

Méthodes d'analyse physico-chimique des matériaux

Pr M. IDIRI

Année universitaire 2019-2020

Plan de cours

Introduction générale

Chapitre 1: Notions générales sur les rayonnements et la matière

Chapitre 2: Interaction rayonnements-matière

Chapitre 3: Spectrométrie des rayons X

Chapitre 4: Microscopie Electronique

Chapitre 5: Spectrométrie d'absorption atomique

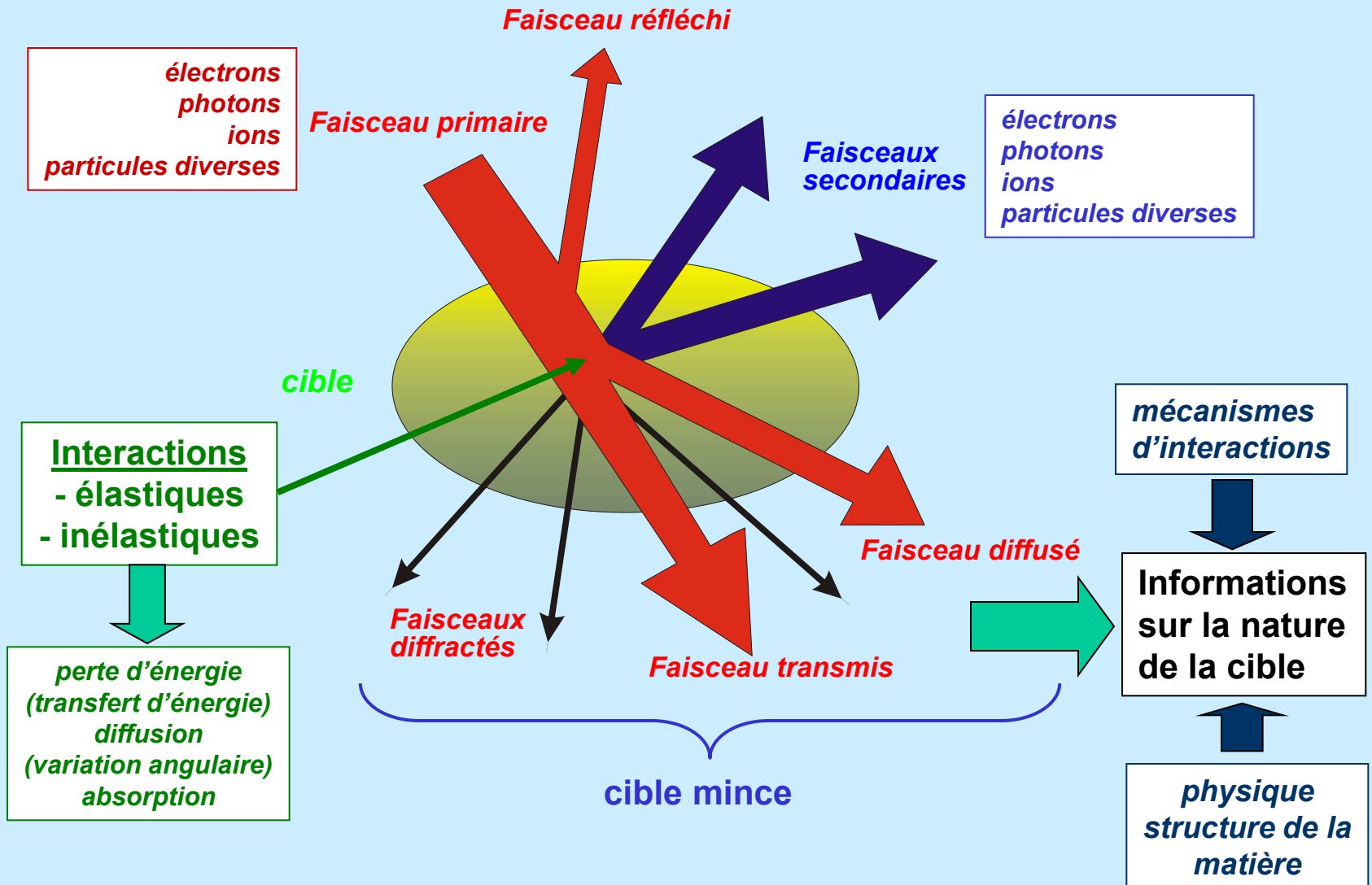
Conclusion

Introduction générale

- Un matériau désigne toute matière utilisée pour réaliser un objet au sens large, ce dernier est souvent une pièce d'un sous-ensemble. C'est donc une matière de base sélectionnée en raison de propriétés particulières et mise en œuvre en vue d'un usage spécifique.
- Les ingénieurs tous secteurs confondus sont confrontés à des questions de choix et d'optimisation de matériaux pour des usages de plus en plus ciblés et des secteurs d'application de plus en plus exigeants.
- d'où la nécessité d'avoir un outil d'accompagnement sur les méthodes d'analyse des matériaux les plus répondus, les procédés et les voies d'amélioration pour concevoir et mettre en œuvre des matériaux innovants performants et à haute valeur ajoutée

Les techniques expérimentales (analyse et observation)

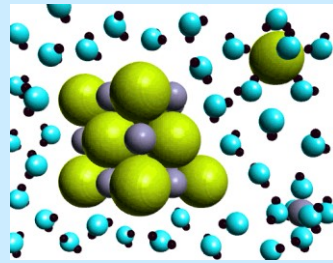
Principe général de fonctionnement



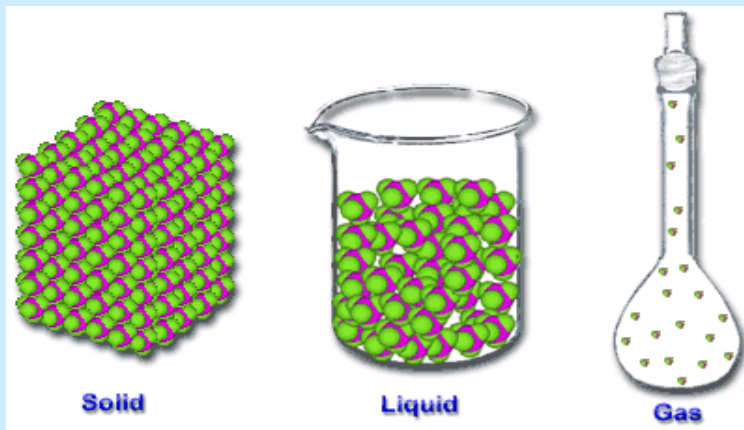
Chapitre 1: Notions générale sur les rayonnements et la matière

1- rappel sur quelques notions sur la matière

➤ Toute la matière est composée de particules (atomes, ions ou molécules)



➤ Il y a 6 états de la matière:



aussi

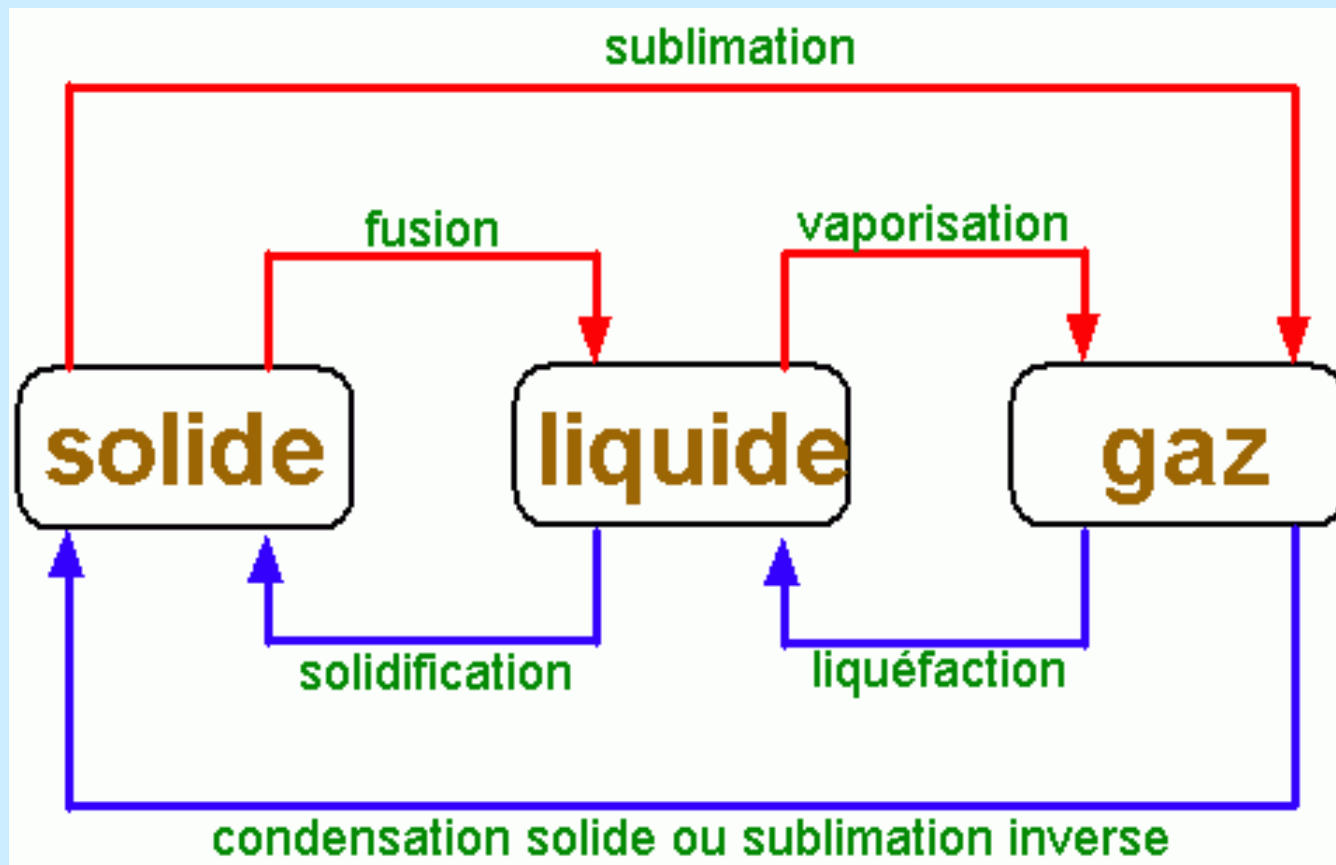
Plasma

Cristaux liquides

condensats de Bose-Einstein

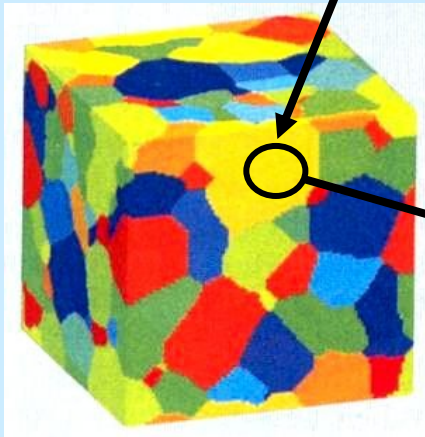
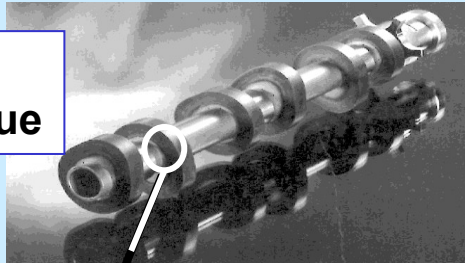
Chapitre 1: Notions générales sur les rayonnements et la matière

Changement d'état



Rappels sur la structure de la matière (exemple de matériaux métalliques)

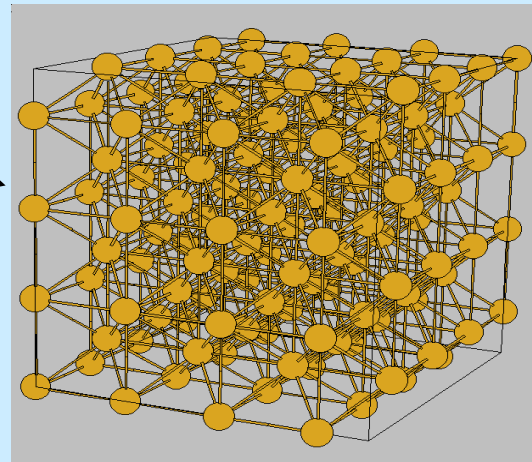
échelle
macroscopique



Fer : structure polycristalline

100 μm

échelle
microscopique



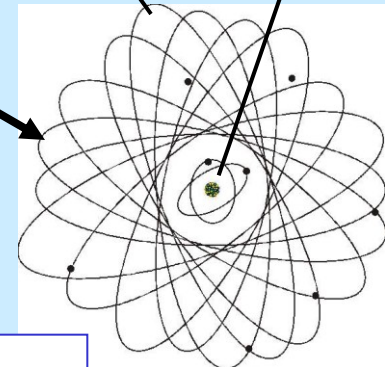
monocristal de Fer
(maille cubique centré)

10 \AA (1 nm)

échelle
nanoscopique

électrons
(26)

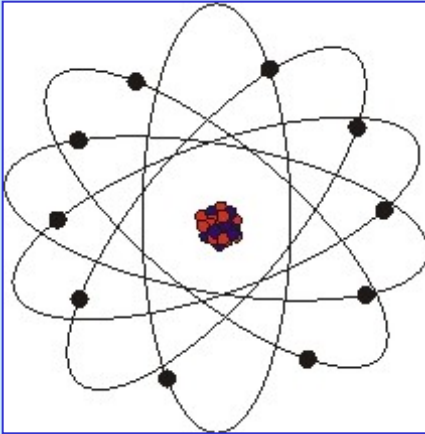
noyau



atome de fer

1 \AA (0,1 nm)

