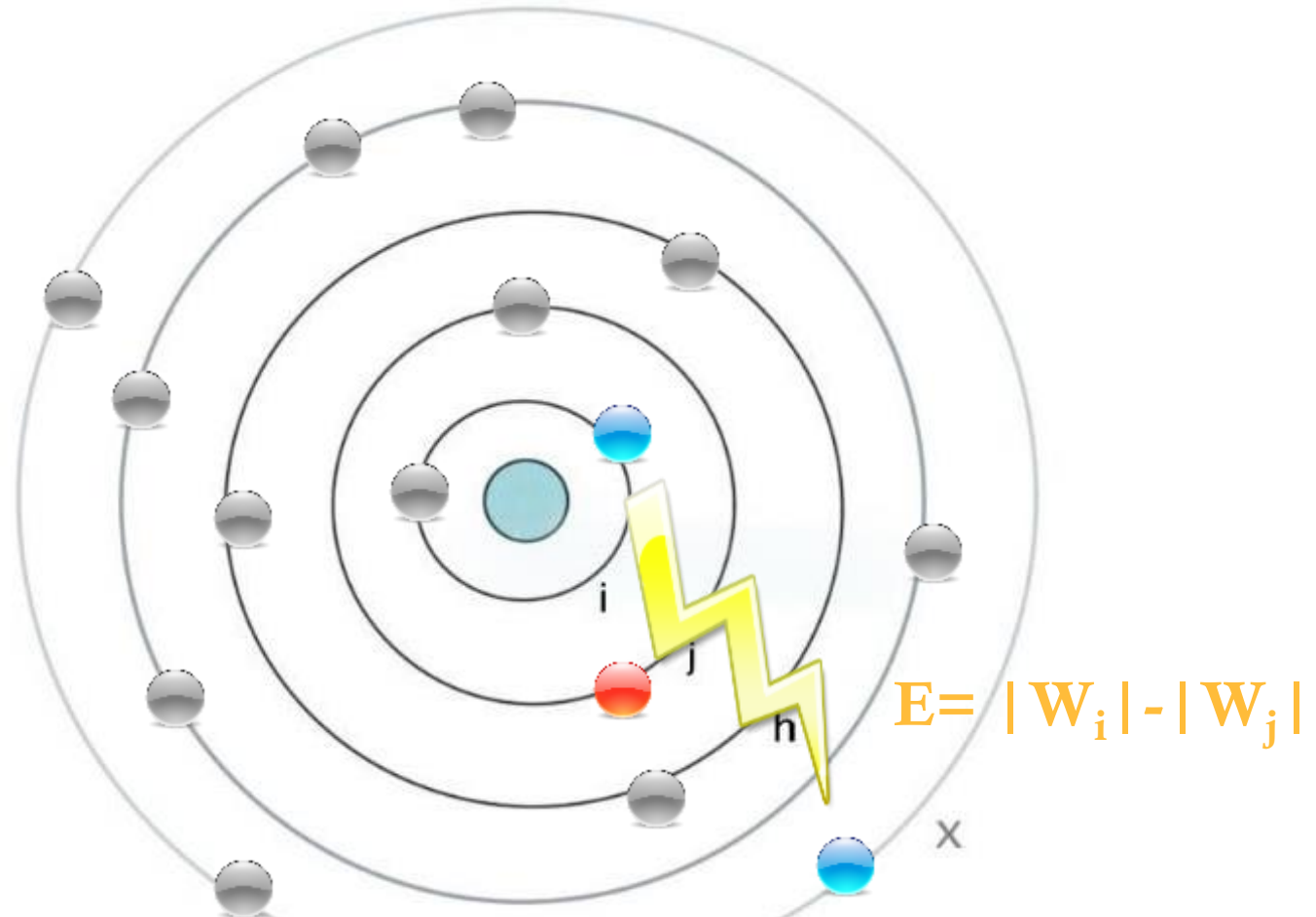
II.A.2 Ionisation suivie de réarrangements successifs



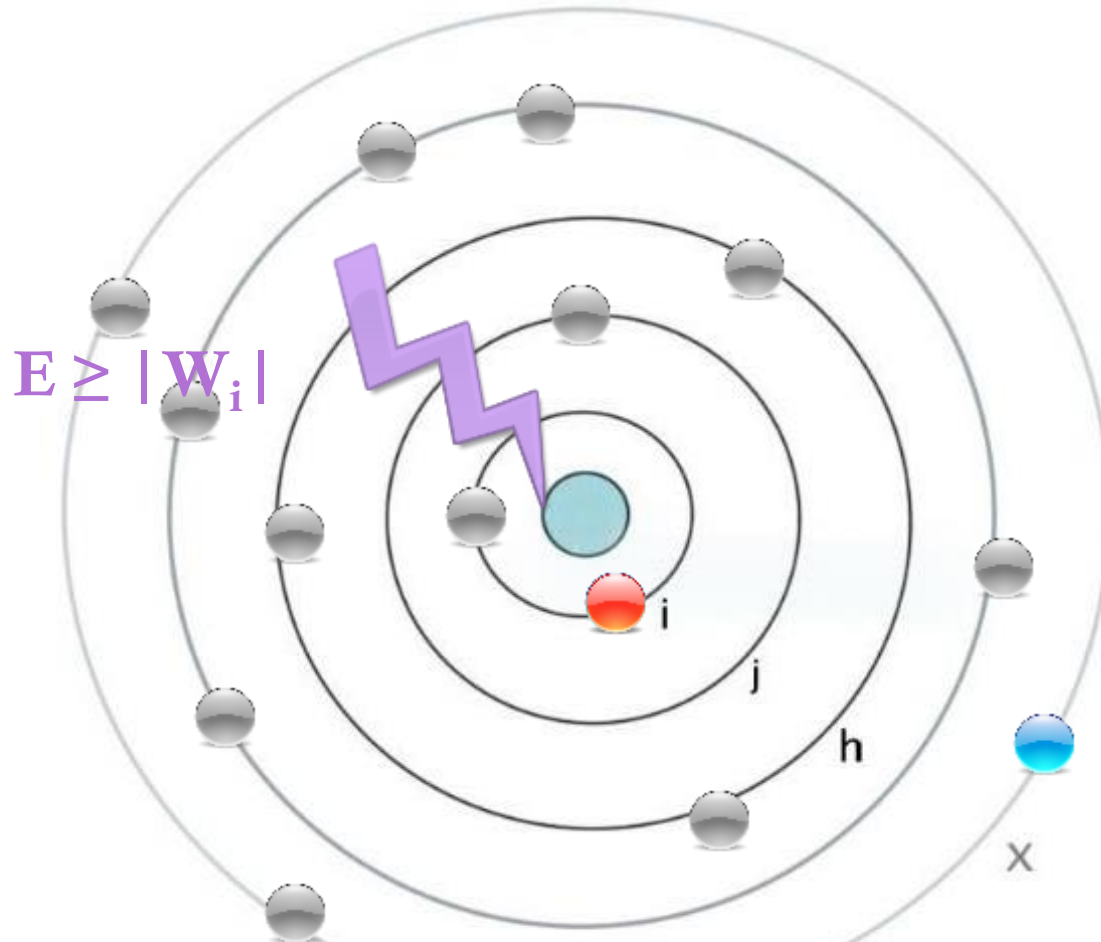
II.A.2 Émission d'un électron Auger: *après une excitation*



