



Biophysique des radiations

Particules ondes et atomes
Interactions des rayonnements ionisants
Introduction aux rayons X

Tut' rentrée 2012-2013

Où en est on dans le programme?

1. Bases physiques (6h) Pr Sepulchre
Physique classique (mécanique, électrostatique, oscillateurs, etc.) (4h)
Notions de physique quantique (2h)
2. Bases chimiques (4h) Pr Golebiowski → Section Chimie générale du forum
Etats de la matière, équilibre acido-basique
3. Optique (8h) Pr Sepulchre
Optique géométrique et optique ondulatoire (4h)
Emission de la lumière par la matière ; Effet laser ; Lumière et couleurs (4h)
4. Biophysique des radiations ionisantes (20 h) Pr Magne
Rayonnements ionisants et interactions avec la matière
Rayons X
Radioactivité
Effets biologiques
5. Radiofréquences et RMN (6h)
Bases sur les ondes, magnétisme Pr Sepulchre (2h)
Résonance magnétique nucléaire Pr Magne (2h)
Applications à l'IRM Pr Magne (2h)

Que savoir sur cette partie ?

- Davantage accessible.
- Travail de compréhension.
- Changement de professeur cette année. Pas de remaniements importants.
- Au concours: toujours le même type de QCM

Partie I

Particules, ondes et atomes

Tous les points de la fiche ne seront pas abordés ici par manque de temps (je préfère aborder seulement les points qui nécessitent des explications)

L'unité de masse atomique

Le ^{12}C souverain

$$1 \text{ uma} = M(1 \text{ atome } ^{12}\text{C}) / 12$$

➤ Mais que vaut la masse d'un atome de ^{12}C ?

$$M_{1 \text{ mole de } ^{12}\text{C}} = N_A \times M_{1 \text{ atome de } ^{12}\text{C}} = 12\text{g}$$

$$\text{Donc } M_{1 \text{ atome de } ^{12}\text{C}} = 12 / N_A$$

$$\rightarrow 1 \text{ uma} = 1/12 \times 12 / N_A = \mathbf{1/N_A} = 1,6 \cdot 10^{-24} \text{ g}$$

➤ De cette relation, on peut généraliser et dire que:

$$m(\text{g}) = m(\text{u}) / N_A$$

Par exemple, on prend 2u. Pour l'avoir en grammes, on fait $2/N_A$

L'unité de masse atomique, suite

✓ Nous remarquons que :

◆ $M_{1 \text{ mole } ^{12}\text{C}} = 12\text{g}$

◆ $M_{1 \text{ atome } ^{12}\text{C}} = 12\text{u}$ (car $1 \text{ uma} = M_{1 \text{ atome } ^{12}\text{C}} / 12$)

$$M_{1 \text{ mole de } X} = X \text{ g} \rightarrow M_{1 \text{ atome } X} = X \text{ u}$$

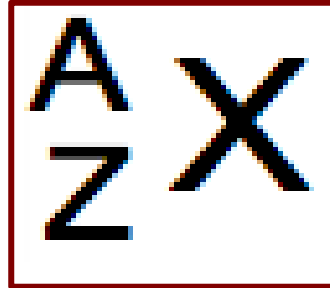
✓ De même, nous remarquons que le ^{12}C a une masse atomique (masse d'une mole d'atomes) de 12g.

Nous pouvons alors extrapoler que le nombre de masse A (nombre de nucléons) est égal à l'entier le plus proche de la masse atomique.

Exemple: le Si a une masse atomique de 27,9769 donc son nombre de masse $A=28$

L'atome et ses particules

1. Nomenclature



- X représente l'élément (l'atome concerné)
- **A**= nombre de masse = nombre de **nucléons**. Les nucléons sont les composants du noyau, ils sont divisés en
 - protons
 - neutrons
- **Z**= numéro atomique= nombre de **protons** (qui sont dans le noyau). Il permet de classer les éléments.

Z est aussi égal au nombre d'électrons. En effet, les protons étant chargés positivement, il faut que leur charge soit compensée par le même nombre de charge négative portée par les électrons.

- $A = \text{Nombre protons} + \text{nombre neutrons} = Z + N$

Donc **N** = $A - Z$ = nombre de **neutrons**

CAPITO?

- Le niobium 93 ($Z=41$) a une masse atomique de 92, 9067g :
 - Quel est son nombre de masse?
 - Quel est son numéro atomique?
 - Combien compte-t-il de nucléons?
 - Combien compte-t-il de protons?
 - Combien compte-t-il de neutrons?
 - Combien compte-t-il d'électrons?

Réponses:

$Z=41$, $A=93$

Donc $N= A-Z= 52$

- Quel est son nombre de masse? **$A=93$**
- Quel est son numéro atomique? **$Z=41$**
- Combien compte-t-il de nucléons? **$A=93$**
- Combien compte-t-il de protons? **$Z=41$**
- Combien compte-t-il de neutrons? **$N=52$**
- Combien compte-t-il d'électrons? **$Z=41$**

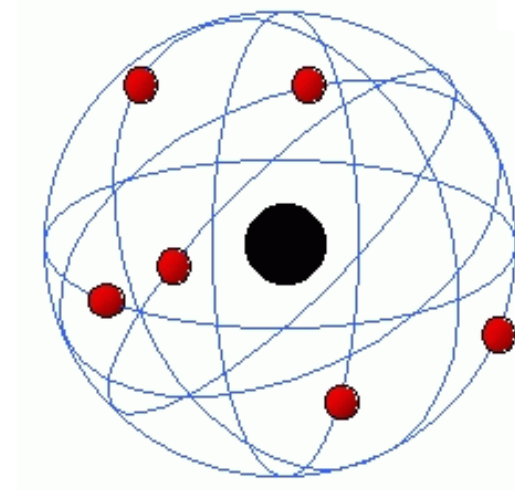
L'atome et ses particules, suite

2. Modèle de l'atome

MODÈLE DE RUTHERFORD

- Rayon atome= 10^{-10}m
- Rayon du noyau= 10^{-15}m

Les électrons gravitent autour du noyau.



L'atome et ses particules, suite 2

MODÈLE DE BOHR

➤ On prend l'atome de sodium $Z=11$

Le noyau est entouré de plusieurs couches d'électrons organisées selon le mode d'orbitales.

On les appelle les **orbitales atomiques**.

On les nomme

-K pour $n=1$

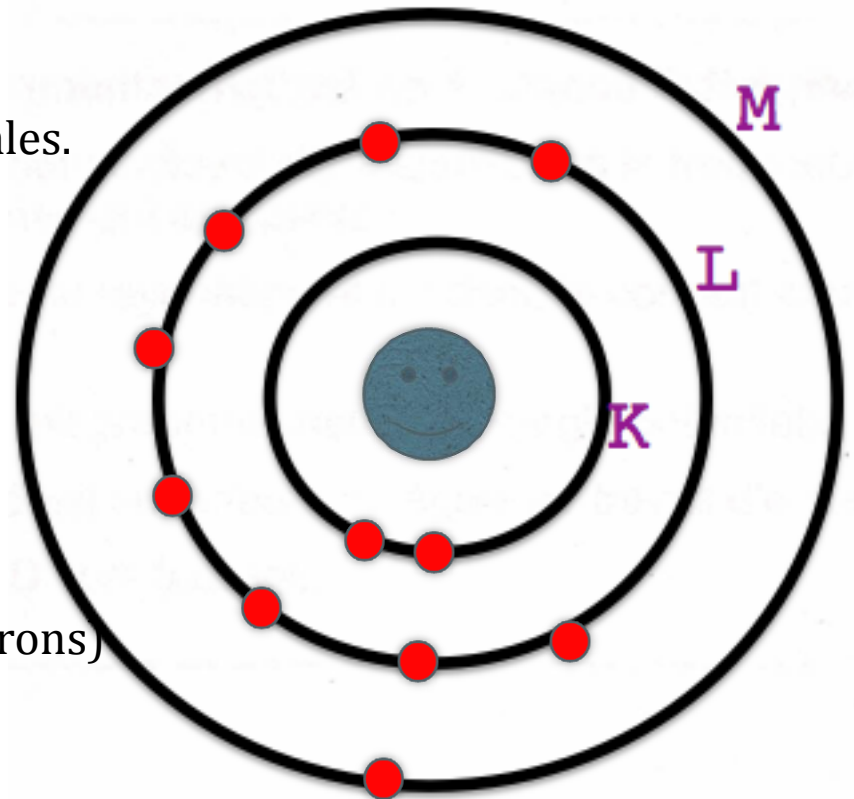
-L pour $n=2$

-M pour $n=3$

Chaque couche ou orbitale électronique peut contenir **$2n^2$ électrons** maximum

Pour l'atome de sodium $Z= 11$ (donc 11 électrons)

Le modèle est donc celui ci-contre:



Pour commencer à remplir une couche supérieure, il faut absolument que la couche inférieure soit complète.