Structure atomique



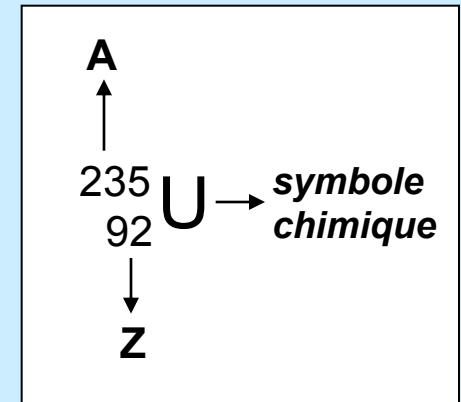
1 μm (micro) : 10^{-6} m
1 nm (nano) : 10^{-9} m
1 pm (pico) : 10^{-12} m
1 fm (femto) : 10^{-15} m
1 F (Fermi) = 1 fm
1 am (atto) : 10^{-18} m

structure électronique

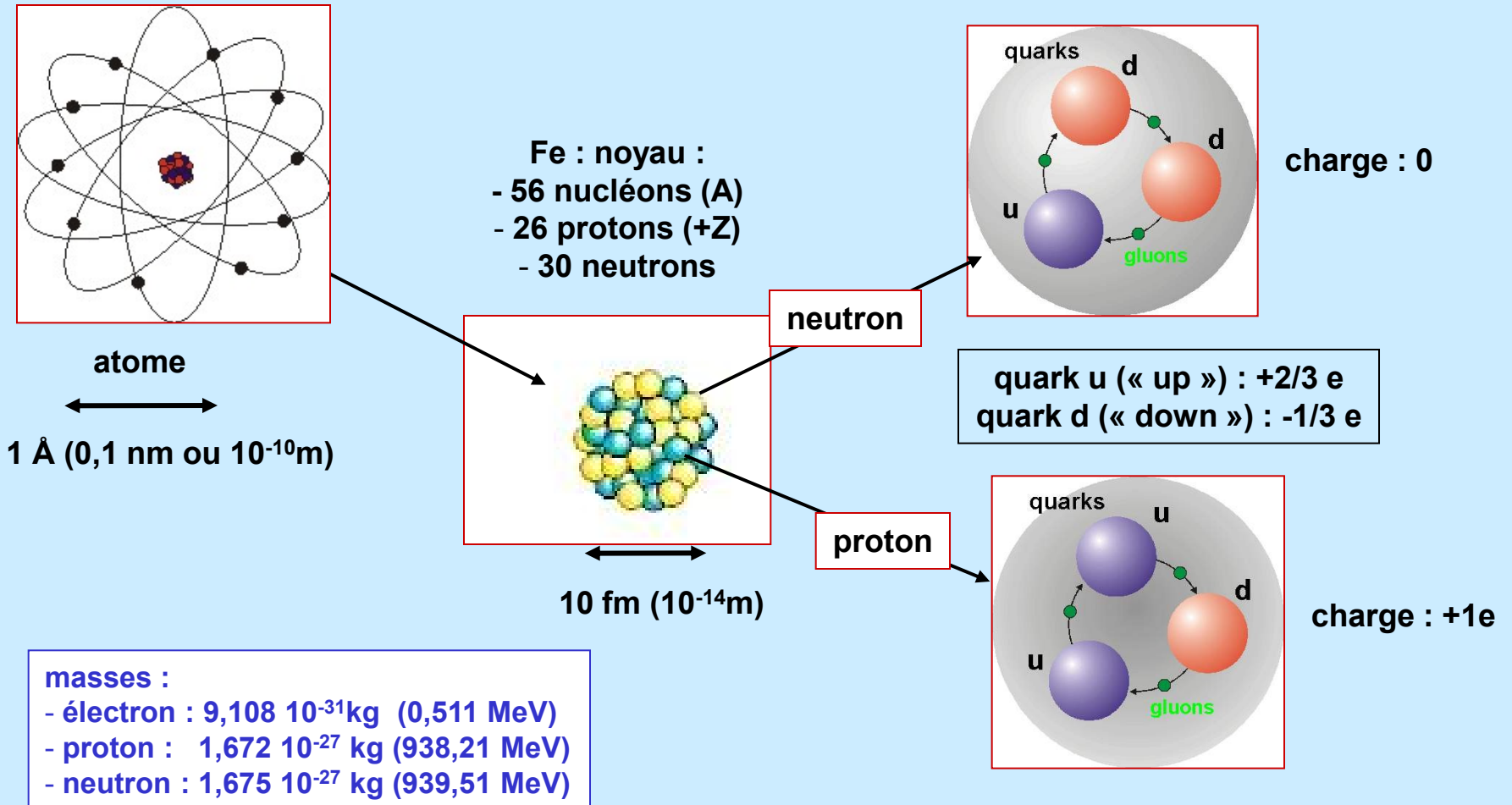
nuage électronique : Z électrons

noyau {
A nucléons :
Z protons
A-Z neutrons

structure du noyau



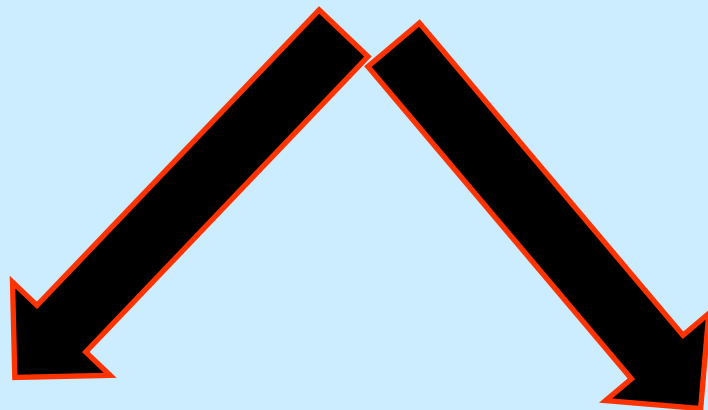
Structure du noyau



nucléon : 3 quarks liés par un échange de gluons + des paires « quarks-antiquarks » virtuels

2- Rappels sur les rayonnements

Nature des rayonnements



**Rayonnements
électromagnétiques**

Exemple : Rayon X, IR, UV,
Visible,

**Rayonnements
corpusculaires**

Exemple : électrons, neutrons

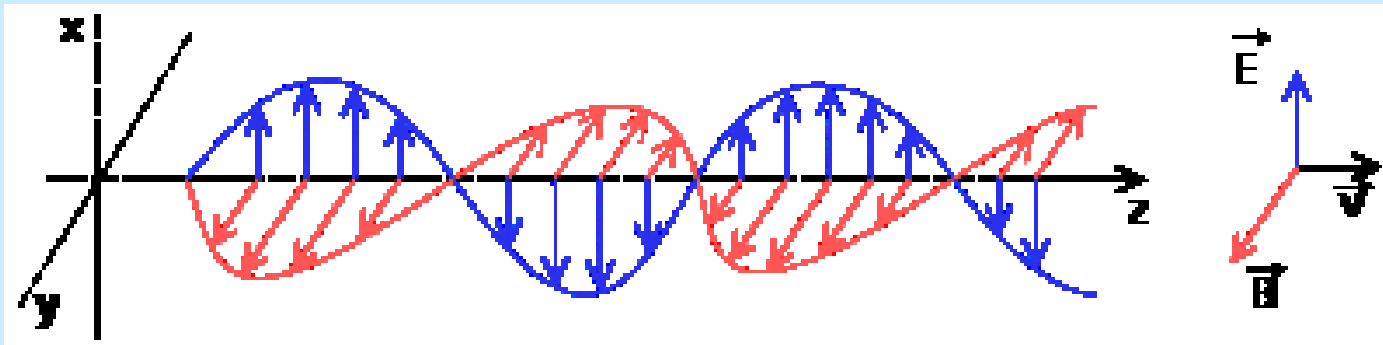
2- 1. Rayonnements électromagnétiques

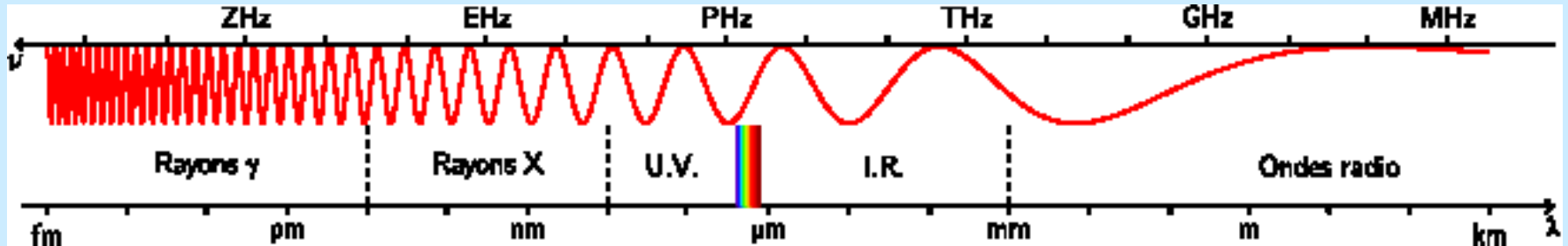
- ✓ Ils ont constitués par un champ électromagnétique sinusoïdal de fréquence ν ou de longueur d'onde λ , se propageant dans le vide à la vitesse c , vitesse de la lumière.
- ✓ L'énergie du rayonnement est quantifiée et son transport a lieu sous forme de photons. Chaque photon transporte une énergie E donnée par :

$$E = h \nu \quad (1.1)$$

h : constante de Planck

$h = 6.6 \cdot 10^{-34} \text{ j.s}$





Domaine du spectre électromagnétique

- ✓ **Ondes radioélectriques ou ondes hertziennes** : oscillations d'électrons au sein d'un circuit électrique comme une antenne.
- ✓ **Micro-ondes** : oscillations d'électrons au sein de composants électriques spécifiques
- ✓ **Infrarouge** : oscillations de particules, vibration moléculaire, transitions d'électrons de valence au sein d'atomes ou de molécules
- ✓ **Lumière visible**: transitions d'électrons de valence de haute énergie, qui ont la particularité d'être détectées par l'œil humain.
- ✓ **Ultraviolet**: transitions d'électrons de valence d'atomes ou de molécules de plus haute énergie encore, et donc non observables par l'œil humain.
- ✓ **Rayons X**: transitions d'électrons des couches profondes au sein d'un atome, accélération ou décélération d'électrons libres de haute énergie.
- ✓ **Rayons gamma** : transitions au sein du noyau atomique, souvent émis lors de la désexcitation de noyaux-fils issu de la désintégration radioactive d'un noyau instable, de façon spontanée ou sous l'effet d'une accélération au sein d'un accélérateur de particules.

2- 2. Rayonnements corpusculaires

✓ Le rayonnement corpusculaire est un rayonnement d'énergie électromagnétique par l'intermédiaire de particules subatomiques en mouvements rapides.

✓ Ils sont constitués par des corpuscules de masse **m** animés d'une vitesse **v** ayant une énergie :

$$E_c = \frac{1}{2} mv^2 \quad (1.2)$$

✓ Pour tout corpuscule en mouvement correspond une onde associée, de longueur d'onde λ , suivant la relation (Louis DE BROGLIE 1924):

$$\lambda = h/mv \quad (1.3)$$

✓ Les particules peuvent être électriquement chargées ou neutres (électron, positron, proton, neutron, Particule α)

2- 3. Relation entre l'Energie et la longueur d'onde

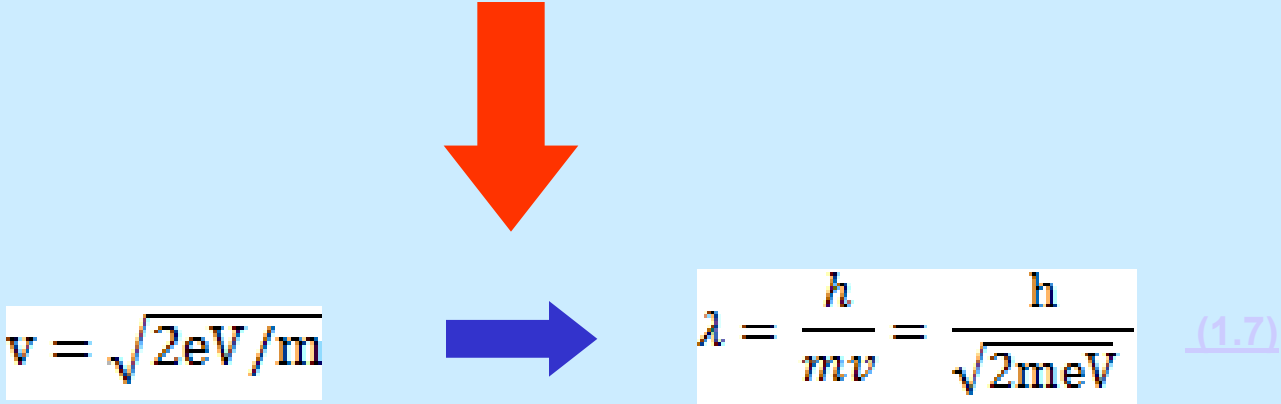
✓ Cas de rayonnement électromagnétique

$$E = h \nu = hc/\lambda \quad (1.4)$$

✓ Cas de rayonnement électronique

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 = eV \quad (1.5)$$

V : tension d'accélération
M : masse de l'électron
v : vitesse de l'électron



3. Relation entre l'Énergie et la longueur d'onde

Avec la correction de relativité de la masse:

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

Ou m_0 est la masse de l'électron au repos

✓ Si on substitue les constantes h , e , m_0 , et c par leur valeur numérique et qu'on exprime l'énergie en eV, [la relation \(1.7\)](#) devient :

$$\lambda = \frac{12.26}{\sqrt{E_c (1 + 0.979 \cdot 10^{-6} E_c)}}$$

NB: Pour les énergies inférieures à 100keV on peut négliger la correction de la relativité de la masse de l'électron et utiliser la relation simplifiée :

$$\lambda = \frac{12.26}{\sqrt{E_c (\text{eV})}} \quad (1.10)$$

Voici la valeur calculée de la longueur d'onde associée à un électron pour quelques valeurs de l'énergie, avec et sans correction de la relativité ; l'emploi de la formule (1-10) est justifié en dessous de 100keV

$E (\text{eV})$	$\lambda (\text{\AA})$ non corr	$\lambda (\text{\AA})$ corr
10^2	1.236	1.236
10^4	0.1236	0.1220
10^5	0.0387	0.0370
10^6	0.0122	0.0087

3. Relation entre l'Énergie et la longueur d'onde

✓ Cas du rayonnement neutronique

❖ Les neutrons utilisés pour la diffraction sont les neutrons thermiques sortant du modérateur d'une pile atomique ; ces neutrons ayant subi un grand nombre de collisions avec les atomes du modérateur sont en équilibre thermique avec ces atomes et leur énergie cinétique moyenne est :


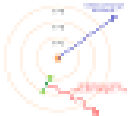
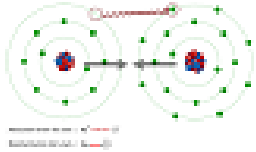
$$\frac{1}{2} M_n v^2 = \frac{3}{2} kT$$

M_n : masse du neutron, k la constante de Boltzman, T la température absolue

❖ Leur longueur d'onde moyenne sera donc.

$$\lambda = \frac{h}{M_n v} = \sqrt{\frac{h^2}{3M_n kT}}$$

1.-4 : Classification des rayonnements suivant leur énergie

Energie (eV)	Rayons électromagnétiques	Rayons corpusculaires	Classifications	action
10^8			Grande Energie	
10^7	Rayon γ			
10^6			Moyenne Energie	
10^5	Rayon X			
10^4		Electrons		
10^3			Faible Energie	
10^2	U.V			
10	Visible			
1				
10^{-1}	I.R			
10^{-2}		Neutrons thermiques		
10^{-3}				
10^{-4}				
10^{-5}				
10^{-6}	Ondes hertziennes			
10^{-7}				