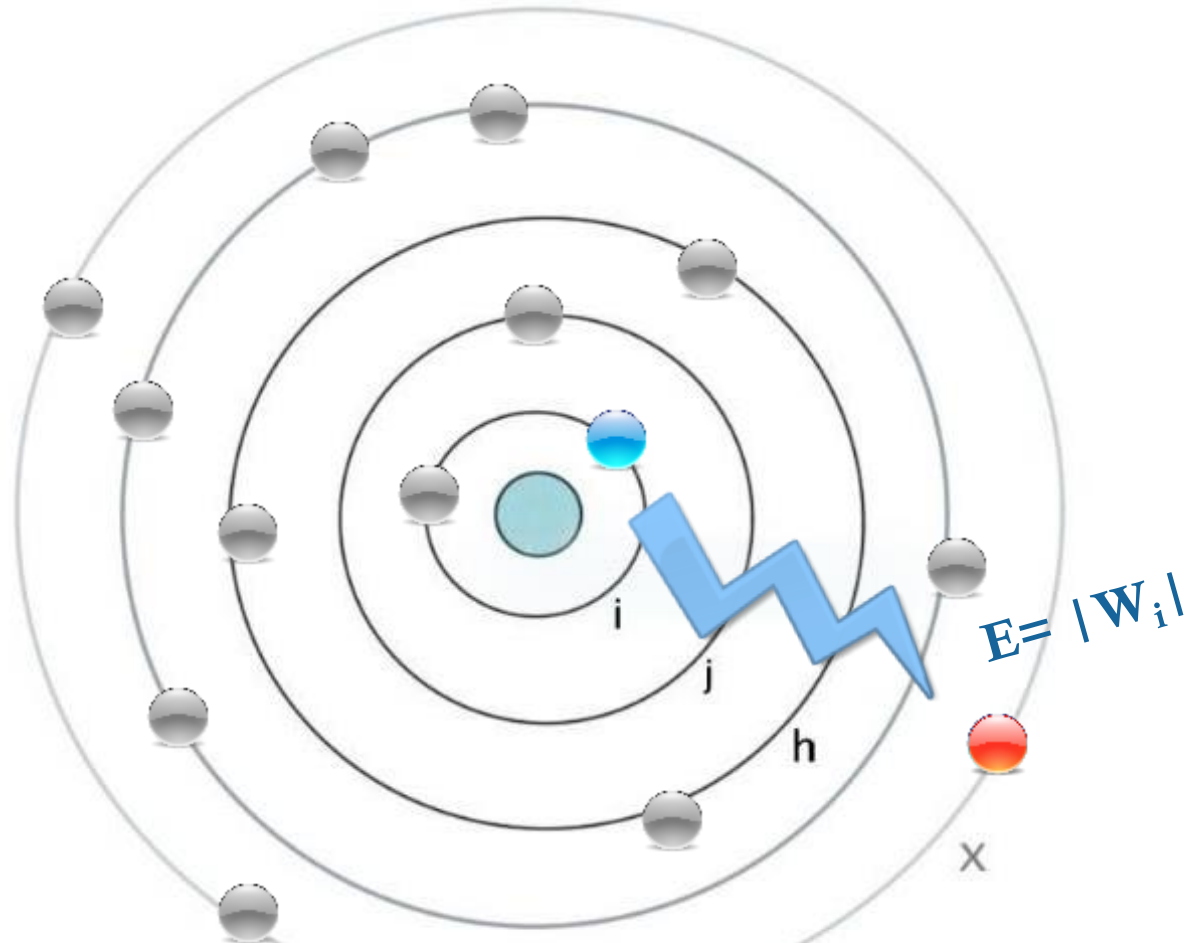
II.A.2 Émission d'un électron Auger: *après une excitation*



II.A.2 Émission d'un électron Auger: *après une ionisation*



II.A.2 Émission d'un électron Auger: *après une excitation*



II.A.2 Émission d'un électron Auger: *conclusion*

L'émission d'électrons Auger concerne le plus souvent:

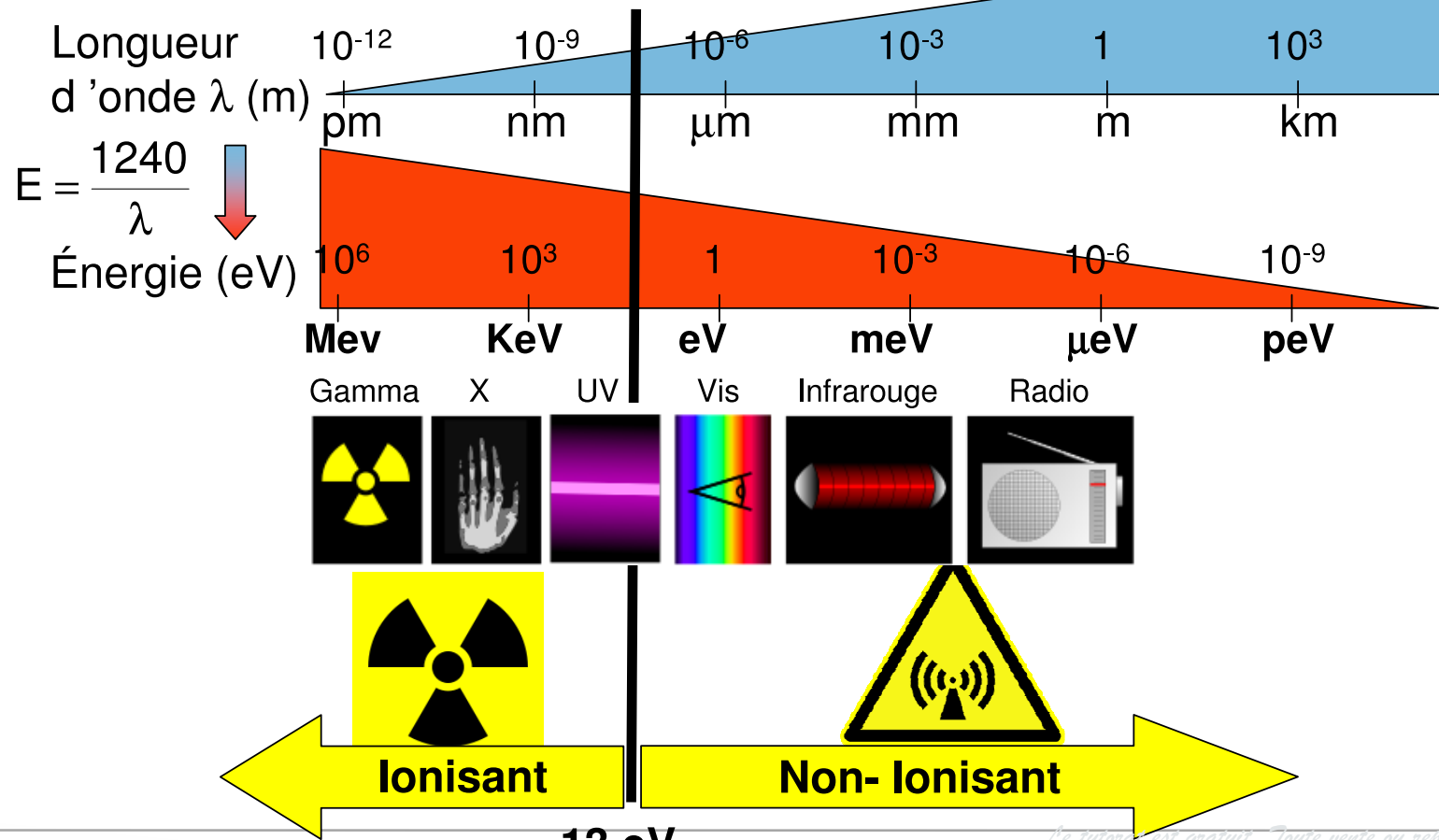
- Les électrons périphériques
- Les atomes légers

II.A.3 les rayonnements ionisants

Ce sont des **rayonnements électromagnétiques** ou **corpusculaire** capables de produire directement ou indirectement des ions, lors de leur passage à travers les atomes et les molécules.

II.A.3 les rayonnements ionisants

■ Spectre des rayonnements électromagnétiques



II.B. Interaction des photons

II. Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interaction élémentaire

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Émission d'énergie
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation des photons dans la matière
2. Les mécanismes d'atténuation
3. Les autres interactions
4. Probabilité et matière traversée

C. Interaction des rayonnements particuliers

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

II.B.1 Loi d'atténuation des photons dans la matière

On considère $N(0)$ photons mono-énergétiques qui traversent une épaisseur x de matériau. On cherche à savoir de façon probabiliste:

- ◆ Le nombre de photons absorbés par la matière
- ◆ Le nombre de photons qui la traversent

II.B.1. Loi d'atténuation des photons dans la matière.

Soit $N(x)$ le nombre de photons transmis; ce sont ceux qui n'ont pas interagi avec la matière:

$$N(x) = N(0) \cdot e^{-\mu x}$$

$N(0)$: nombre de photons initial

μ : coefficient linéique d'atténuation [m^{-1}],

- il représente la probabilité d'interaction avec la matière par unité de longueur.
- il dépend de l'état du milieu

II.B.1. Loi d'atténuation: *la couche de demie-atténuation (CDA)*

Définition: elle correspond à l'épaisseur x qui diminue le flux de photons d'un facteur 2.

$$N(x) = N(0) \cdot e^{-\mu x}$$

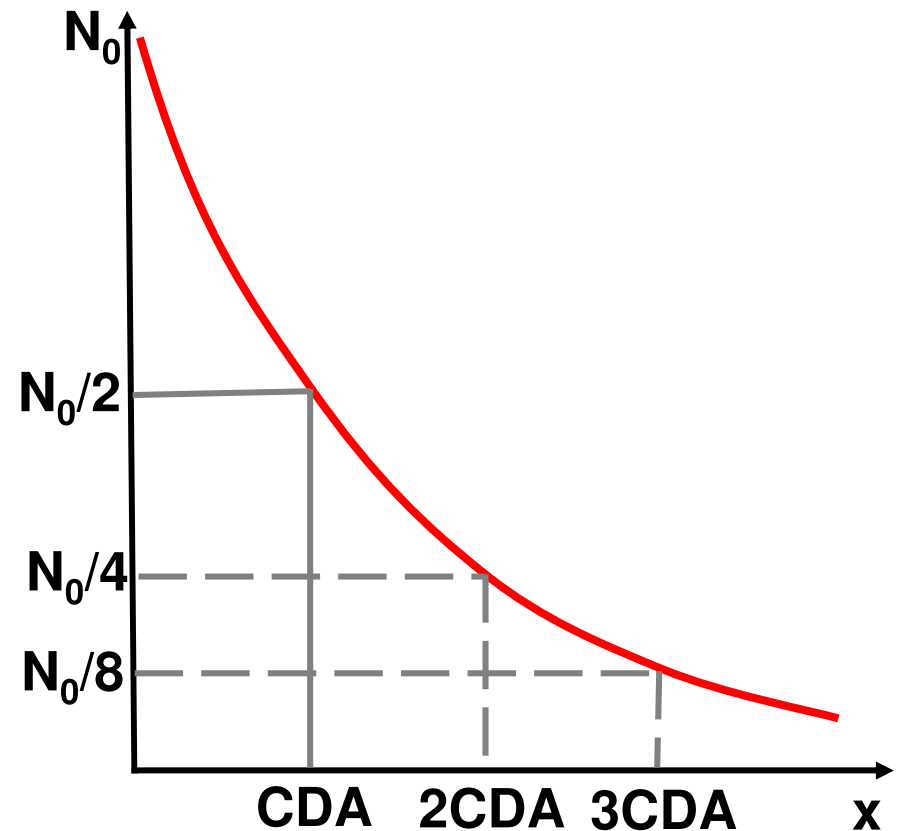
$$N(1CDA) = N(0) \cdot e^{-\mu CDA} = \frac{N(0)}{2}$$

II.B.1. Loi d'atténuation: *la couche de demie-atténuation (CDA)*

Le nombre de CDA permet de déterminer le nombre de photons qui traversent le matériau:

$$N(k.CDA) = \frac{N(0)}{2^k}$$

À chaque CDA ajoutée on divise par 2 le nombre de photon du faisceau.