Modèle de Bohr suite

- Chaque orbitale atomique possède une énergie qui lui est propre:

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

n rang de l'orbitale
z numéro atomique
σ constante d'écran. *Elle représente l'écran (le pare-choc) formé par les électrons du cortège électronique autour du noyau.*

- Chaque électron sur son orbitale possède **une énergie de liaison** $E_n = |W_n|$ qui le maintient lié à son orbitale.
- Cette énergie de liaison diminue plus on s'éloigne du noyau

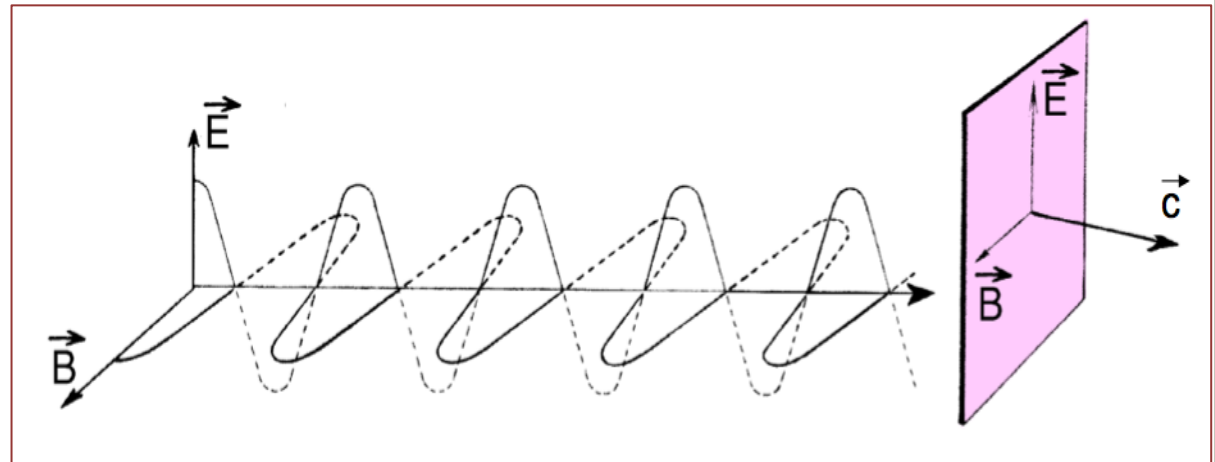
Les rayonnements électromagnétiques

1. Généralités

Un REM est une perturbation du champ électromagnétique qui résulte de la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui vibrent en phase, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation.

Il est défini par :

- sa longueur d'onde
- sa fréquence
- son énergie



Les rayonnements électromagnétiques

2. La dualité onde-particule

➤ Postulat de Einstein:

Les rayonnements électromagnétiques peuvent être assimilés à des photons.
(les photons sont des particules)

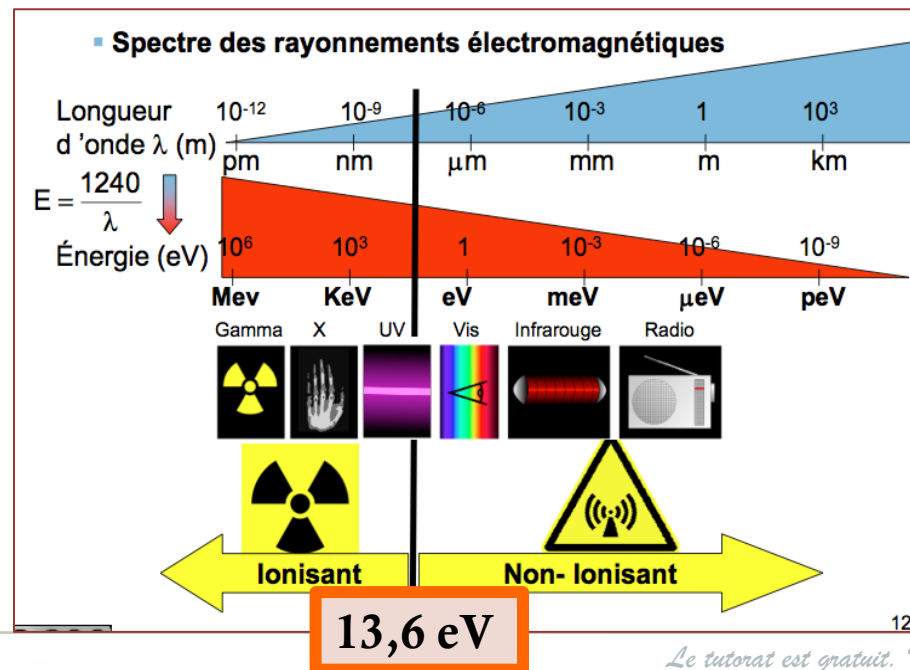
➤ Postulat de De Broglie:

Les rayonnements électromagnétiques peuvent être assimilés à des électrons
(les électrons sont des particules)

Les rayonnements électromagnétiques

3. Les rayonnements ionisants

Un rayonnement ionisant est un rayonnement électromagnétique ou corpusculaire capable de produire directement ou indirectement des ions, lors de leur passage à travers la matière (atomes et molécules)



Partie II

Interactions des rayonnements ionisants avec la matière

I. Généralités

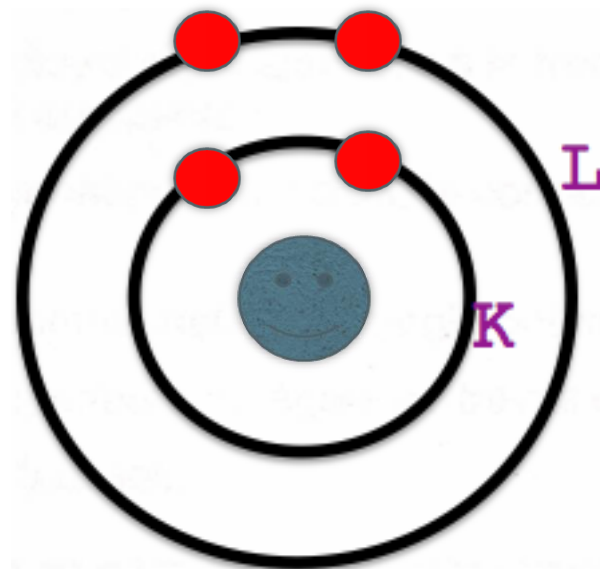
1. Notions d'atomes à l'état fondamental, ionisé et excité

Atome à l'état fondamental

L'atome est dans sa conformation normale, qui est naturellement stable.