Chapitre 2: Notions sur l'interaction rayonnements avec la matière

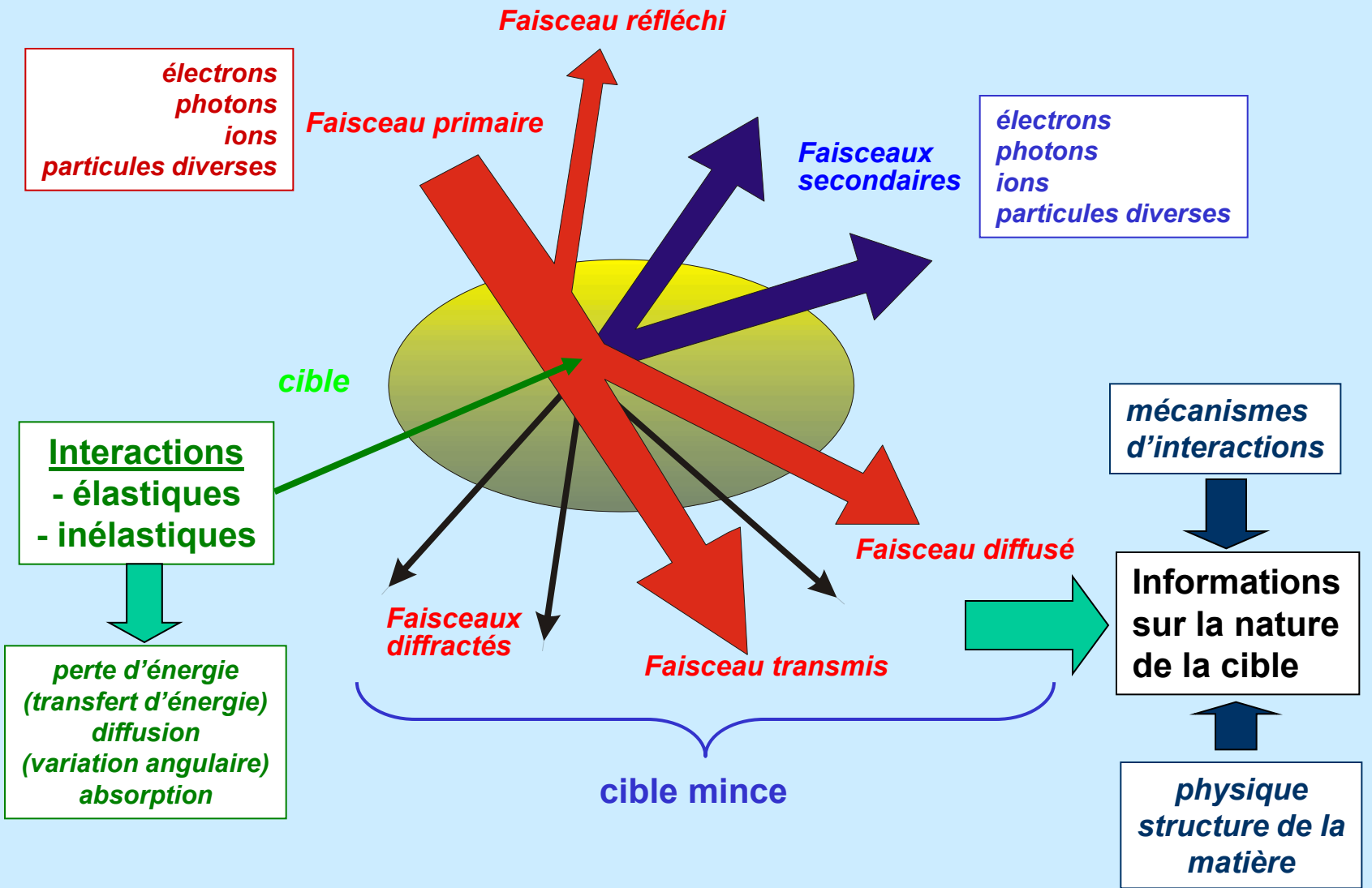
Objectif

- ✓ **Pouvoir citer et décrire les phénomènes d'interaction rayonnement matière**
 - **Particules chargées**
 - **Photons**
 - **Neutrons**
- ✓ **Pouvoir définir les grandeurs utilisées en interaction rayonnement matière**

Plan

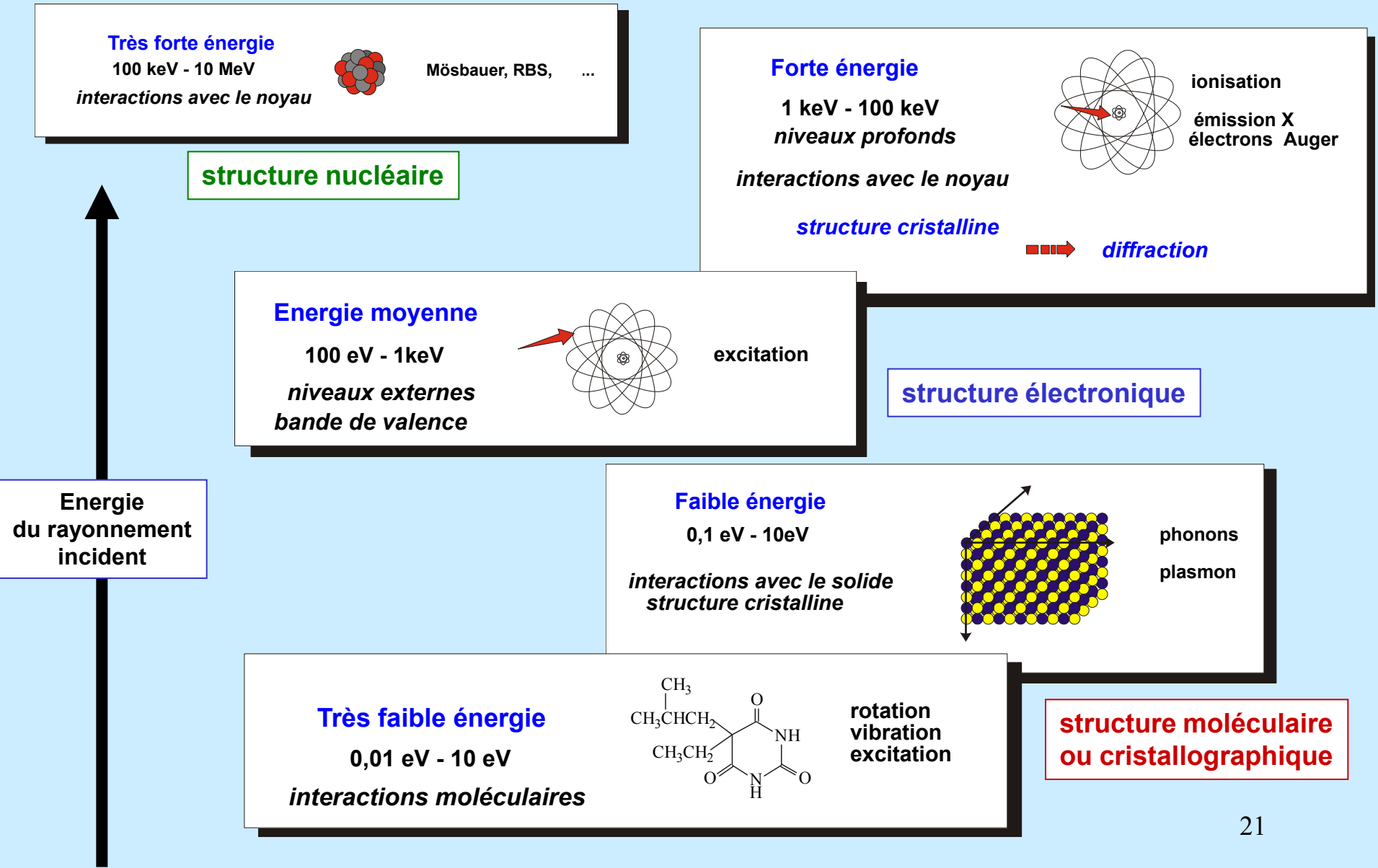
- ✓ **Généralités**
- ✓ **Interactions des particules chargées avec la matière**
 - Interactions des particules chargées lourdes (proton, α , ion)
 - Interactions des électrons avec la matière
- ✓ **Interactions des photons avec la matière**
 - Types d'interactions
 - Faisceau de photons dans la matière
- ✓ **Interactions des neutrons avec la matière**
 - Types d'interactions
 - Pénétration des neutrons dans la matière

1- Généralités



1- Généralités

Mécanismes mis en jeu en fonction de l'énergie



❖ l'action d'une irradiation dépend des ionisations et excitations des atomes le long des trajectoires des particules ionisantes

❖ Un rayonnement est dite ionisant s'il est susceptible d'arracher des électrons à la matière

Mais, il faut que:

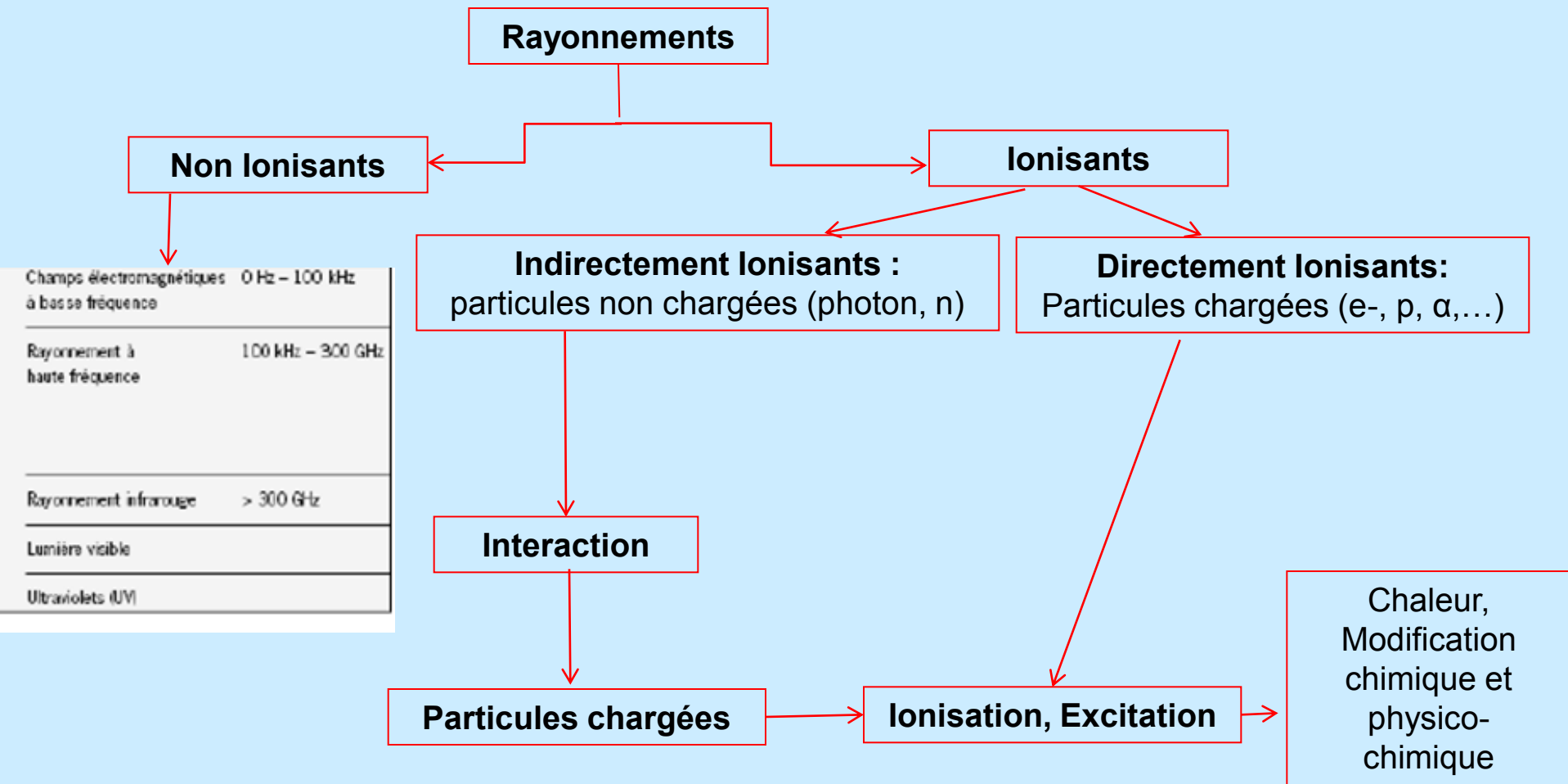
$$E_R > E_L$$

E_R : Energie du rayonnement

E_L : Energie de liaison des électrons considérés

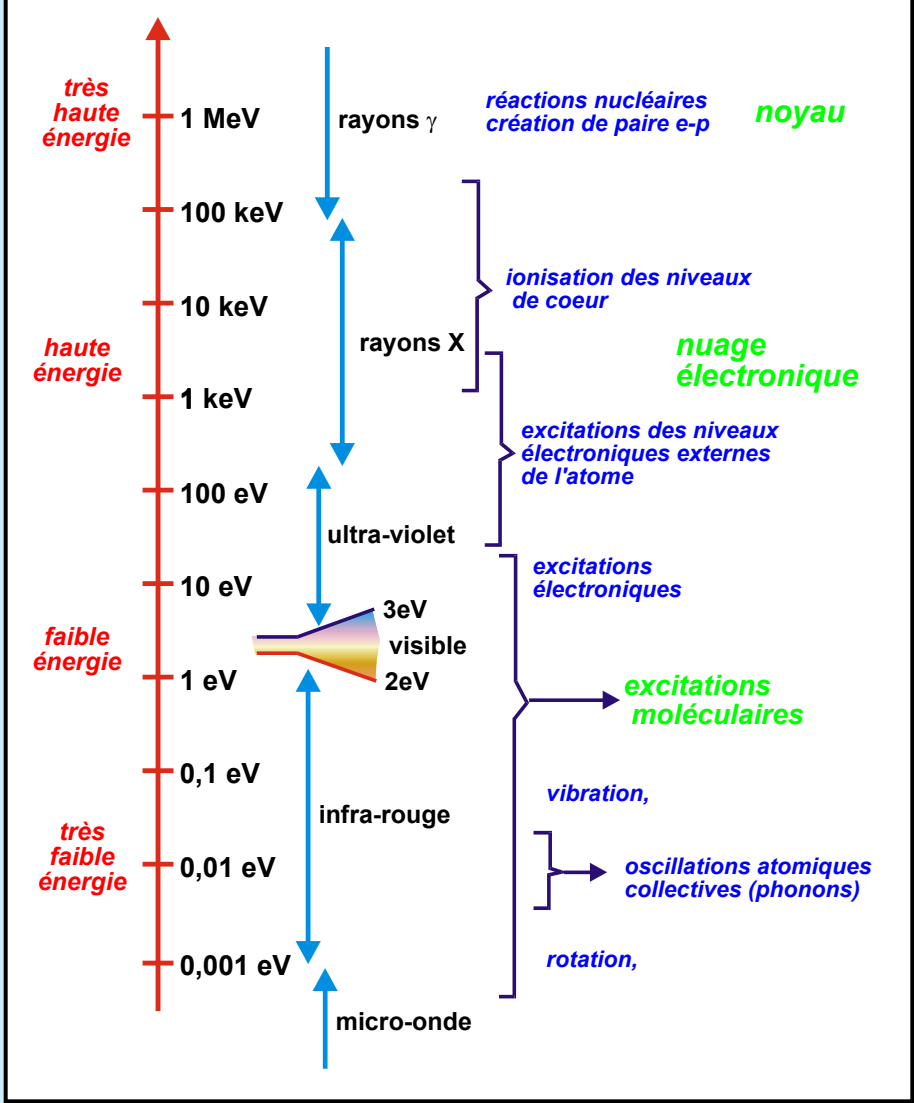
(Au minimum 10eV)