II.B.1. Loi d'atténuation: *la couche de demie-atténuation (CDA)*

Épaisseur x	$N(X)/N(0)$	%
1 CDA	$\frac{1}{2}$	50
2 CDA	$(\frac{1}{2})^2$	25
3 CDA	$(\frac{1}{2})^3$	12,5
10 CDA	$(\frac{1}{2})^{10}$	0,1
n CDA	$(\frac{1}{2})^n$	

On considère que l'atténuation est totale au bout de
10 CDA +++

II.B.2. Les mécanismes d'atténuation: *l'effet photoélectrique*

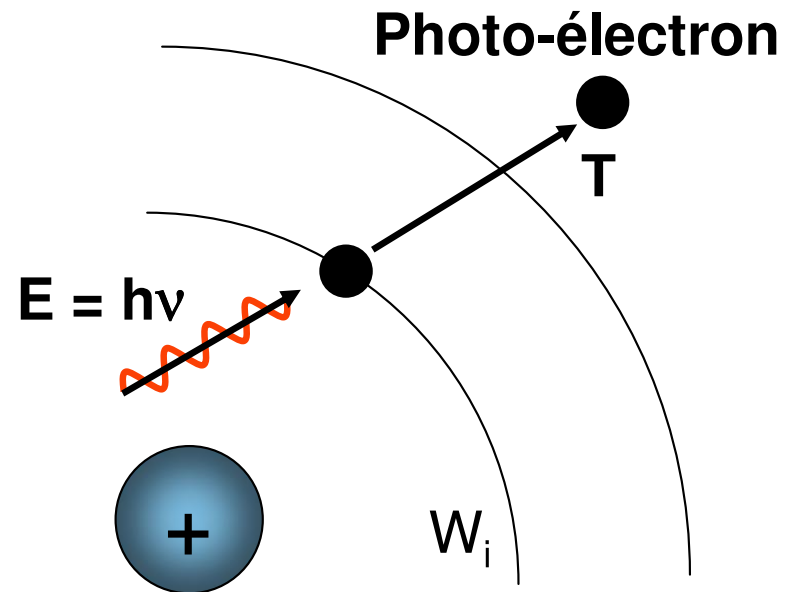
L'effet photoélectrique

Définition: transfert de la totalité de l'énergie $E = h\nu$ d'un photon incident à un électron des atomes de la matière.

Le photoélectron est expulsé de l'atome qui est alors **ionisé**.

Il part avec une énergie cinétique

$$T = E - |W_i|$$



II.B.2. Les mécanismes d'atténuation: *l'effet photoélectrique*

Conséquence de l'effet photoélectrique

- ◆ L'atome retourne à son état fondamental par émission de photons de fluorescence et d'électron(s) Auger.
- ◆ L'électron ionisé perd son énergie cinétique T par ionisations successives.

La totalité de l'énergie est absorbée par la matière

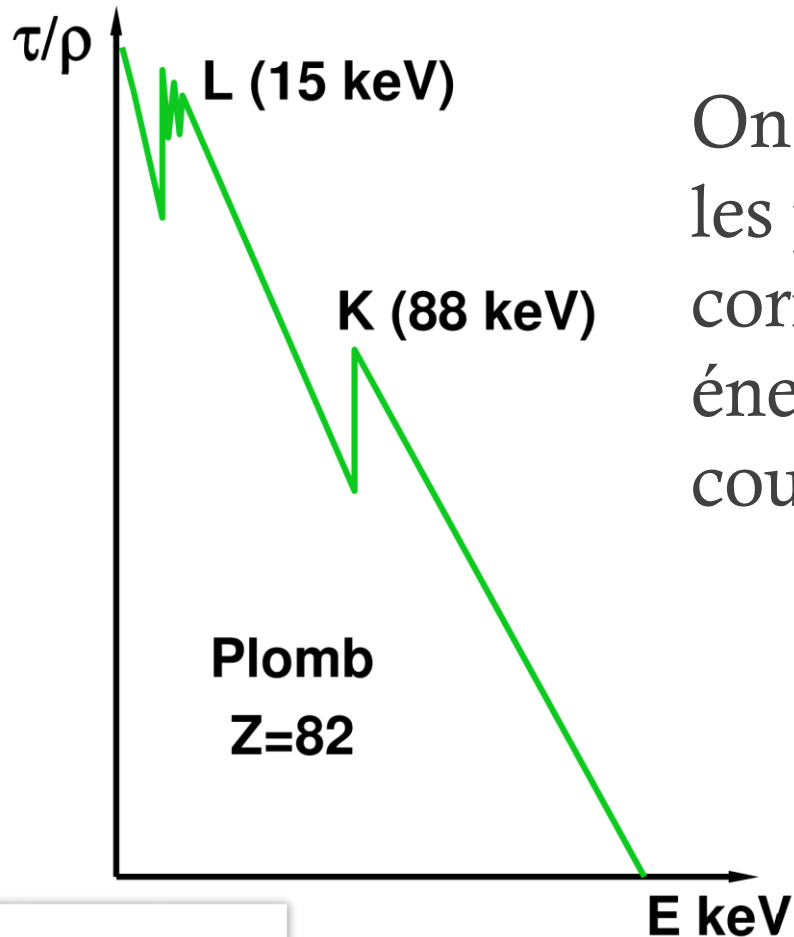
II.B.2 Les mécanismes d'atténuation: *l'effet photoélectrique*

La probabilité d'interaction par effet photoélectrique est :

$$\frac{t}{r} = k' \frac{Z^3}{(hn)^3}$$

La probabilité est donc maximum pour les photons de faible énergie et les éléments lourds.

II.B.2 Les mécanismes d'atténuation: *l'effet photoélectrique*



On observe des pics pour les photons d'énergie correspondant aux énergies de liaison des couches K et L.