On prendra l'exemple de l'atome d'hélium

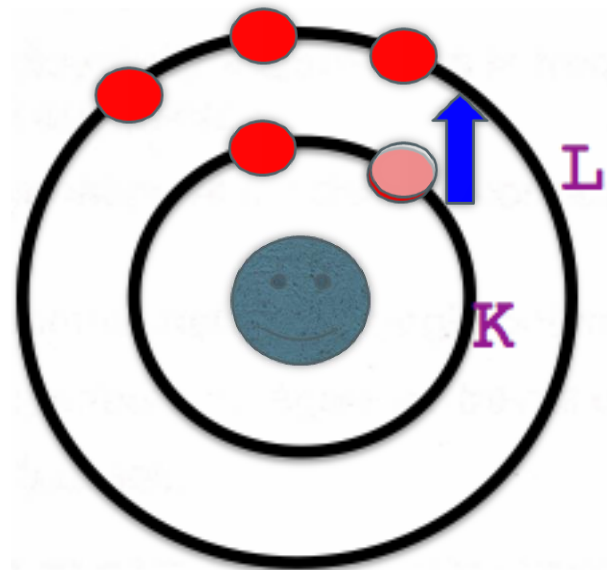
$Z=4$



Atome excité

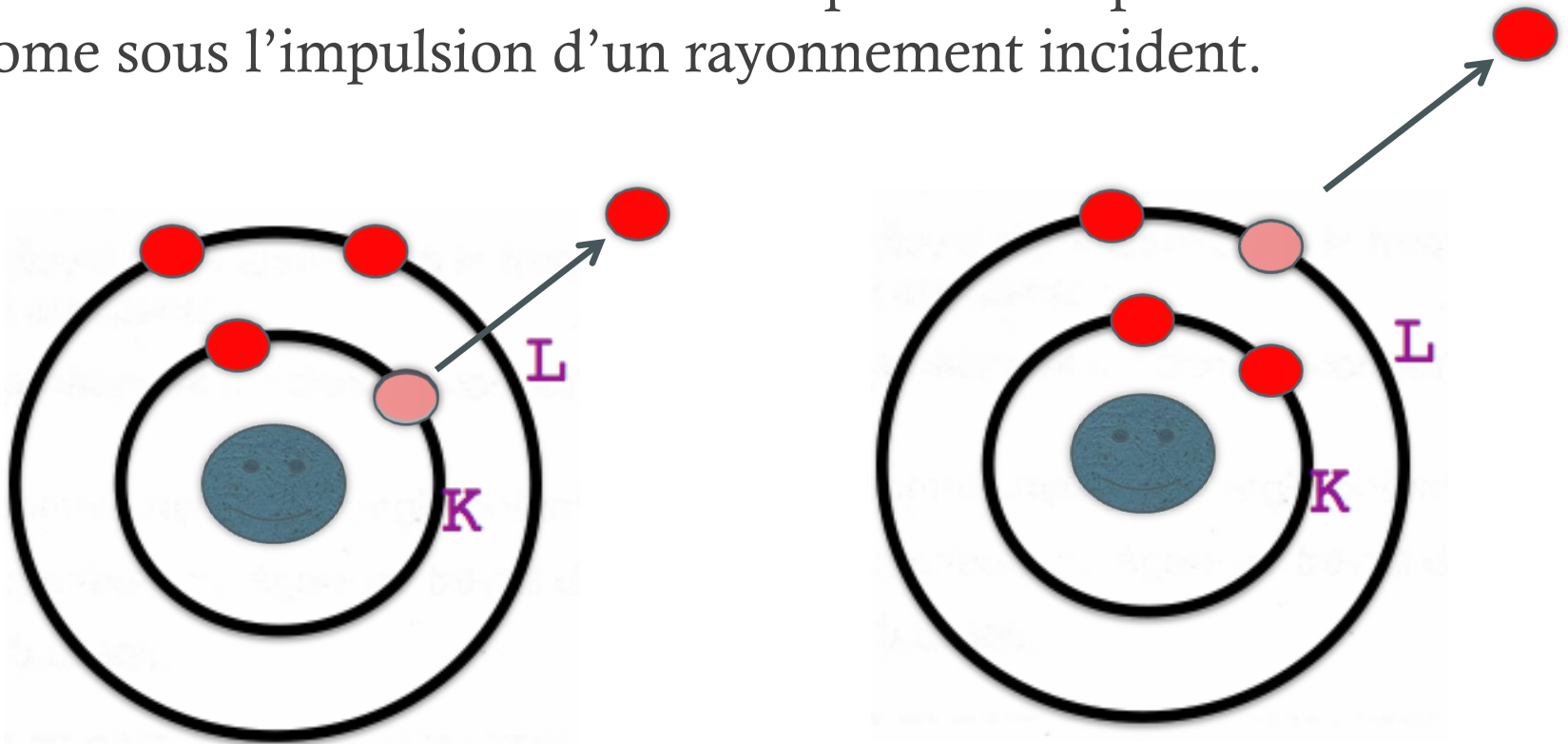
Un électron d'une couche inférieure est passé sur une couche supérieure. Ainsi, des électrons peuvent se trouver sur des couches supérieures alors que les couches inférieures ne sont pas totalement remplies.

Un atome excité possède un **excès** d'énergie. Il est **instable**.



Atome ionisé

Un électron d'une couche électronique a été expulsé de l'atome sous l'impulsion d'un rayonnement incident.



Un atome ionisé possède un **excès** d'énergie. Il est **instable**.

I. Généralités suite

2. Absorption d'énergie par la matière

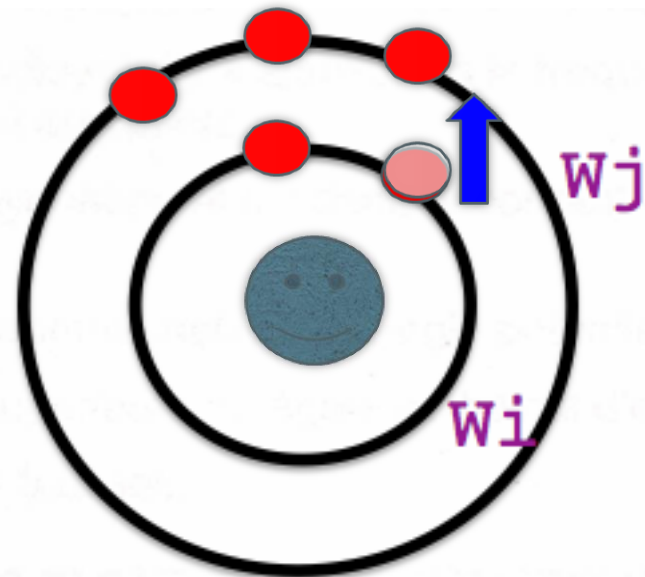
On considère un rayonnement qui traverse la matière. Ce rayonnement va entrer en collision avec les éléments constituant la matière.

Excitation

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

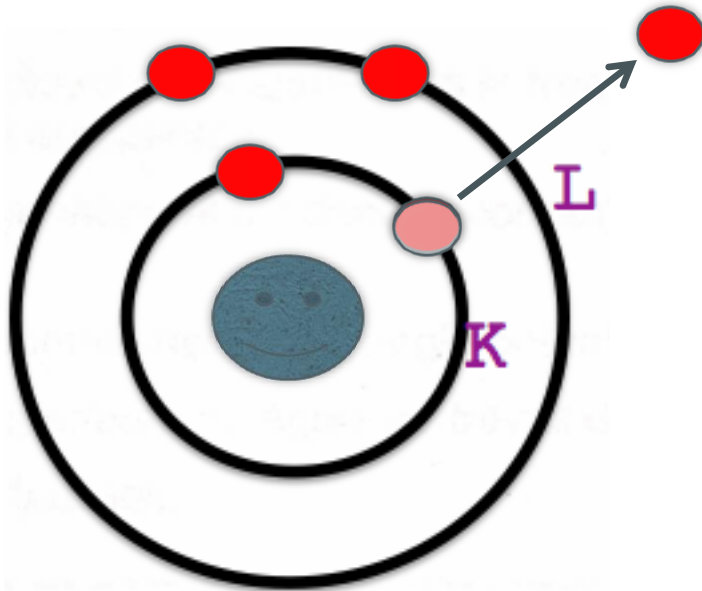
L'atome possède alors un excès d'énergie, il est excité. Cet excès d'énergie est égal à E (c'est l'énergie qu'on a apporté, qui n'était pas la avant).

L'atome n'est pas stable. Il doit retrouver une conformation stable en se desexcitant.



Ionisation

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



L'atome possède alors un excès d'énergie, il est ionisé. Cet excès d'énergie **est égal à E** (c'est l'énergie qu'on a apporté, qui n'était pas la avant).