1- Généralités

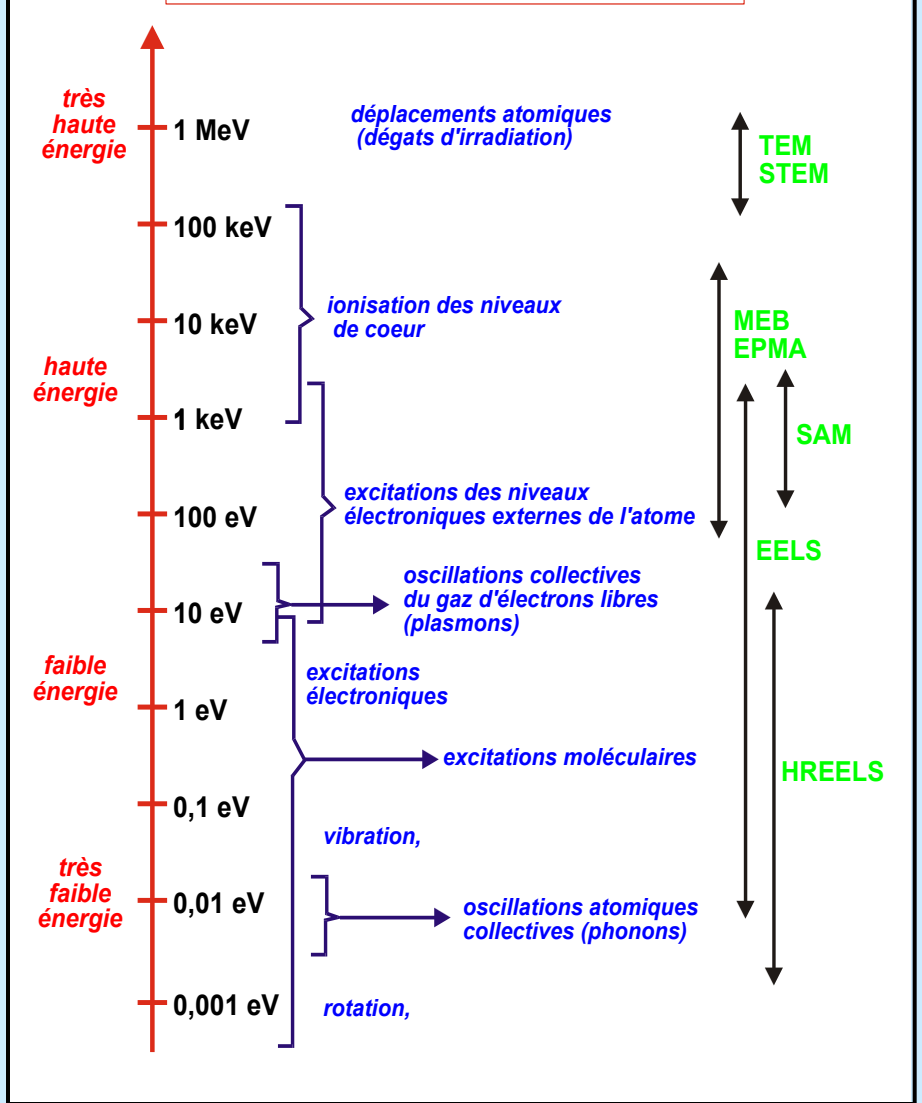


1- Généralités

Interactions photons-matière



Interactions électrons-matière



1- Généralités

Électrons, protons, ions neutrons

masse : m

vitesse : \tilde{v}

quantité de mouvement : $\tilde{p} = m\tilde{v}$

énergie (cinétique) : $E_c = \frac{1}{2}m\tilde{v}^2$

longueur d'onde associée : $\lambda = \frac{h}{m\tilde{v}} = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$

vecteur d'onde : $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

$$E_c = \frac{\eta^2 k^2}{2m} = \frac{p^2}{2m}$$

$$\left(\eta = \frac{h}{2\pi}\right)$$

$$\tilde{p} = \eta k$$

photons

fréquence : ν (Hz)

pulsation : $\omega = 2\pi\nu$

longueur d'onde : $\lambda = \frac{c}{\nu}$

vecteur d'onde : $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{c}$

nombre d'onde (cm^{-1}) : $\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda}$

énergie : $E = h\nu = \eta\omega = \frac{hc}{\lambda}$

$$\tilde{\nu}_{\text{cm}^{-1}} = 8065 E_{\text{eV}}$$

$$E_{\text{eV}} = \frac{12400}{\lambda_{\text{nm}}}$$

$$c = 2,997\,929\,10^{10} \text{ cm/s}$$

$$h = 4,134\,10^{-15} \text{ eV.s}$$

$$\eta = 1,054\,10^{-34} \text{ J.s}$$

1- Généralités

électron et longueur d'onde

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

$$E = eV = \frac{1}{2}mv^2$$

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$



non relativiste :

$$\lambda_{(nm)} = \frac{1,23}{\sqrt{V_{(volts)}}}$$

$$v_{(cm/s)} = 0,59310^8 \sqrt{V_{(volts)}}$$



relativiste

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

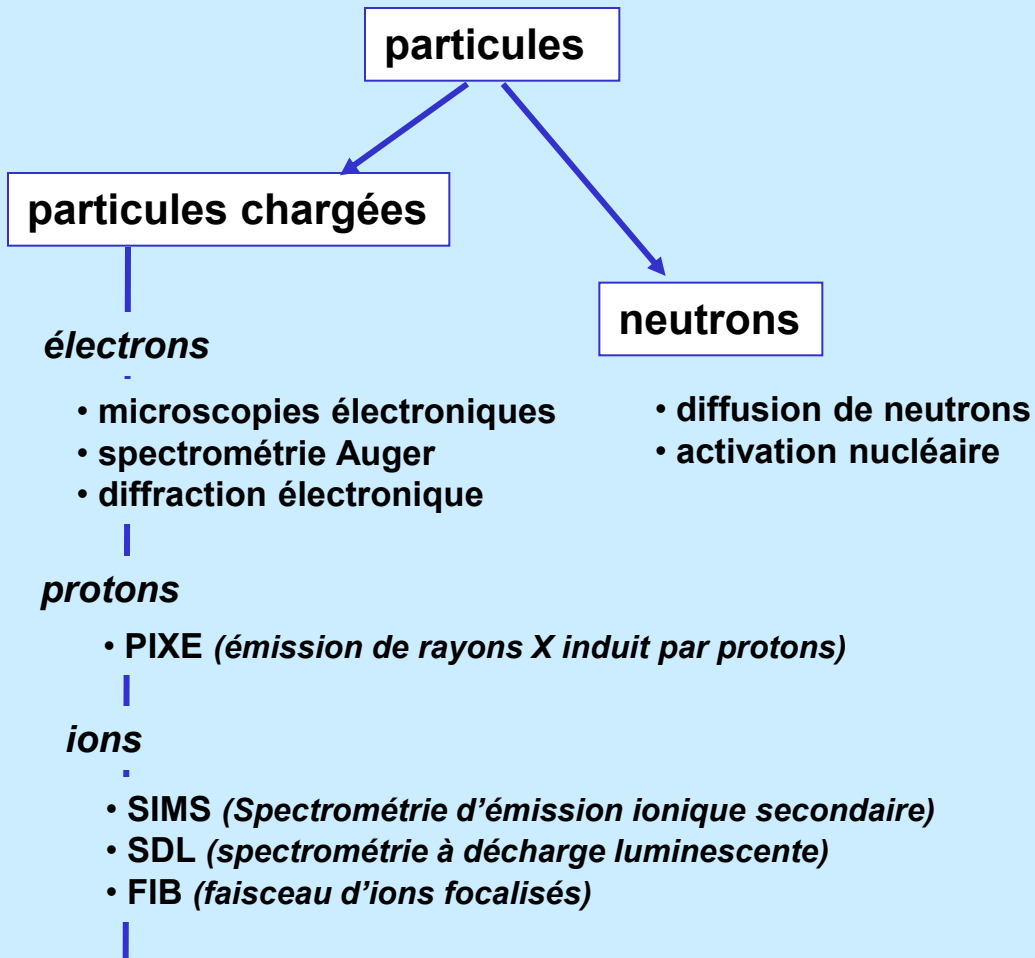
$$\lambda_{(nm)} = \frac{1,23}{\sqrt{V + 10^{-6} V^2}}$$

Energie (keV)	non-relativiste		relativiste		$\Delta v/v$
	λ (nm)	v (km/s)	λ (nm)	v (km/s)	
10	0,0123	59 300	0,0112	58 500	1%
50	0,0055	132 600	0,0054	124 200	6%
100	0,0039	187 500	0,0037	164 400	12%
1000	0,0012	593 000	0,0009	282 300	52%

1- Généralités

Interactions rayonnement-matière

nature du rayonnement primaire



rayonnements électromagnétiques

micro-onde

Infra-rouge

- spectrométries d'absorption (IR et Raman)
- spectrométries d'émission (étincelle, ICP)

Ultra-violet

- spectrométrie de fluorescence UV

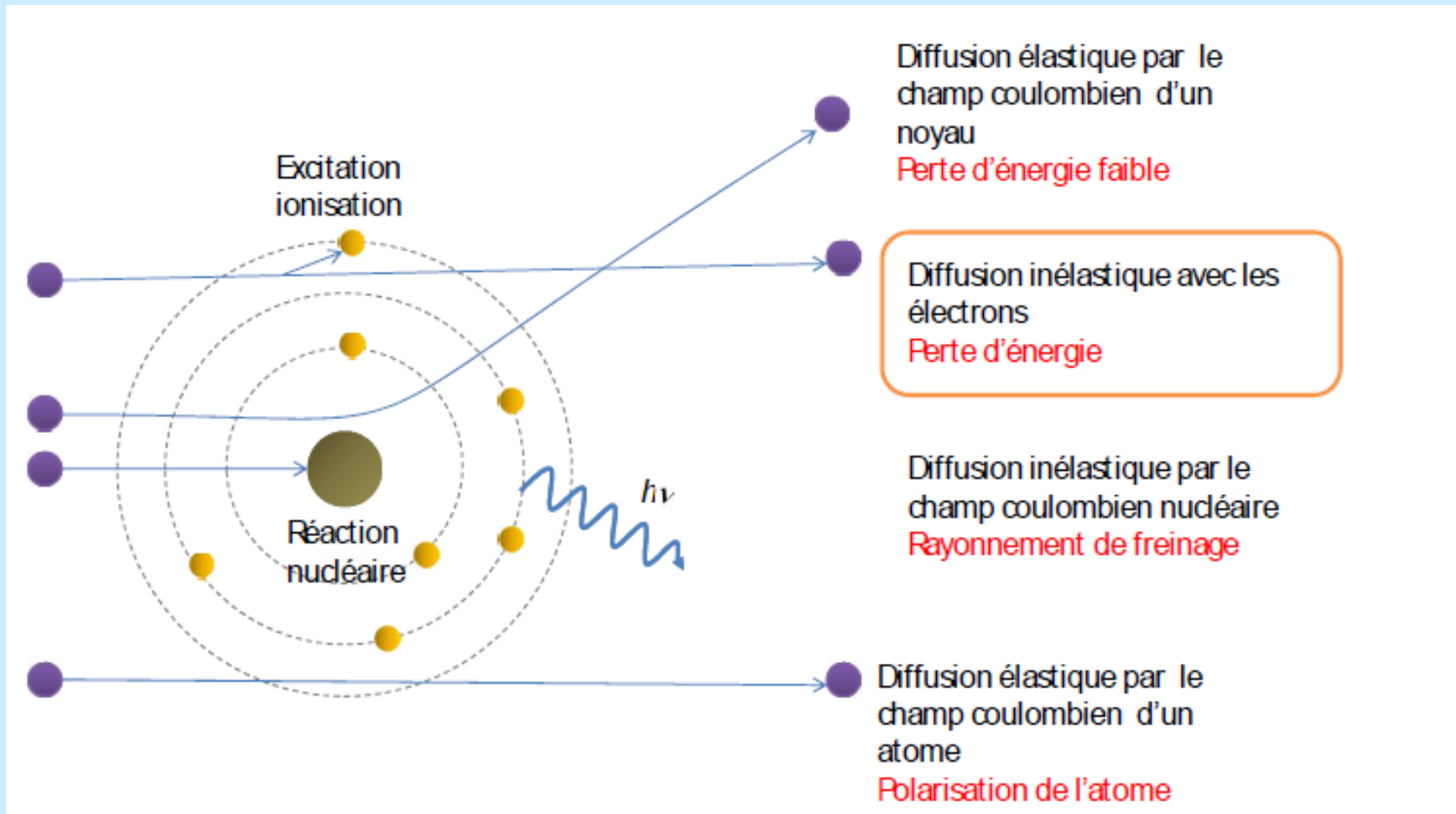
Rayons X

- spectrométrie de fluorescence X
- spectrométrie de photoélectrons
- diffraction X

Rayons γ

- spectrométrie Mössbauer

2- Interaction des particules chargées avec la matière



2- Interaction des particules chargées avec la matière


Transfert d'énergie linéique (LET):

- ✓ Lorsque on s'intéresse au milieu absorbant (et non plus à la particule), on utilise le LET (*Linear Energy Transfer*)