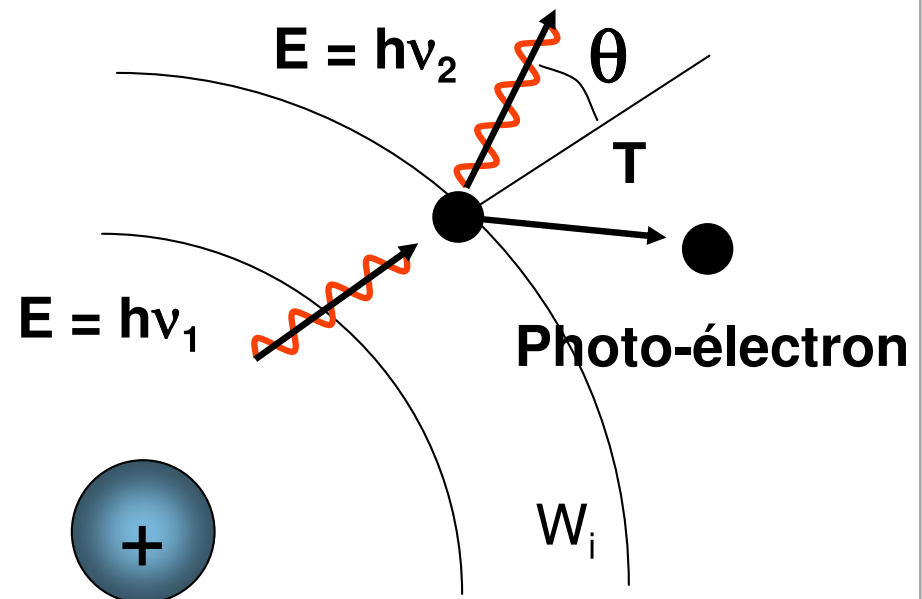
II.B.2 Les mécanismes d'atténuation: *l'effet Compton*

L'effet Compton

Définition: transfère d'une partie de l'énergie $E = h\nu$ d'un photon incident à un électron des atomes de la matière.

Le photoélectron est expulsé de l'atome qui est alors **ionisé**.

L'énergie restante est diffusée sous forme d'un nouveau photon $h\nu_2$.



Le photoélectron part avec une énergie cinétique

$$T = E - |W_i| - h\nu_2$$

II.B.2 Les mécanismes d'atténuation: *l'effet Compton*

Conséquences de l'effet Compton

- ◆ L'atome retourne à son état fondamental par émission de photons de fluorescence et d'électron(s) Auger.
- ◆ L'électron ionisé perd son énergie cinétique T par ionisations successives: elle est absorbée.
- ◆ Un photon $h\nu_2$ est diffusé.

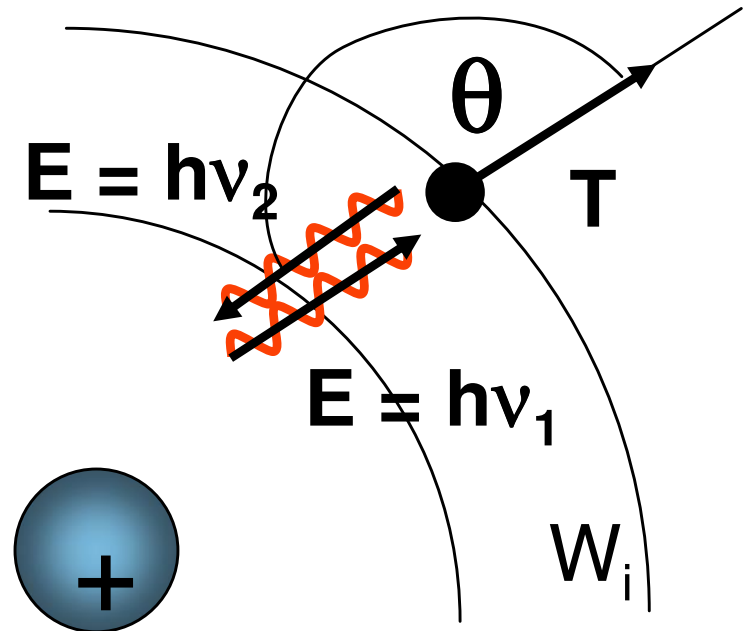
II.B.2 Les mécanismes d'atténuation: *l'effet Compton*

Effet du choc du photon incident sur l'énergie cinétique

Choc frontal

lorsque $\theta = \pi$

L'électron est percuté de plein fouet et part avec une énergie cinétique T maximale.



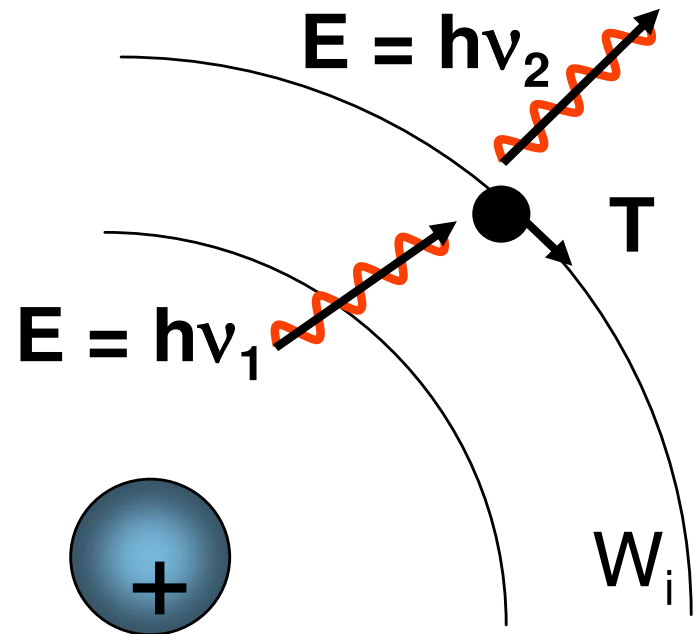
II.B.2 Les mécanismes d'atténuation: *l'effet Compton*