Nous avons formé un ion.
L'électron expulsé va partir avec un énergie cinétique:

$$T = E - |W_i|$$

I. Généralités suite

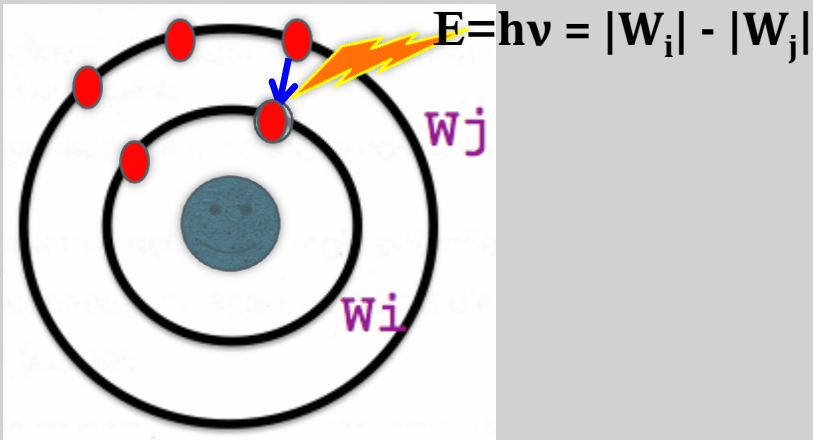
3. Restitution d'énergie par la matière

Que l'atome soit excité ou ionisé, il possède un excès d'énergie qu'il doit évacuer, rendre à la matière.

Fluorescence

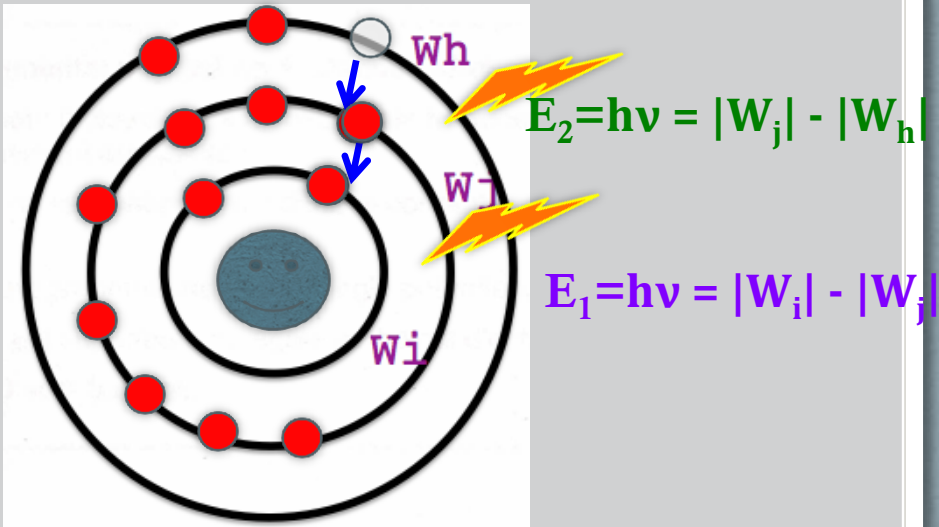
- Après une excitation (excès d'énergie $E = |W_i| - |W_j|$)

Un seul réarrangement



Un électron d'une couche plus lointaine descend remplir la case vacante d'une couche plus proche du noyau.

Cascade de réarrangements



$$E_1 = |W_i| - |W_j|$$

$$E_2 = |W_j| - |W_h|$$

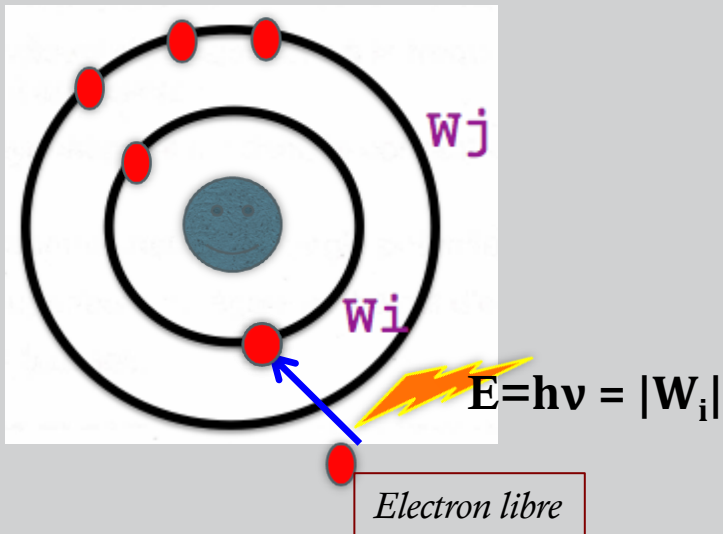
L'excès d'énergie a été restitué:

$$E_1 + E_2 = |W_i| - |W_j| + |W_j| - |W_h| = |W_i| - |W_h|$$

Fluorescence suite,

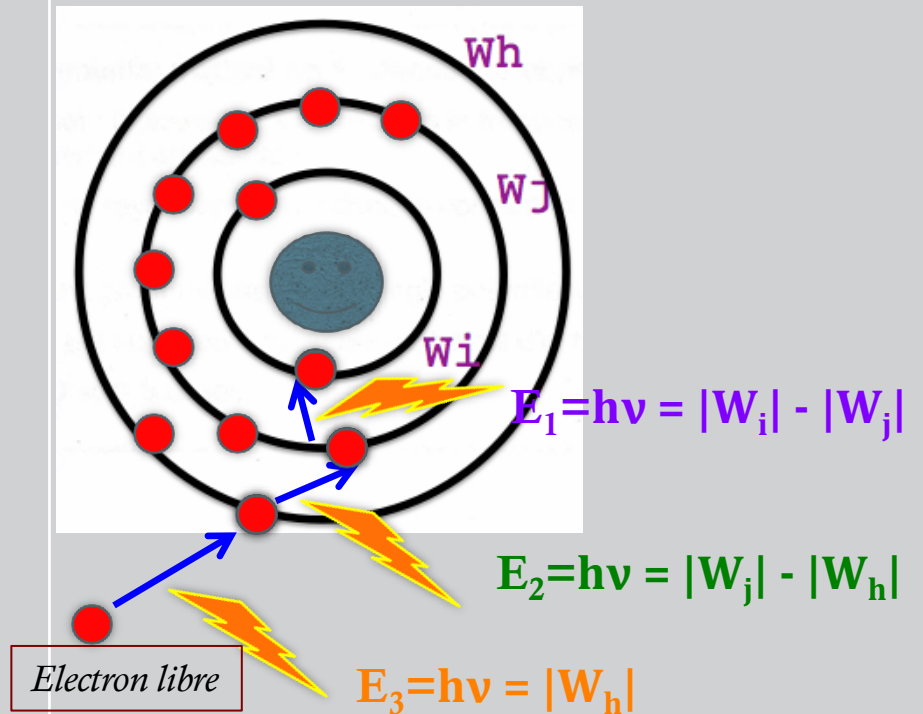
- Après une ionisation (excès d'énergie $E = |W_i|$)

Un seul réarrangement



Un électron libre vient combler la case laisser vacante sur l'orbitale i.
Un photon de fluorescence d'énergie $|W_i|$ est alors émis.

Cascade de réarrangements



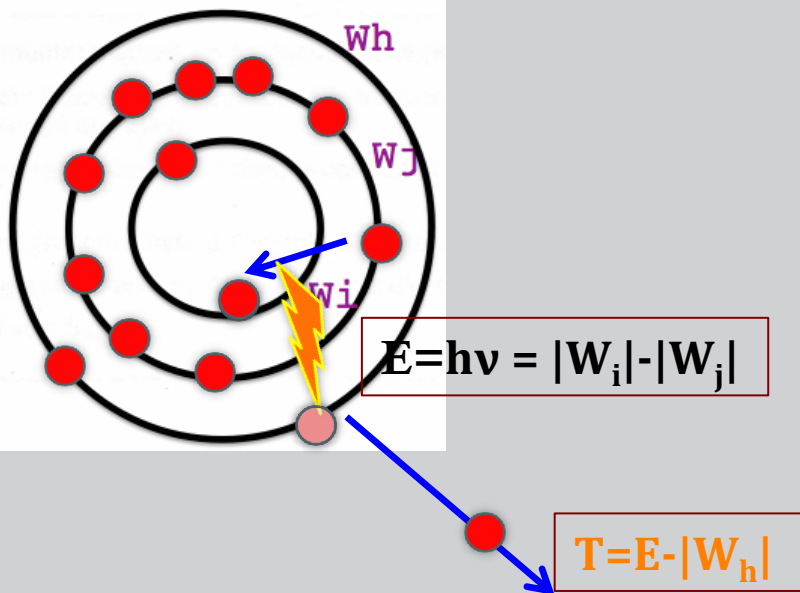
L'excès d'énergie a été restitué:

$$E_1 + E_2 + E_3 = |W_i| - |W_j| + |W_j| - |W_h| + |W_h| = |W_i|$$

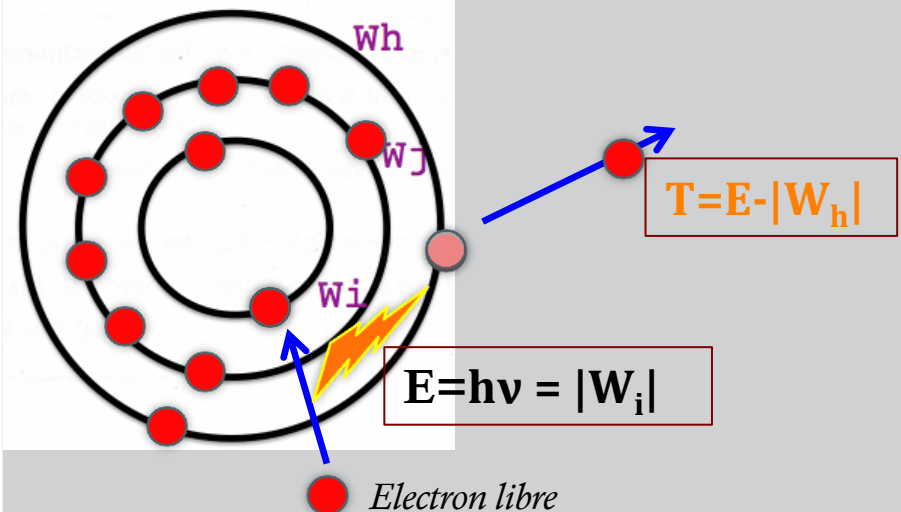
Emission d'un électron Auger

- Peut suivre l'émission d'un photon de fluorescence lors du retour à l'état fondamental d'un atome excité ou ionisé.
- Fréquent pour atomes légers et électrons périphériques ($|W_n| = 13,6 \times (Z - \sigma)^2 / n^2$)

Après une excitation



Après une ionisation



II. Interactions des photons avec la matière

1. Loi d'atténuation

➤ La formule de la mort qui tue:

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

- $N(x)$ nombre de photons atténués ($N(0) - N(x) =$ nombre photons qui ont traversé)
- $N(0)$ nombre de photons initial
- μ coefficient LINÉIQUE d'atténuation (en m^{-1}). Il représente une probabilité d'interaction et dépend de l'état du milieu.
- x épaisseur de matériau

➤ Probabilité d'interaction? Quesaco?

Quand le faisceau de photon traverse un matériau, les photons sont indépendants les uns des autres et vont pouvoir être atténués par interaction avec la matière selon différents mécanismes.

III. Interactions des photons avec la matière

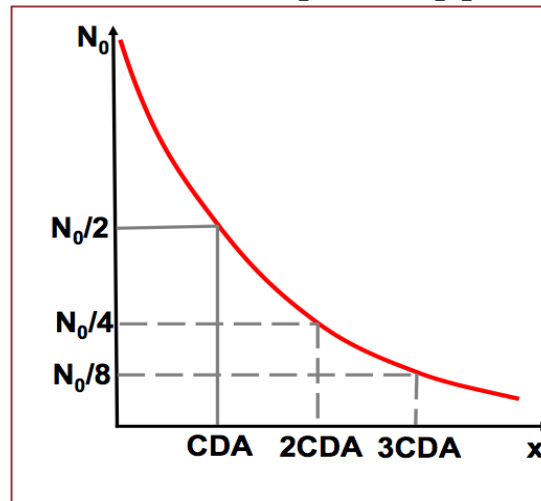
2. La couche de demi-atténuation

Selon la formule, le nombre de photons du faisceau diminue de manière exponentielle

➤ La couche de demi-atténuation:

Quand **le nombre de photons initial** a été **divisé par 2**, on dit que le faisceau a traversé une certaine épaisseur de matériau qu'on appelle la CDA.

$$\text{CDA} = \frac{\ln 2}{\mu}$$



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

Couche de demi-atténuation, suite

- Il faut 10 CDA pour atténuer totalement un faisceau.
- Quelques chiffres:
 - Après 1 CDA il reste 50%
 - Après 2 CDA il reste 25%
 - Après 3 CDA il reste 12,5%

CAPITO?

- ✧ Après la traversée de 6cm de bois, un faisceau de photon est atténué d'un facteur 8. Que vaut la CDA?
- ✧ Après la traversée de 2mm de plomb, il ne reste que 25% du faisceau initial. Que vaut la CDA?
- ✧ Après la traversée d'une épaisseur x de matériau, 75% d'un faisceau sont atténués. La CDA est de 1mm. Que vaut x ?

Correction

✧ 6cm. Divisé facteur 8.

$$8=2^3 \text{ donc } k=3$$

Donc l'épaisseur traversée est égale à $k\text{CDA}=3\text{CDA}=6\text{cm}$

$$\text{Donc CDA} = 6/3 = 2 \text{ cm}$$

✧ 2mm. Il reste 25% (=1/4) donc faisceau divisé par 4.

$$4=2^2 \text{ donc } k=2$$

Donc épaisseur traversée est $k\text{CDA}=2\text{CDA}=2\text{mm}$

$$\text{CDA} = 1\text{mm}$$

✧ atténuation de 82,5%, il reste 12,5%. Faisceau initial divisé par $4=2^2$

$$k=2$$

Donc épaisseur traversée = $k\text{CDA}=2\text{CDA}= 2\text{mm}$

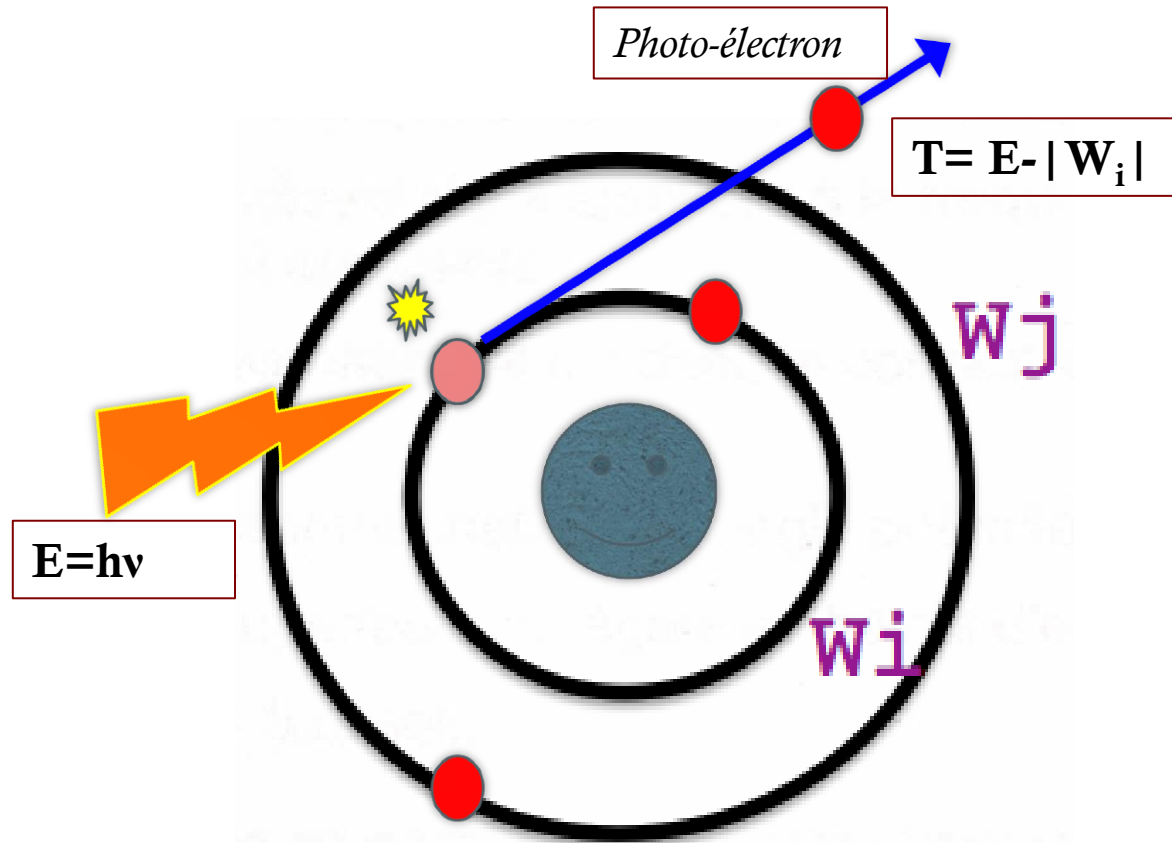
$$N(k.\text{CDA}) = \frac{N(0)}{2^k}$$

III. Interaction des photons avec la matière

3. Mécanismes d'atténuation

Quand un faisceau de photons va traverser une épaisseur de matériau, chaque photon va pouvoir rencontrer différents mécanismes d'atténuation