- ✓ Définition : énergie moyenne déposée localement (*ionisation excitation*) au milieu absorbant par une particule d'énergie spécifiée qui traverse une distance donnée dans le milieu

$$\text{LET} = dE/dx \text{ [J.m}^{-1}\text{]}$$

Souvent exprimé en keV/ μm

- ✓ **Interaction : transfert d'énergie du rayonnement incident au milieu traversé**
 - Électrons atomiques
 - Noyaux
 - ✓ **Dépendance : nature et énergie rayonnement, matière**
 - ✓ **Trois aspects sont à considérer :**
 - Interaction elle-même : mécanisme
 - Conséquences sur la particule : ralentissement aboutissant à son arrêt
 - Conséquences sur le milieu : énergie déposée
-  ➤ **Aboutissement aux effets des radiations**
- **Interactions des particules chargées avec la matière sont à caractère obligatoire. Pour les autres elle est aléatoire**

2- Interaction des particules chargées avec la matière

Notion du pouvoir d'arrêt:

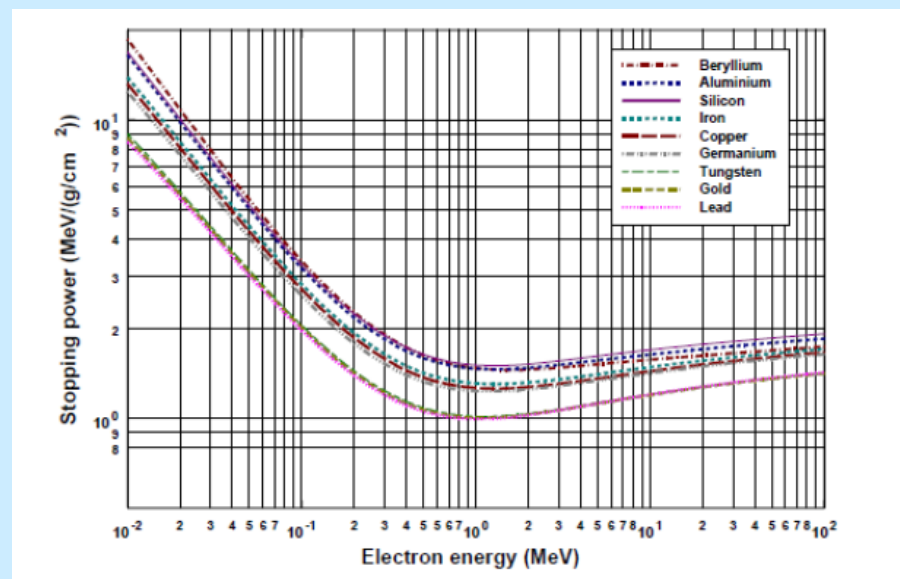
✓ Les interactions aboutissent à un transfert d'énergie de la particule aux électrons atomiques et (dans une moindre mesure) aux noyaux de la matière

✓ L'énergie perdue par unité de longueur parcourue est défini par le pouvoir d'arrêt **S**, tel que:

$$S = \frac{dE}{dl}$$

Pouvoir d'arrêt linéaire : S
[J.m⁻¹] ou [MeV.cm⁻¹]

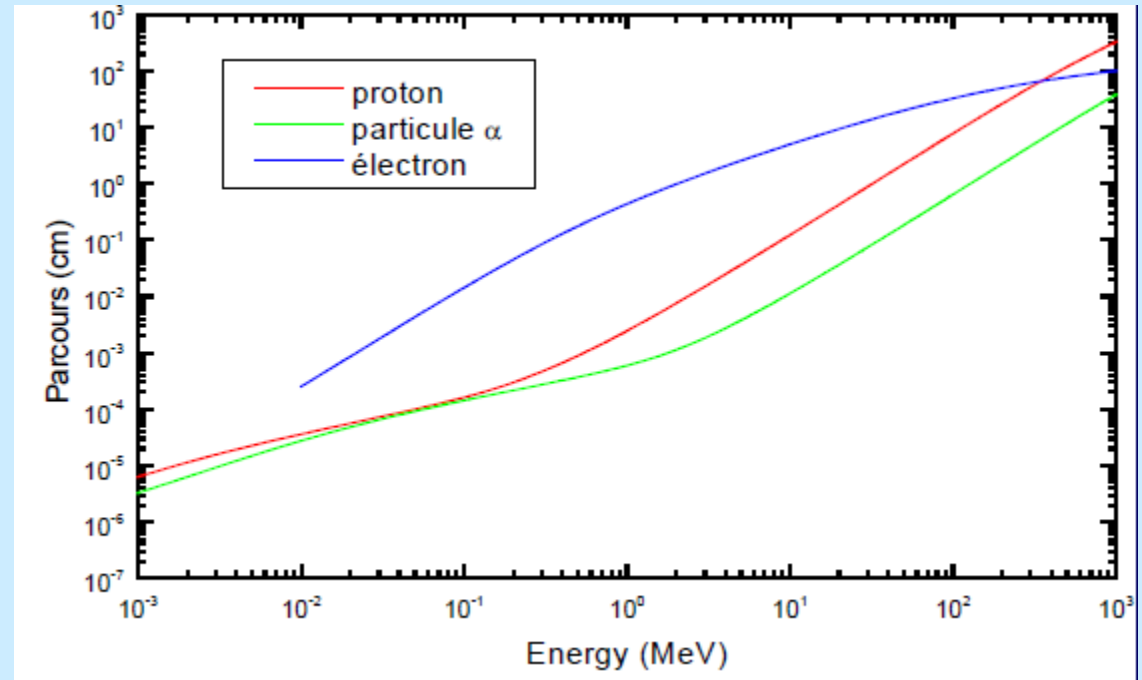
Pouvoir d'arrêt massique : S/ρ
[J.m².kg⁻¹] ou [MeV.cm².g⁻¹]



Parcours

- ❑ Particules chargées perdent leur énergie progressivement en (pénétrant dans la matière et finissent par être arrêtées.
- ❑ Notion de parcours : distance au-delà de laquelle des particules sont totalement absorbées par la matière

$$R = \int_0^R dx = \int_0^{E_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$



2- Interaction des particules chargées avec la matière

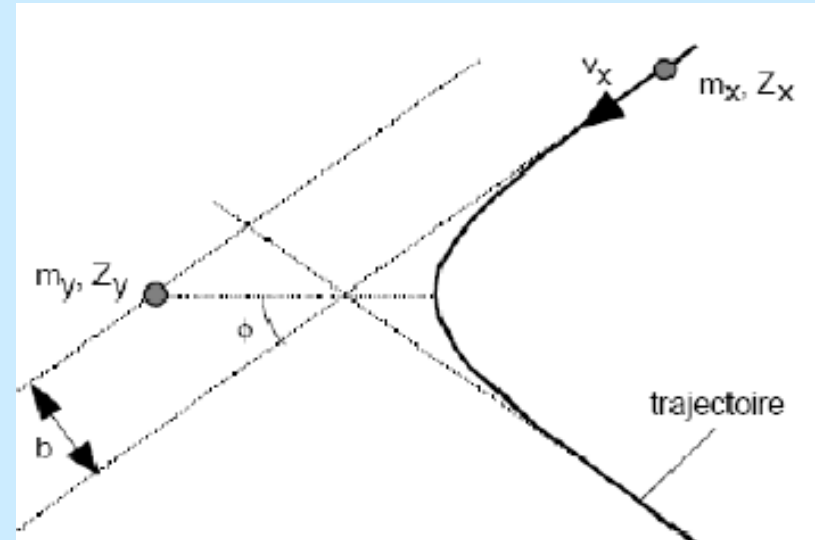
Interaction avec électrons du milieu

❑ **Interaction coulombienne** où la particule chargée cède son énergie au milieu

- **Ionisation** : éjection d'un électron du cortège électronique
- **Excitation** : transfert d'un électron sur une couche électronique différente

❑ **Particule ralenti progressivement avant de s'arrêter** lorsque l'épaisseur du milieu sera suffisante

❑ **Perte d'énergie par collision** caractérisée par le pouvoir d'arrêt par collision

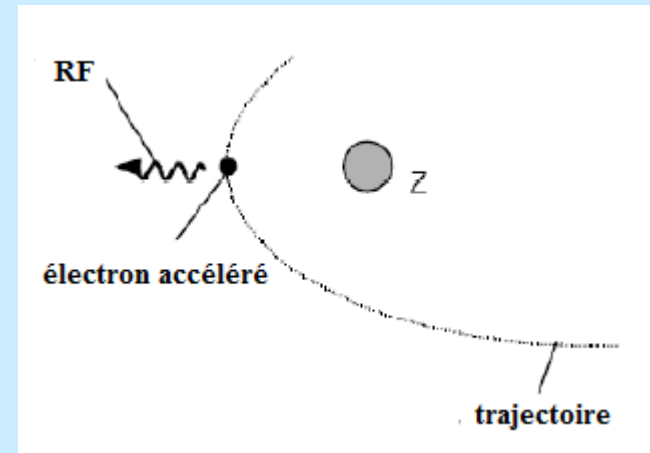


2- Interaction des particules chargées avec la matière

Interactions avec noyaux du milieu

- Particule interagit avec champ coulombien du noyau
 - Particule a proximité du noyau peut subir une accélération ou décélération
 - Changement de vitesse se traduit par une émission électromagnétique (rayonnement de freinage: RF) *donc une perte d'énergie*
 - Intensité rayonnement de freinage proportionnelle à $(Z_{\text{milieu}}^2 / M_{\text{particule}}^2)$

- Perte d'énergie radiative Caractérisée par le pouvoir d'arrêt par radiation
- Direction d'émission du RF tend à être de plus en plus dans la direction incidente de la particule quand l'énergie de cette dernière augmente



Ralentissement des particules

- ❑ Différents mécanismes d'interactions
- ❑ Le pouvoir d'arrêt comporte différentes composantes

$$\frac{S_{(total)}}{\rho} = \frac{S_{coll}}{\rho} + \frac{S_{rad}}{\rho} + \frac{S_{nucl}}{\rho} = \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{dE}{dx} \right)_{coll} + \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{dE}{dx} \right)_{rad} + \frac{1}{\rho} \cdot \left(\frac{dE}{dx} \right)_{nucl}$$

- ❑ *Pouvoir d'arrêt électronique (ou de collision) dû aux collisions avec les électrons atomiques*
- ❑ *Pouvoir d'arrêt radiatif provenant des émissions de rayonnement de freinage*
- ❑ *Pouvoir d'arrêt nucléaire dû aux collisions élastiques coulombiennes dans lesquelles l'énergie est transférée aux atomes*

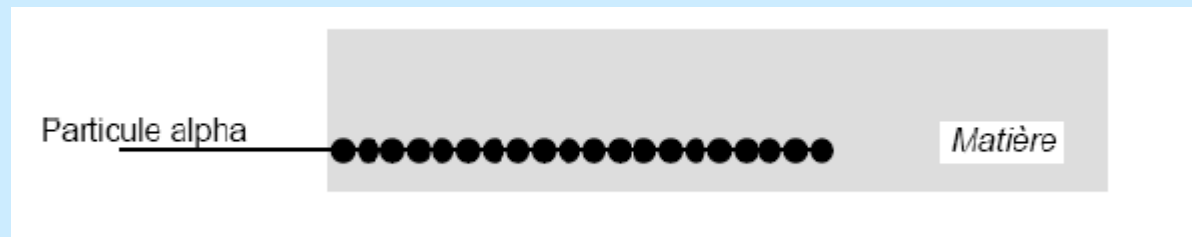
2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas des particules chargées lourdes

- ❑ Perte d'énergie par choc coulombien avec les électrons atomiques est le phénomène prépondérant

- ❑ Pouvoir d'arrêt
 - Provient presque exclusivement de la composante coulombienne
 - Uniquement à faible énergie que composante nucléaire non négligeable

- ❑ Existence d'une trajectoire rectiligne
 - Perte d'énergie par choc sur les électrons
 - Perte d'énergie faible à chaque choc
 - Particule ne subit qu'une faible déviation



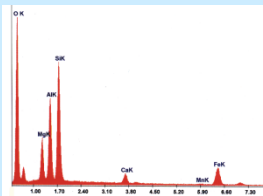
2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas d'interaction avec une cible massive

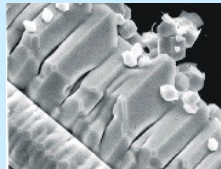
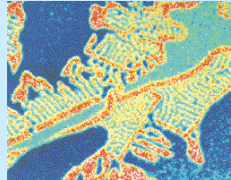
Cas des électrons

rayonnements observés

spectre élémentaire



cartographie X



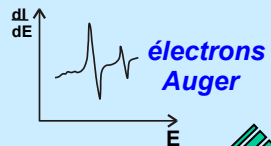
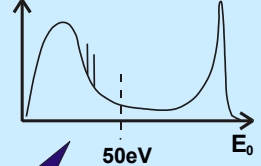
contraste topographique



Contraste de Z

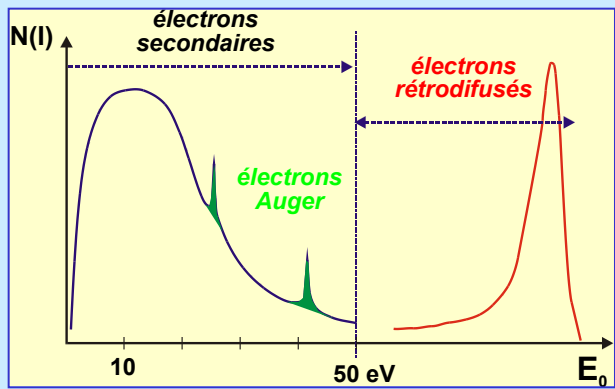
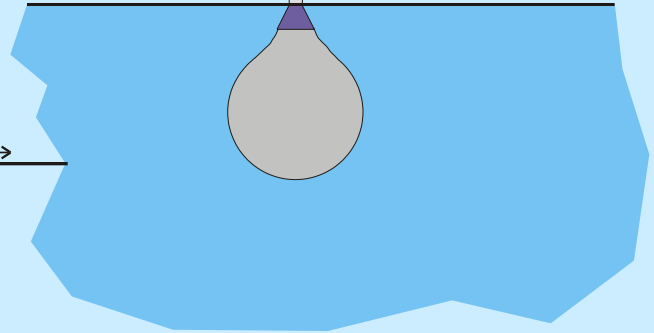
émissions X