Effet du choc du photon incident sur l'énergie cinétique

Choc tangentiel

lorsque $\theta = 0$

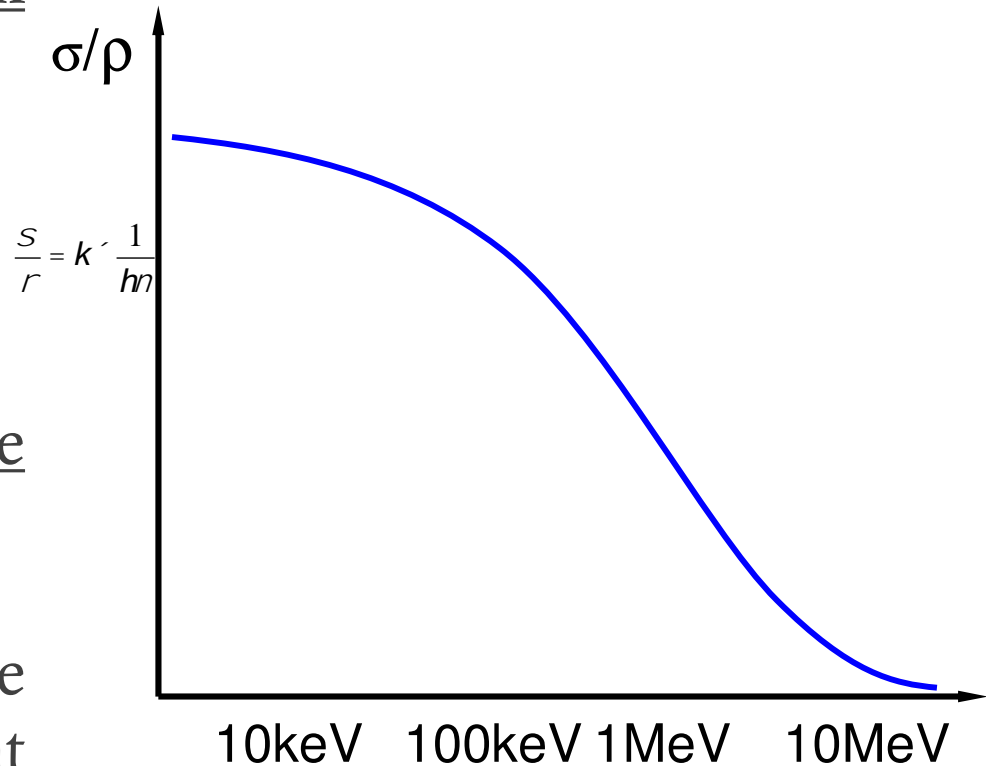
L'électron est frôlé et part avec une énergie cinétique T minimale.



II.B.2 Les mécanismes d'atténuation: *l'effet Compton*

La probabilité d'interaction par effet Compton est:

$$\frac{S}{r} = k' \frac{1}{hn}$$



Elle est presque indépendante de la nature de la matière.

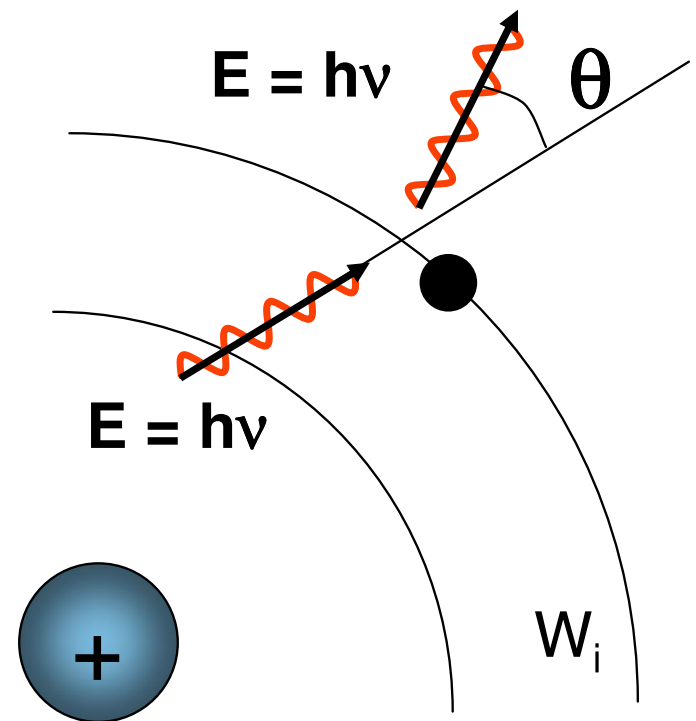
Elle augmente lorsque **l'énergie du photon** incident diminue.

II.B.3 Autres types d'interaction: *la diffusion de Thomson-Rayleigh*

La diffusion de Thomson-Rayleigh

Définition: Changement de direction du photon incident sans transfert d'énergie.

Il n'y a pas d'atténuation du rayonnement ici.



II.B.3 Autres types d'interaction: *la diffusion de Thomson-Rayleigh*

La probabilité de diffusion de Thomson-Rayleigh est:

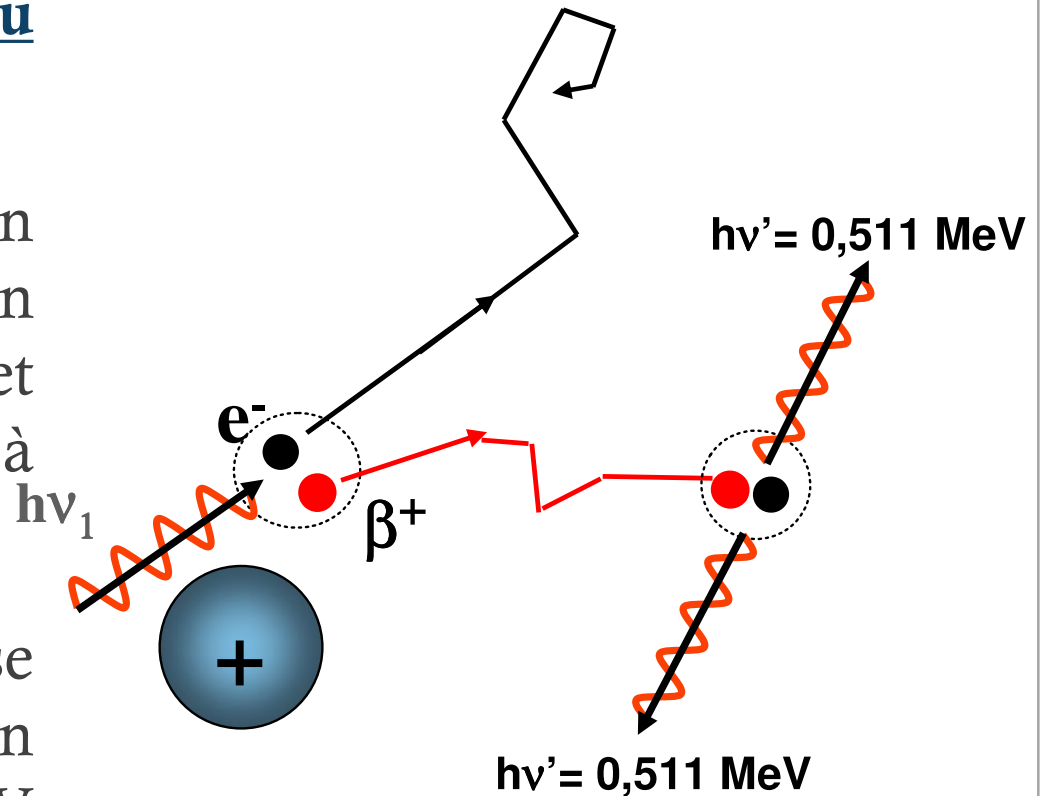
- ◆ Importante pour les photons de faible énergie (IR, UV, visibles)
- ◆ Négligeable pour les photons très énergétiques: γ et X.