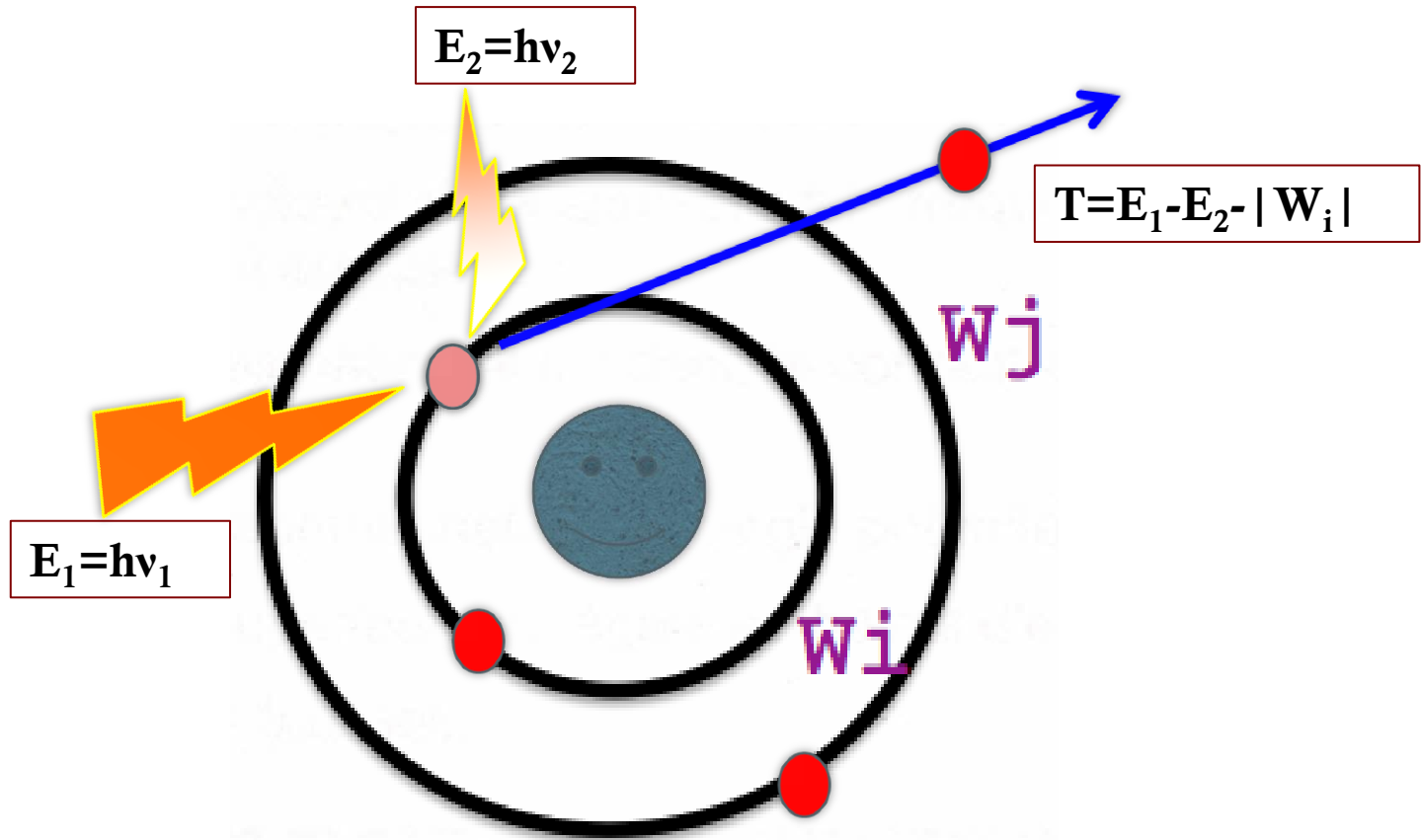
Effet photo-électrique



Que savoir sur l'effet photo-électrique?

- Le photon incident transfère la **totalité** de son énergie à l'électron qui est alors expulsé.
 - La matière a alors absorbé toute l'énergie incidente
- L'atome ionisé va pouvoir subir des réarrangements. L'effet photo-électrique est donc suivi de fluorescence et d'électron Auger.
- Le photo-électron va voir son énergie cinétique T diminuer au fur et à mesure qu'il va ioniser des atomes de la matière.
- Probabilité: $\frac{\tau}{\rho} \propto \frac{Z^3}{h\nu^3}$

Effet Compton



Que savoir sur l'effet Compton?

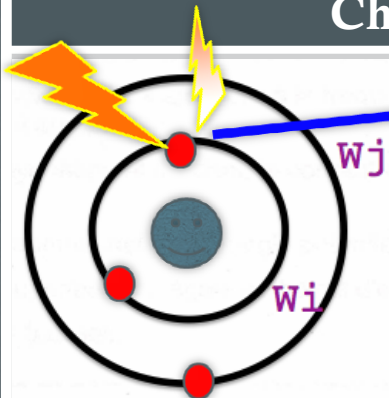
- Transfert **d'une partie** de l'énergie du photon incident à un électron de la matière qui est ainsi expulsé.

➔ La matière n'absorbe qu'une partie de l'énergie incidente, l'autre partie est diffusée sous forme de photon.

- Probabilité: $\frac{\sigma}{\rho} \propto \frac{1}{h\nu}$

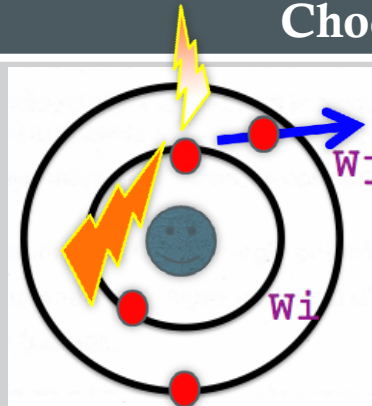
- Quesaco que les chocs tangentiels ou frontaux?