électrons secondaires / électrons rétrodiffusés



émissions électroniques

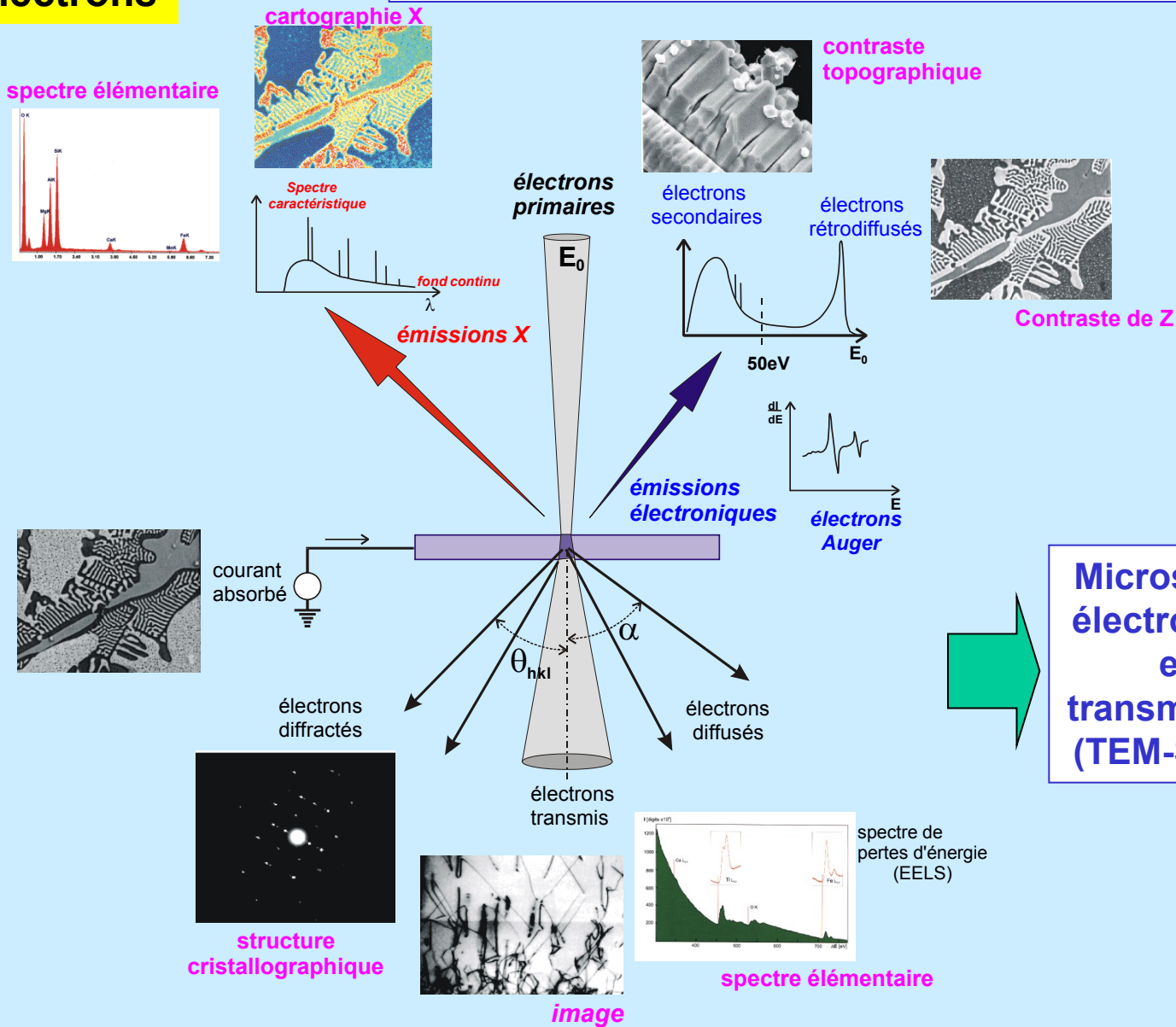
courant absorbé



2- Interaction des particules chargées avec la matière

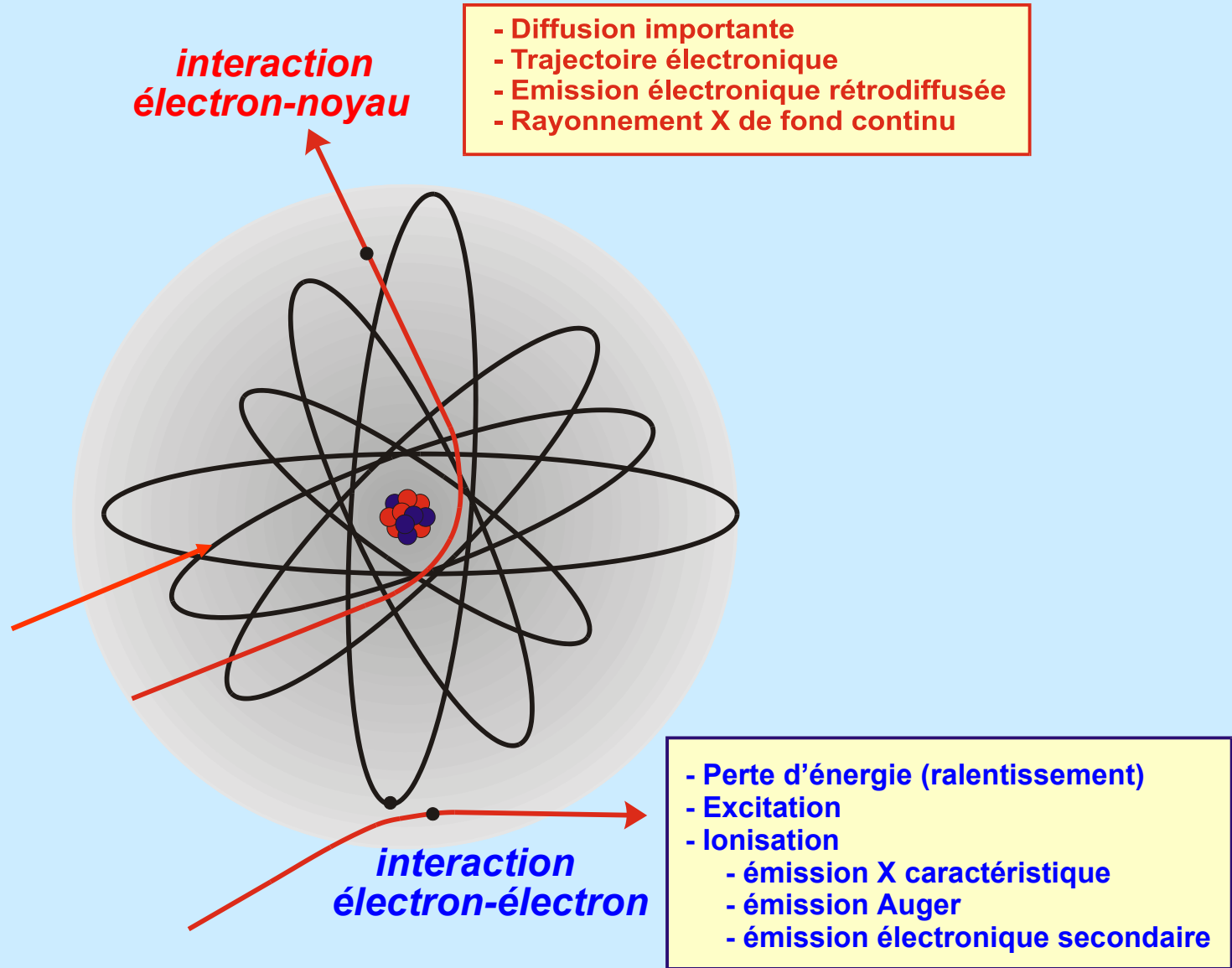
Cas des électrons

Cas d'interaction avec une cible mince



2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas des électrons

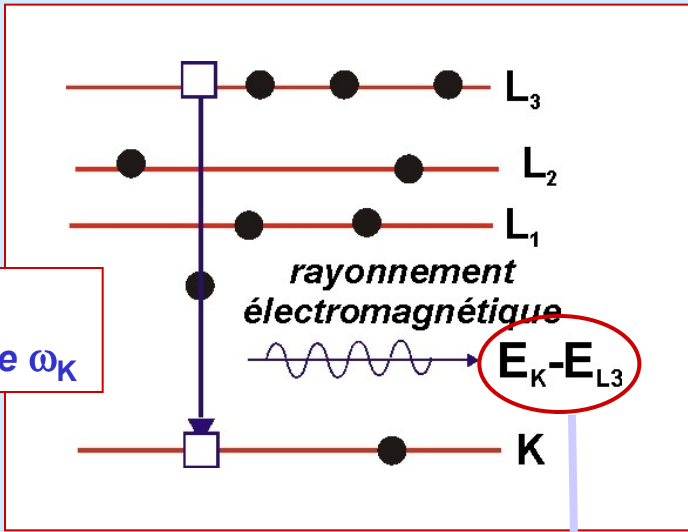


2- Interaction des particules chargées avec la matière

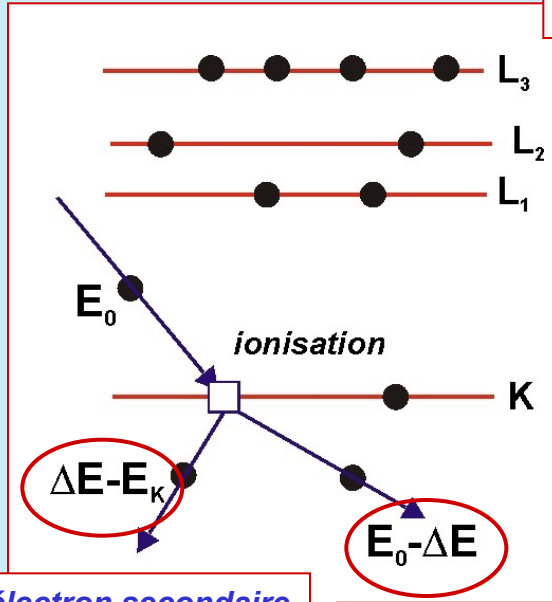
Cas des électrons

Interaction avec les électrons de cœur

transition radiative
rendement de fluorescence ω_K



rayonnements caractéristiques
de la composition chimique de
la cible

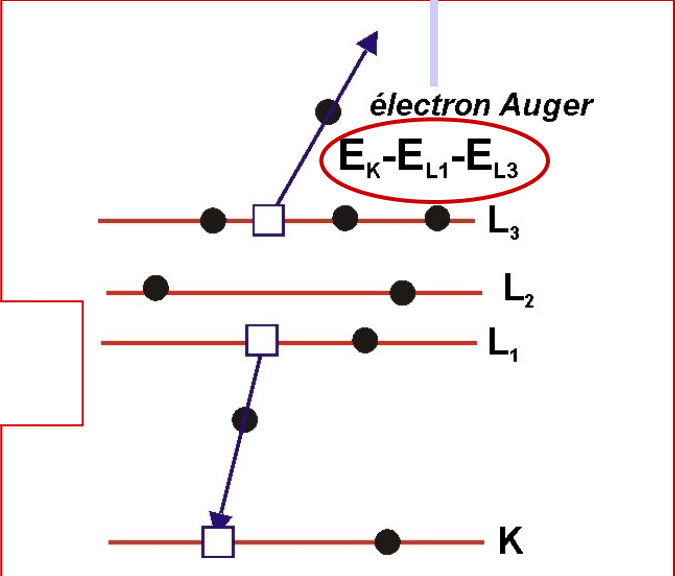


10^{-15} s

$a + \omega = 1$

électron primaire
(de plus faible énergie)

transition Auger
rendement Auger a_K



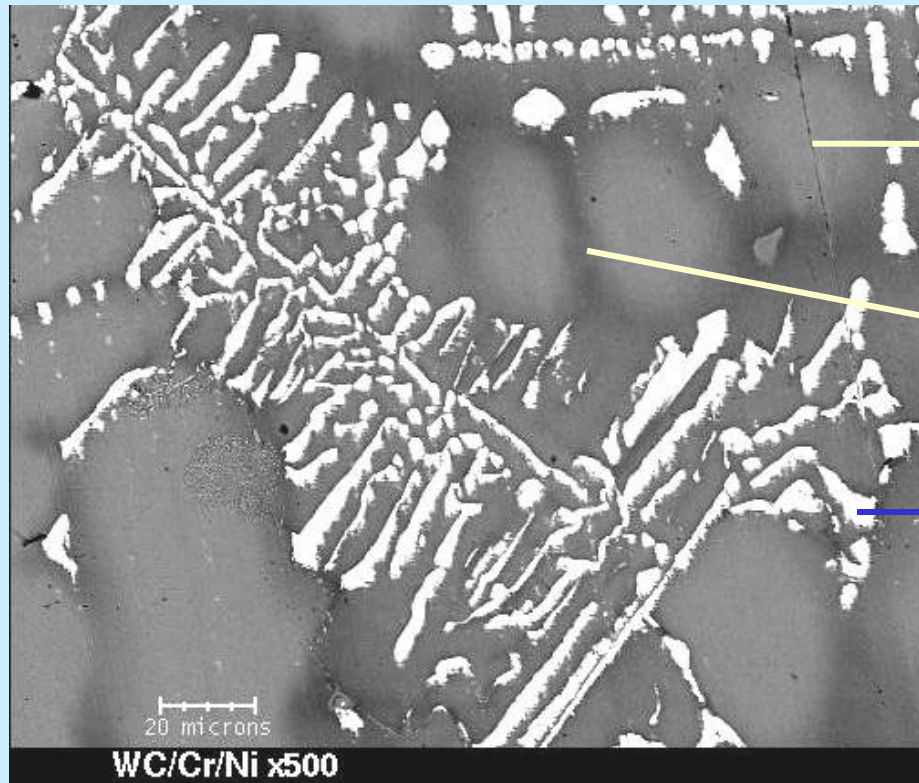
$\Delta E > E_K$

électron secondaire

2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas des électrons

**Contraste de nombre atomique : électrons rétrodiffusés
(interaction élastique e- / noyau)**



dendrite
(plus riche en Ni)

zone inter-dendritique
(plus riche en Cr)

Carbures de W

Visualisation de carbures de W dans une matrice Cr-Ni par détection des électrons rétrodiffusés :

Les carbures WC ont un Z plus élevé que la matrice Cr-Ni (70 contre 25), ils ont une plus forte émission rétrodiffusée. On peut même observer les dendrites de solidification de l'alliage (la dendrite est plus riche en Ni)