II.B.3 Autre type d'interaction: *la création de paire*

La création de paire ou matérialisation

Définition: transformation de l'énergie d'un photon en 2 particules (un électron et un positon) lorsqu'il passe à proximité d'un noyau.

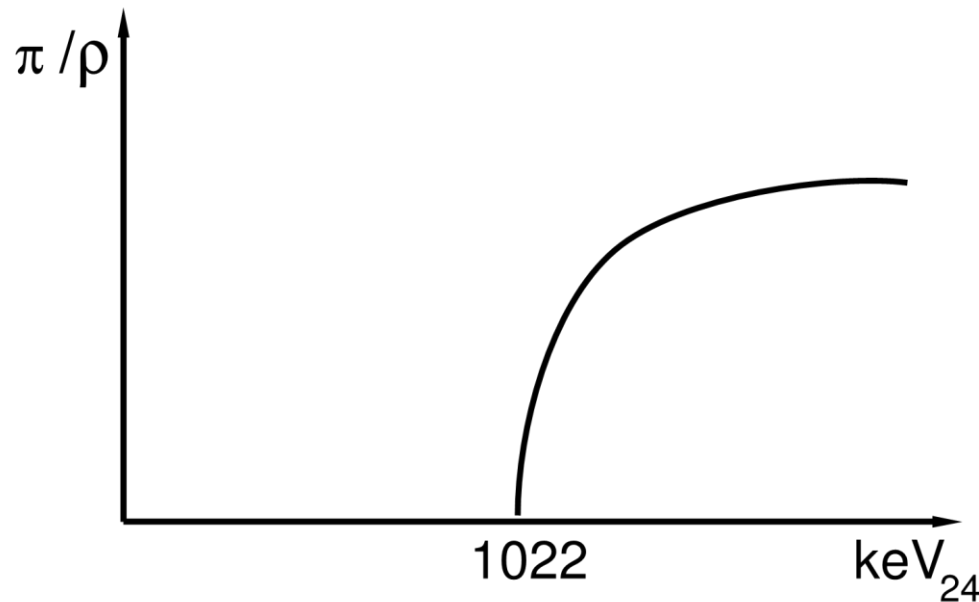
Les 2 particules se désintègrent rapidement en 2 photons de 511 keV chacun.



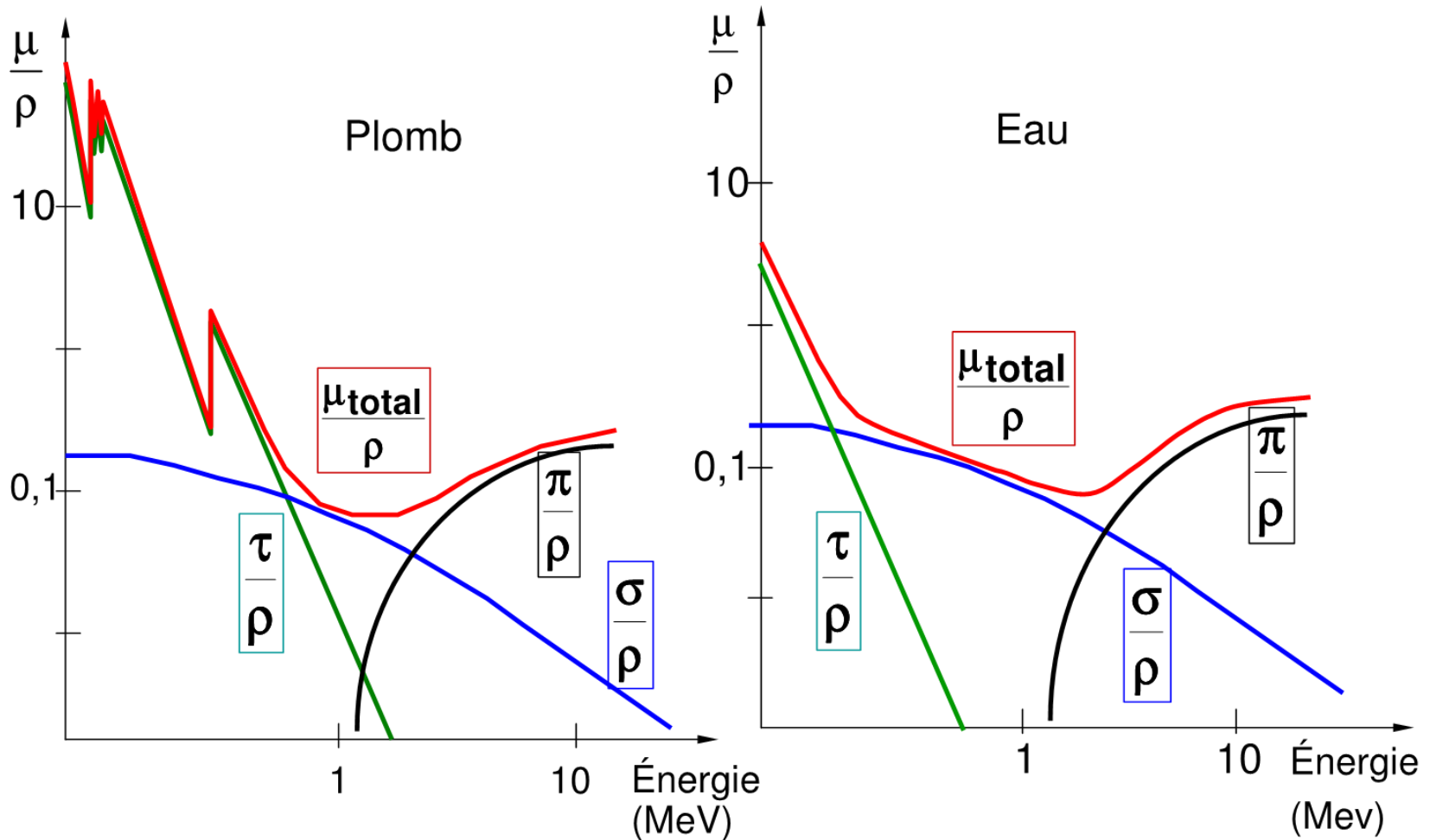
II.B.3 Autre type d'interaction: *la création de paire*

La probabilité de création de paire π/ρ a un seuil de 1022 keV.