Choc frontal



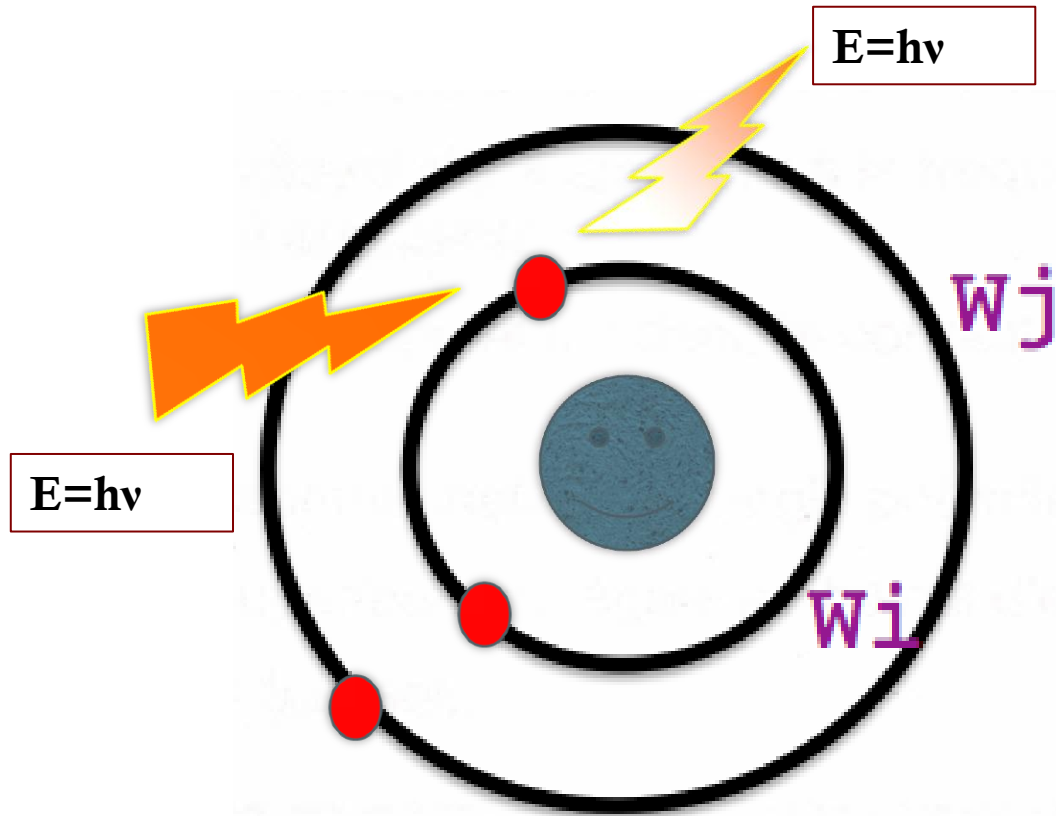
L'énergie cinétique du photon expulsé est maximale

Choc tangentiel



L'énergie cinétique du photon expulsé est minimale

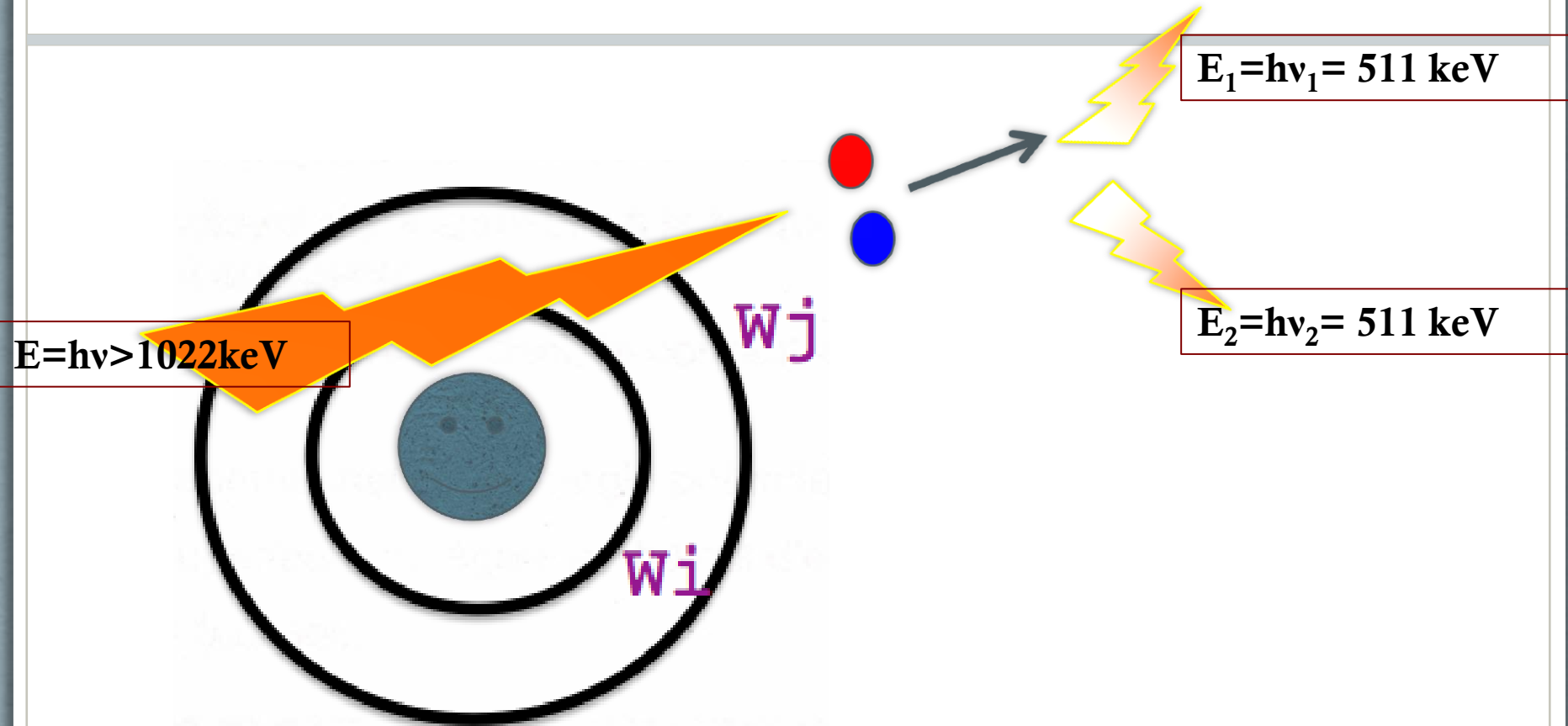
Diffusion Thomson- Railey



Que savoir sur la diffusion de Thompson-Railey?

- **AUCUN** transfert d'énergie.
- La direction du photon incident est **déviée**.
- Probabilité:
 - Importante pour les photons peu énergétiques : IR, UV, visible
 - Négligeable pour les photons très énergétiques : γ et X.

Création de paire



Que savoir sur la création de paire?

- Seulement possible pour un faisceau d'énergie **supérieure** à **1022 keV**
- Le faisceau se divise en une paire électron/positon en passant près du noyau.
- La paire électron/positon se désintègre en **2 photons** d'énergie 511 keV chacun.

III. Autres interactions des rayonnements particulaires

1. Particules non chargées

NEUTRONS

- *diamètre faible*
- *interaction avec seulement le noyau*
-> *très pénétrants*

A. Rapides

Milieu riche en hydrogène

- transfert **total** de l'énergie du neutron au proton du noyau de l'atome
- ce proton ainsi expulsé est *ionisant* (*il va expulser des électrons dans les autres atomes*)
- ➔ Les neutrons sont donc **indirectement ionisants**

Milieu riche en éléments lourds

- peu/**pas de transfert** d'énergie des neutrons vers les atomes
- ➔ Les neutrons ne sont **pas ionisants**

NEUTRONS

B. Lents (faible énergie cinétique)

- Aussi appelés neutrons thermiques
- Absorbés par le noyau des atomes lors de la capture radioactive.

III. Autres interactions des rayonnements particulaires

2. Particules chargées

ELECTRONS

A. Interaction électron-électron

- interaction entre 2 particules de même charge
- **ARRÊT PAR COLLISION**
- Interaction dépend de l'énergie cinétique de l'électron incident

$E_c < W_i - W_j $	$E_c = W_i - W_j $	$E_c > W_i $
➤ l'électron ne bouge pas VIBRATION + CHALEUR	EXCITATION	IONISATION

↓ ↓

Réarrangements électroniques successifs

↓

Specre de raie de **photons** fluorescence= RX

ELECTRONS

B. Interaction électron-noyau

- Le noyau est chargé positivement (contient des protons et des neutrons) et est volumineux par rapport aux électrons.
- **ARRÊT PAR FREINAGE**
- L'électron subit une accélération centripète, il possède une énergie cinétique E_c . A partir de cette énergie cinétique est créé un photon dont l'énergie est comprise entre 0 et E_c

La preuve que vous êtes des winners:

Les QCM du concours 2011-2012 que vous êtes maintenant capables de faire

QCM 13: On compare les rayons X et les rayonnements électromagnétiques du domaine du visible (REM visibles) :

- A. La longueur d'onde des rayons X est inférieure à celle des REM visibles
- B. La fréquence des rayons X est supérieure à celle des REM visibles.
- C. L'énergie des rayons X est supérieure à celle des REM visibles
- D. La vitesse de propagation dans le vide des rayons X est supérieure à celle des REM visibles.
- E. Les propositions A,B,C et D sont fausses.