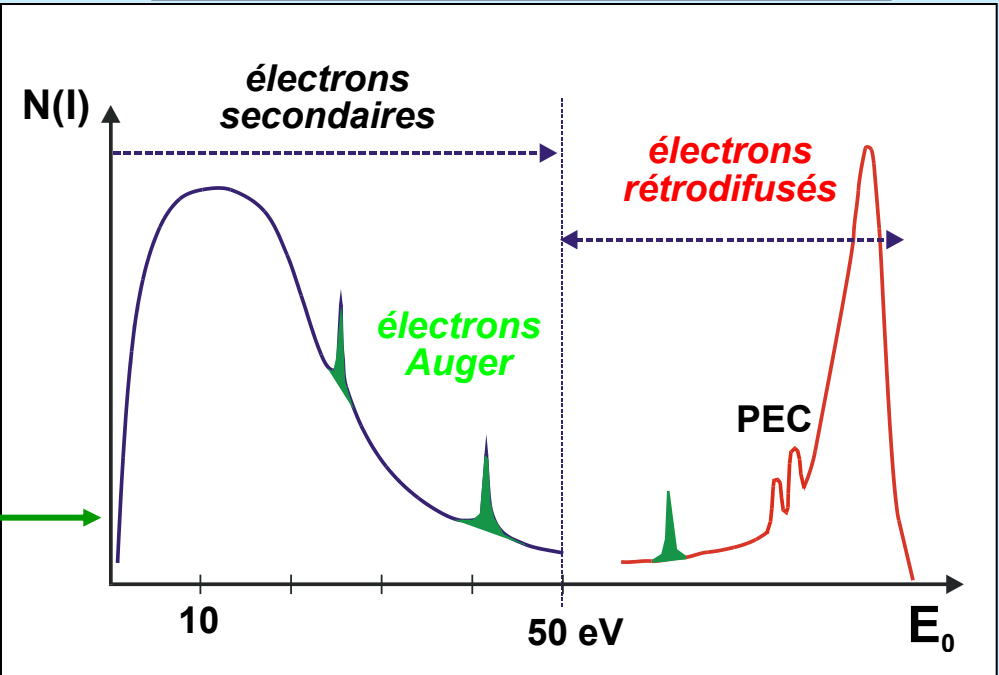
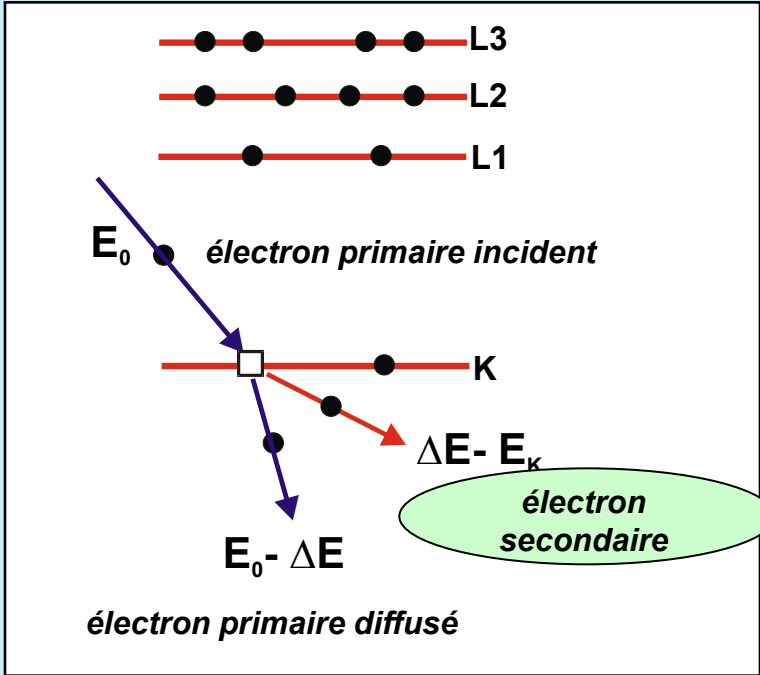
2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas des électrons

L'émission électronique secondaire

électrons issus de la cible
(après ionisation)

faible énergie moyenne (5 à 50 eV)
(énergie la plus probable : 20 eV)



Spectre d'émission électronique de surface

- pas d'influence directe de Z
- très sensible aux défauts de surface

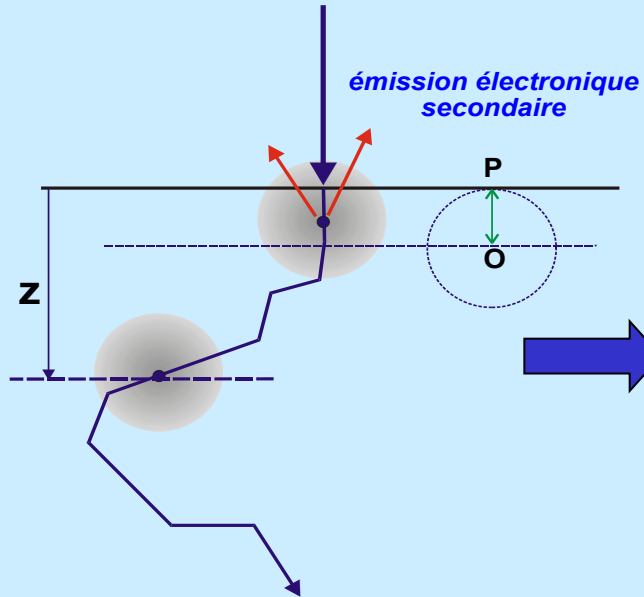
2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas des électrons

Conséquence de la faible énergie des électrons secondaires

libre parcours moyen faible (quelques nm)

l'électron secondaire perd rapidement toute son énergie sur quelques dizaines de nm...



Seuls, les secondaires émis près de la surface auront une probabilité non-nulle de s'échapper et d'être détectés

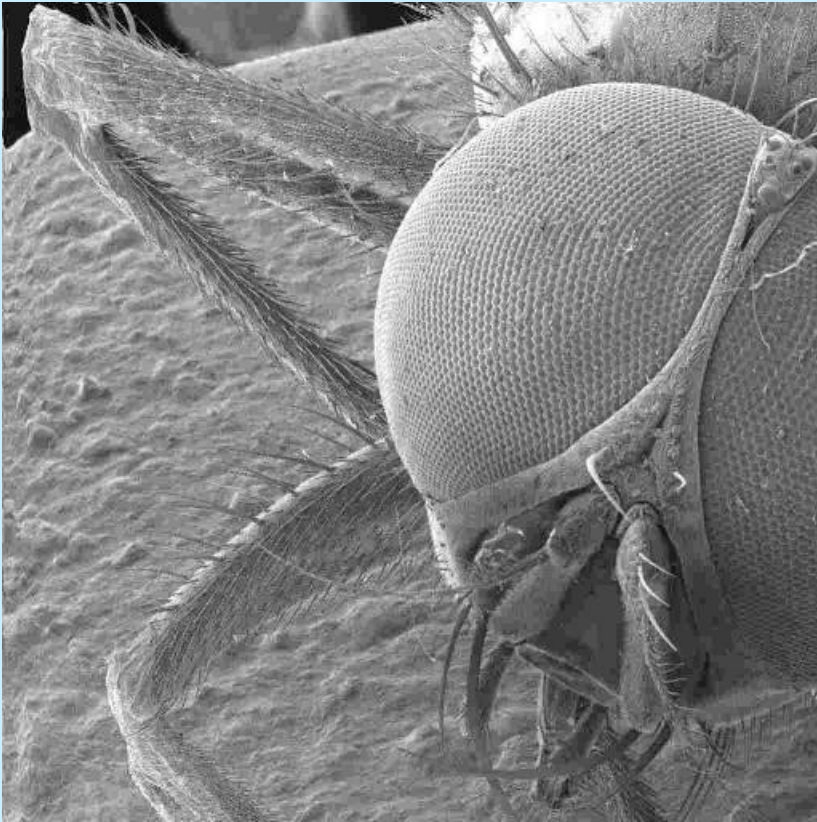
Emission de surface

de petits défauts de surface auront une forte influence sur l'émission par une absorption plus ou moins grande

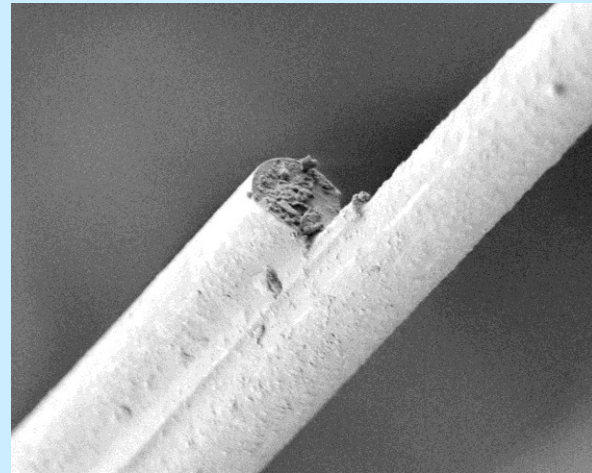
Contraste topographique

2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas des électrons

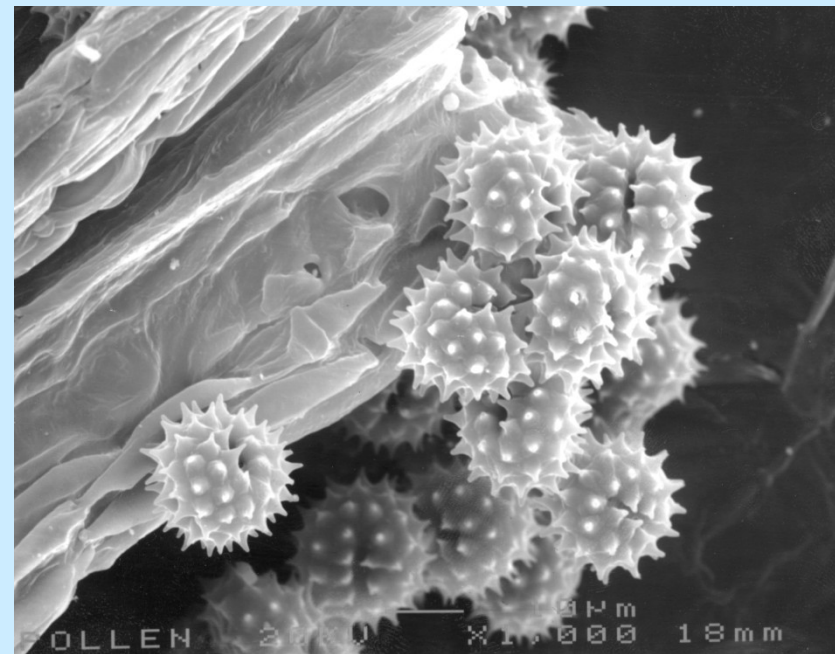


tête de mouche



fibres de verre

Images en électrons secondaires

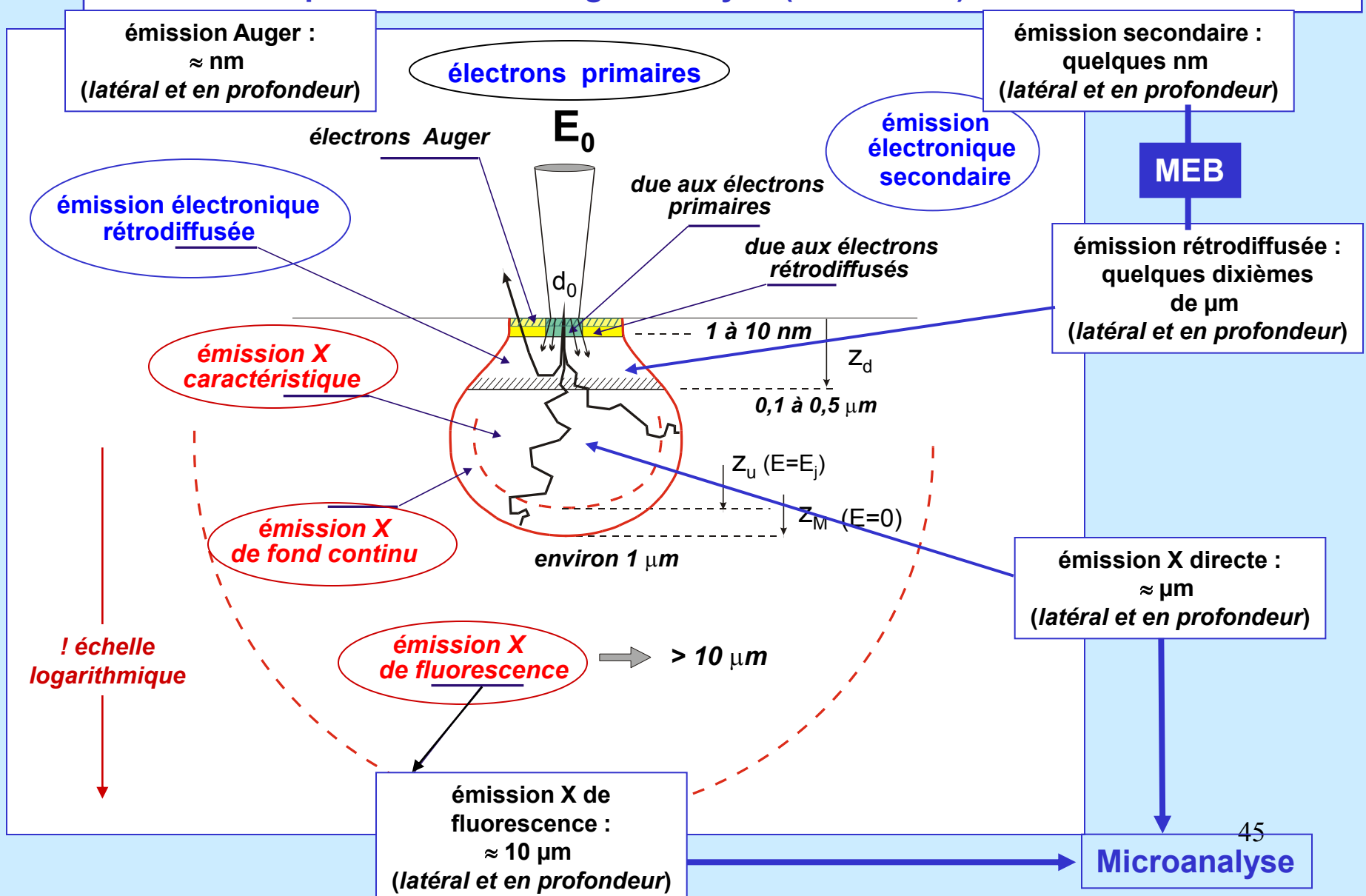


grains de pollen

2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas des électrons

Résolutions spatiales selon le signal analysé (MEB et MS) sur échantillons massifs



2- Interaction des particules chargées avec la matière

Cas des électrons

□ Phénomène prédominant Cas des électrons

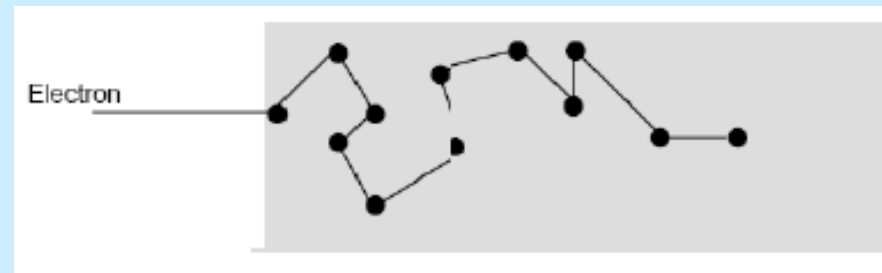
- Jusqu'à énergie moyenne (< 10 MeV dans Pb) : interactions avec les électrons atomiques sont prédominantes
- Énergie importante (> 10 MeV dans Pb) : rayonnement de freinage prédomine