Ce seuil correspond à l'énergie équivalente à la masse des 2 particules.



II.B.4 Probabilité et matière traversée



II.C. Interaction des rayonnements particulaires

II. Interaction d'un rayonnement ionisant avec la matière

A. Interaction élémentaire

1. Absorption d'énergie par l'atome
2. Émission d'énergie
3. Rayonnement ionisant

B. Interaction des photons

1. Loi d'atténuation des photons dans la matière
2. Les mécanismes d'atténuation
3. Les autres interactions
4. Probabilité et matière traversée

C. Interaction des rayonnements particulaires

1. Interactions des neutrons
2. Interactions des particules chargées

II.C.1 Interaction des neutrons

Les neutrons

- Interagissent avec les **noyaux**
- Interaction de **faible probabilité**
- Sont **très pénétrants**
- On distingue 2 types: les neutrons rapides et les neutrons lents

II.C.1 Interaction des neutrons

les neutrons rapides

Les neutrons rapides

- Dans un milieu riche en H, lors de la collision, le transfert d'énergie est maximal. Le noyau hydrogène est expulsé. Ce proton peut à son tour entraîner des ionisations.
- Dans un milieu de noyau lourd, le neutron rebondit sans perdre beaucoup d'énergie, il n'y aura pas d'ionisation.

II.C.1 Interaction des neutrons

les neutrons lents

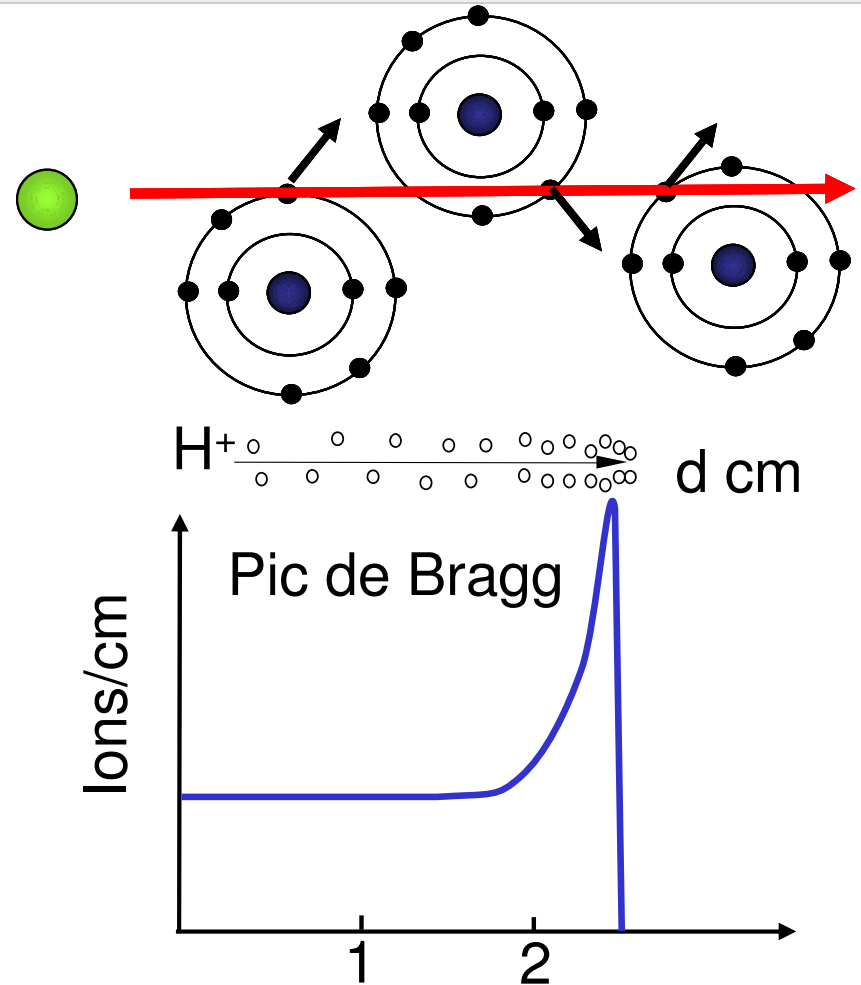
Les neutrons lents ou neutrons « thermiques » sont d'énergie cinétique faible.

Ils sont **absorbés par les noyaux**: cette capture nucléaire est à l'origine de transformations radioactives.

II.C.2 Interaction des particules chargées

L'interaction des particules chargées a une probabilité très élevée:

- Directement ionisante
- Parcours rectiligne
- Maximum d'ionisation en fin de parcours formant un pic de Bragg



II.C.2 Interaction des particules

application thérapeutique

La proton-thérapie

Elle est utilisée pour les mélanomes de l'œil.

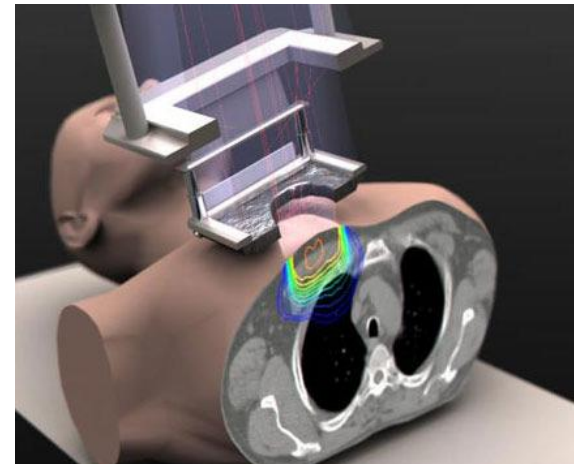
Chaque rayonnement ayant un pic de Bragg à une distance particulière: on a un maximum au cœur de la tumeur en préservant les tissus environnants.

II.C.2 Interaction des particules

application thérapeutique

La radiothérapie externe

On utilise les rayonnements pour traiter les cancers.



The end