Correction QCM 13:

A. **VRAI**

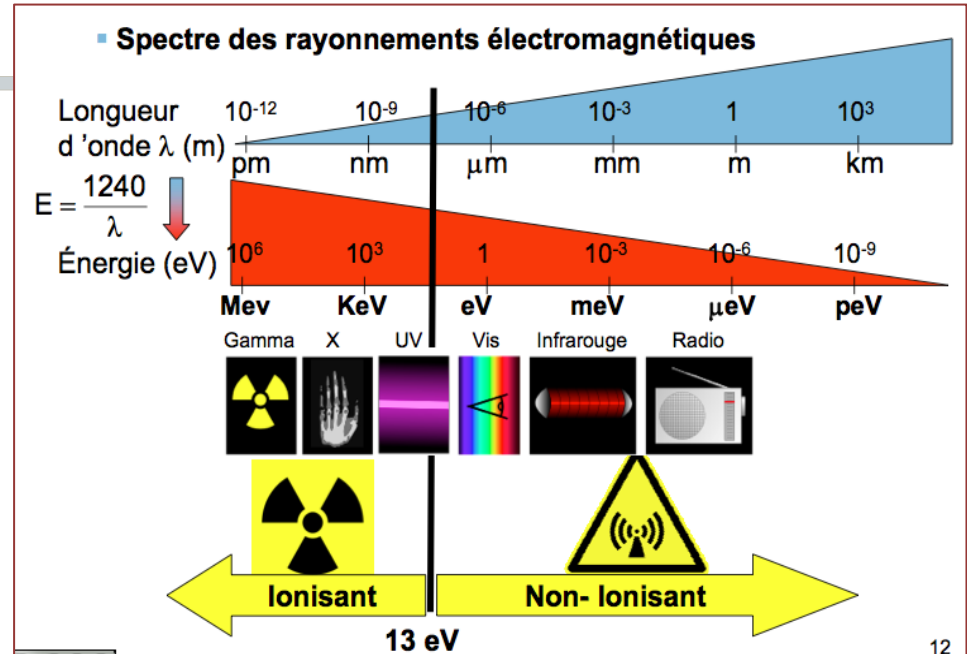
A. **VRAI**: Nous savons que:

$$v = c/\lambda$$

Ainsi, longueur d'onde et fréquence sont inversement proportionnelles. Si la longueur d'onde des rayons X est inférieure à celle des REM visibles alors la fréquence des rayons X est supérieure à celle des REM visibles.

C. **VRAI**

D. **FAUX**: Dans le vide, la vitesse de propagation des rayons X et REM visibles est la même et égale à $3,1 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$



Suite concours

QCM 14: Les énergies de liaison des électrons de l'atome de sodium ($Z=11$) sont, en eV et dans le modèle de Bohr: $W_K=-1070$, $W_L=-40$, $W_M=-10$

Après ionisation de cet atome par expulsion d'un électron de la couche K, on peut observer:

- A. Un photon de fluorescence de 1070 eV.
- B. Un électron Auger d'énergie cinétique de 1070eV
- C. Un photon de fluorescence de 1030 eV
- D. Un photon de fluorescence de 30 eV.
- E. Les propositions A,B,C et D sont fausses.

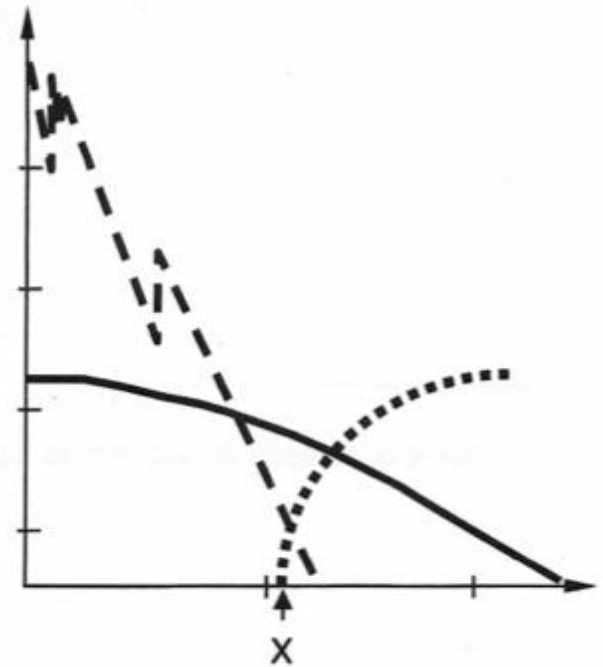
Correction QCM 14

- A. **VRAI**: un électron est expulsé de la couche K, un électron libre peut donc venir combler cette case quantique laissée vacante. En faisant, il émet un photon de fluorescence d'énergie égale à l'énergie de l'orbitale.
- B. FAUX: L'énergie cinétique de l'électron Auger est diminuée de la valeur de l'énergie de liaison de l'électron expulsé (l'énergie de liaison de cet électron représente l'énergie qu'il faut fournir pour l'expulser)
- C. **VRAI**: $1030 = |W_K| - |W_L|$. Ce photon de fluorescence correspond au passage d'un électron de la couche L vers la couche K.
- D. **VRAI**: $30 = |W_L| - |W_M|$. Ce photon de fluorescence correspond au passage d'un électron de la couche M vers la couche L. Ce mouvement est possible une fois qu'un électron de la couche L est descendu sur K. Il ne sera donc pas émis seul.

La suite!

QCM 15: La figure ci-contre représente les probabilités des différents mécanismes d'interaction des rayonnements électromagnétiques dans du plomb:

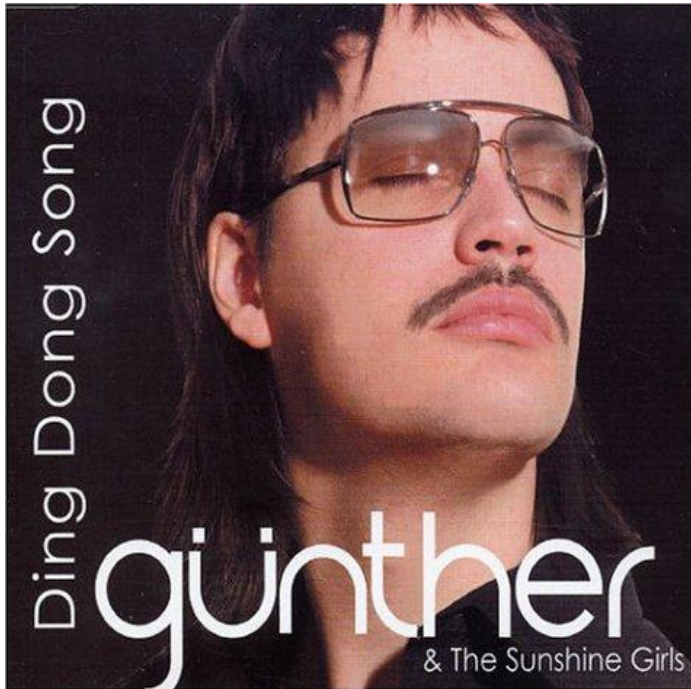
- A. L'axe des abscisses représente Z .
- B. L'axe des ordonnées est celui des coefficients d'atténuation massique.
- C. La courbe en trait plein correspond à l'effet photo électrique.
- D. La valeur de l'abscisse X (fléchée) est 511.
- E. Les propositions A,B,C et D sont fausses.



Correction QCM 15

- A. FAUX: L'axe des abscisses correspond à l'énergie du rayonnement.
- B. FAUX: L'axe des ordonnées correspond aux probabilités d'interaction.
- C. FAUX: C'est l'effet compton. Vous retrouverez la même courbe pour un matériau différent car la probabilité d'effet compton ne dépend pas de la nature du matériau.
- D. FAUX: La création de paire est possible pour un rayonnement d'énergie supérieure à 1022MeV.
- E. **VRAI.**

Le mot de la fin...



**Restez fresh avec Gunther, la
mascotte du tutorat UE3 ;)**