□ Pouvoir d'arrêt :

$$\frac{S_{rad}}{S_{coll}} \approx \frac{T.Z}{700}$$

□ Trajectoire

- Lors d'une collision, le changement de trajectoire est important dans le cas des électrons
- Trajectoire brisée avec possibilité de *rétrodiffusion*



Rayonnements électromagnétiques

❑ Rayons X : origine électronique

- Rayonnement de freinage (rayons X continus)
- Transitions entre les couches électroniques (retour à l'état fondamental)

❑ Rayons γ : origine nucléaire

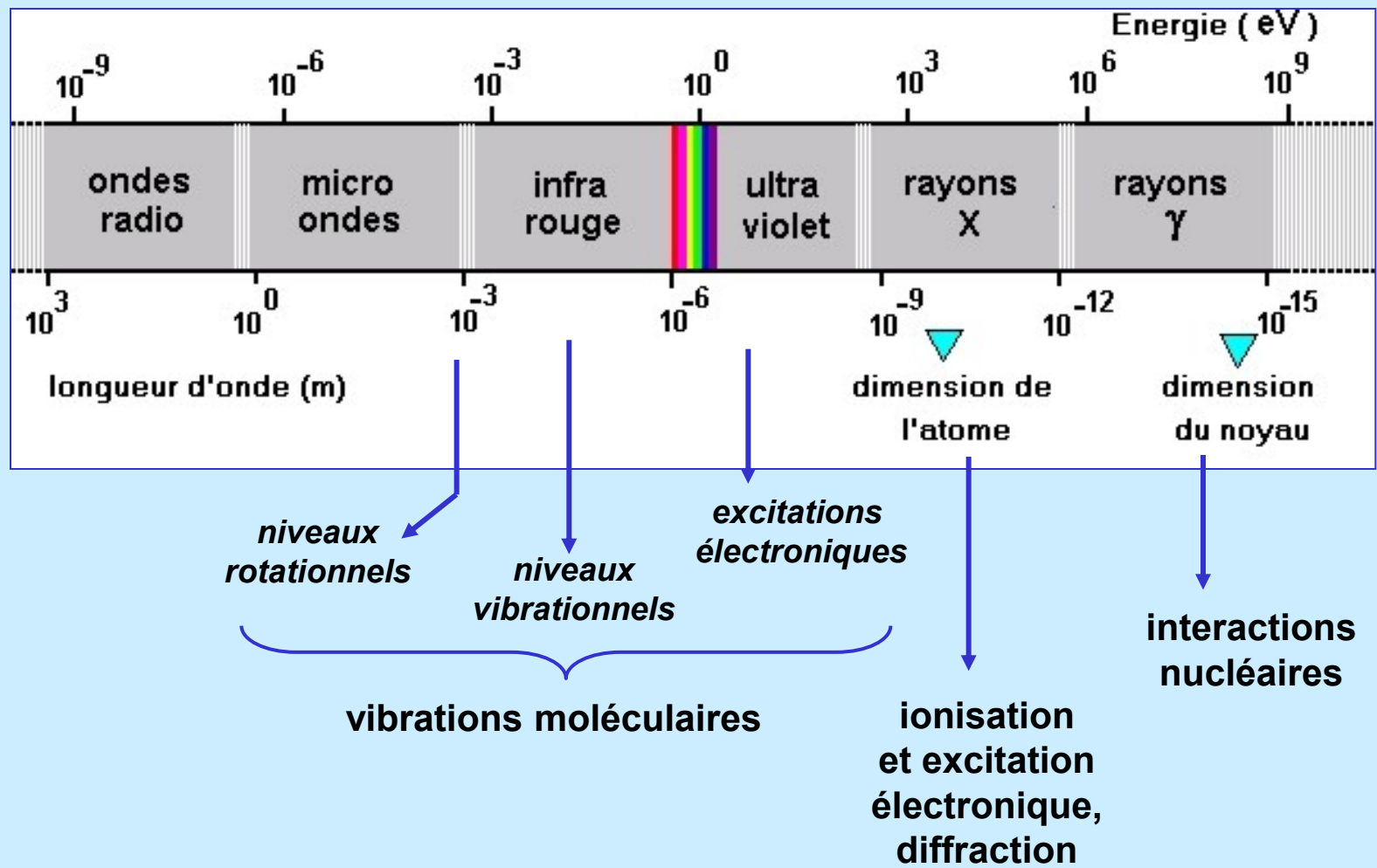
- Transitions nucléaires (radioactivité)
- Photons d'annihilation (combinaison positon avec électron)

❑ Rx et Ry : même comportement vis à vis de la matière

❑ Quelque soit l'origine : $E = h\nu = (hc)/\lambda$

❑ Interaction de type aléatoire (non obligatoire)

2- Interaction des Photons avec la matière



2- Interaction des Photons avec la matière

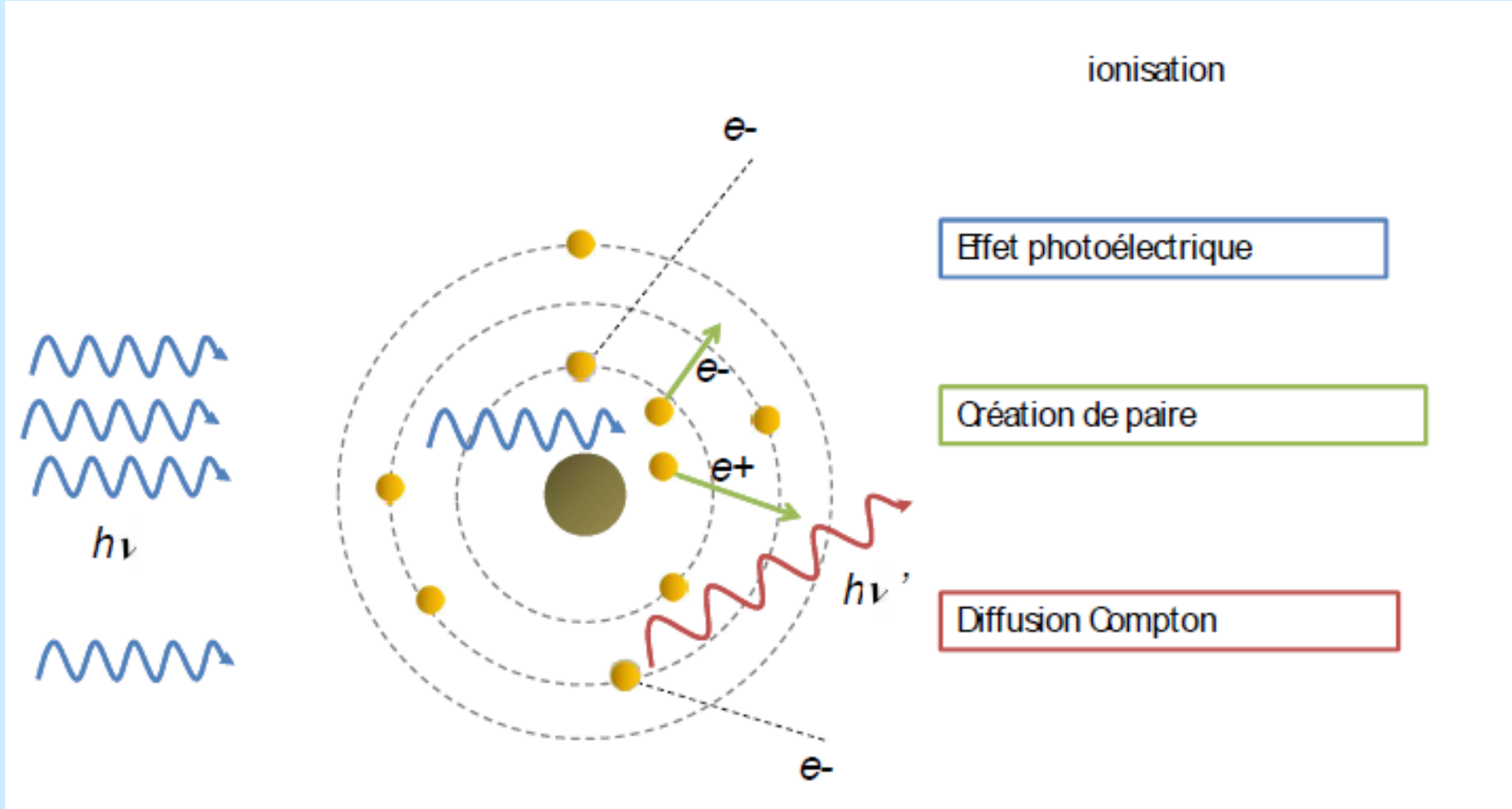
Classification des rayonnements électromagnétiques

Domaine	Energie (eV)	Fréquence (Hz)	Longueur d'onde	Nombre d'onde (cm ⁻¹ ou Kayser)
Radiofréquences	4 10 ⁻⁶ – 10 ⁻⁶	10 ⁵ – 3 10 ⁸	3000m – 1m	3 10 ⁻⁶ – 0,01
Micro-ondes	10 ⁻⁶ – 10 ⁻³	3 10 ⁸ – 3 10 ¹¹	1m – 1mm	0,01 – 10
IR lointain	1,2 10 ⁻³ – 0,05	3 10 ¹¹ – 1,2 10 ¹³	1mm – 25μm	10 – 400
IR moyen	0,05 – 0,6	1,2 10 ¹³ – 1,5 10 ¹⁴	25μm – 2 μm	400 – 5000
IR proche	0,6 – 1,9	1,5 10 ¹⁴ – 4,6 10 ¹⁴	2μm – 0,65μm	5000 – 15500
visible	1,9 – 3,1	4,6 10 ¹⁴ – 7,5 10 ¹⁴	0,65μm – 0,38μm	15500 – 25000
proche UV	3,1 – 4,1	7,5 10 ¹⁴ – 10 ¹⁵	0,38μm – 0,30μm	25000 – 120 000
UV moyen	4,1 – 15	10 ¹⁵ – 3,6 10 ¹⁵	0,30μm – 200nm	inuité
UV lointain	15 – 100	3,6 10 ¹⁵ – 2,4 10 ¹⁶	200nm – 10nm	inuité
Rayons X mous	100 – 1000	2,4 10 ¹⁶ – 2,4 10 ¹⁷	10nm – 1,2nm	inuité
Rayons X moyens	1000 – 5 10 ⁴	2,4 10 ¹⁷ – 1,2 10 ¹⁹	1,2nm – 0,02nm	inuité
rayons X durs	5 10 ⁴ – 10 ⁵	1,2 10 ¹⁹ – 2,4 10 ¹⁹	0,02nm – 0,012nm	inuité
Rayons γ	10 ⁴ – 5 10 ⁸	2 10 ¹⁸ – 1,2 10 ²³	0,1nm – 6 10 ⁻⁵ nm	inuité

10⁻⁶ eV ➔ 10⁸ eV 10⁵ Hz ➔ 10²³ Hz 10⁻⁵ nm ➔ 10³ m

2- Interaction des Photons avec la matière

Interactions photons - matière



2- Interaction des Photons avec la matière

Interactions photons - matière

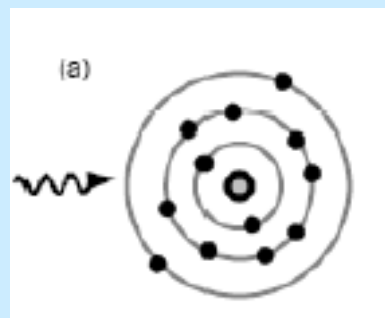
- Différents mécanismes d'interaction en fonction de l'énergie du photon et du lieu d'interaction

	Énergie perdue par un photon d'énergie initiale E_0		
	0	$0 < E < E_0$	E_0
Lieu d'interaction	Diffusion Élastique	Diffusion Inélastique	Absorption
Electrons	Thomson - Rayleigh	Compton	Photoélectrique
Noyau	-	-	Photonucléaire
Champ électromagnétique	-	-	Création de paires

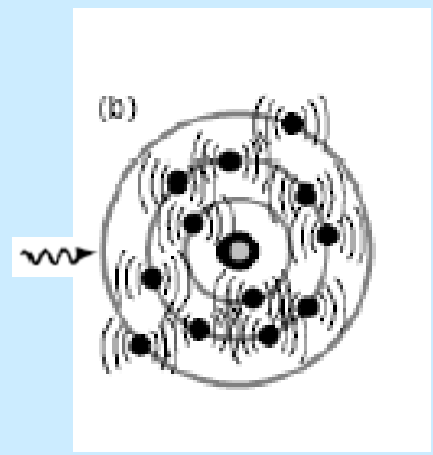
Diffusion élastique

□ Diffusion Rayleigh

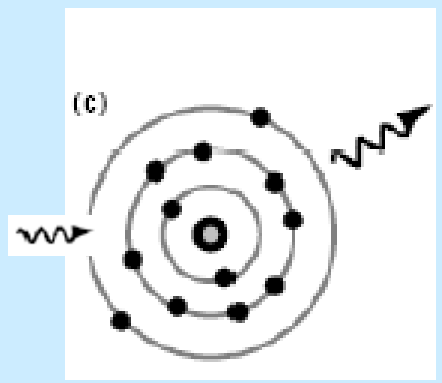
- Photon interagit avec tous les électrons des atomes



- Oscillation en phase



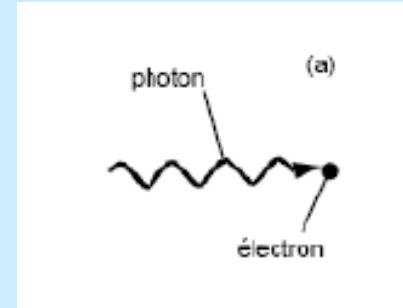
- Emission d'un photon



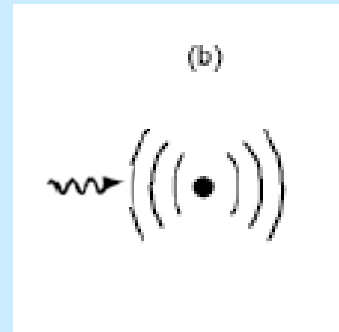
Diffusion élastique

☐ Diffusion Thomson

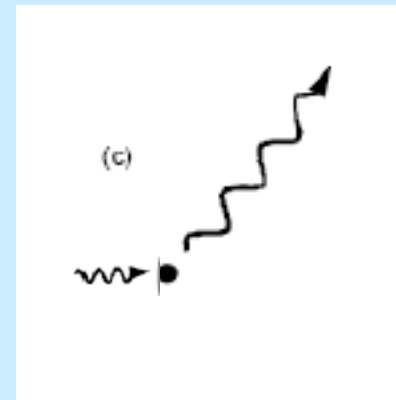
- Photon absorbé par un électron atomique



- Mise en oscillation forcée de l'électron



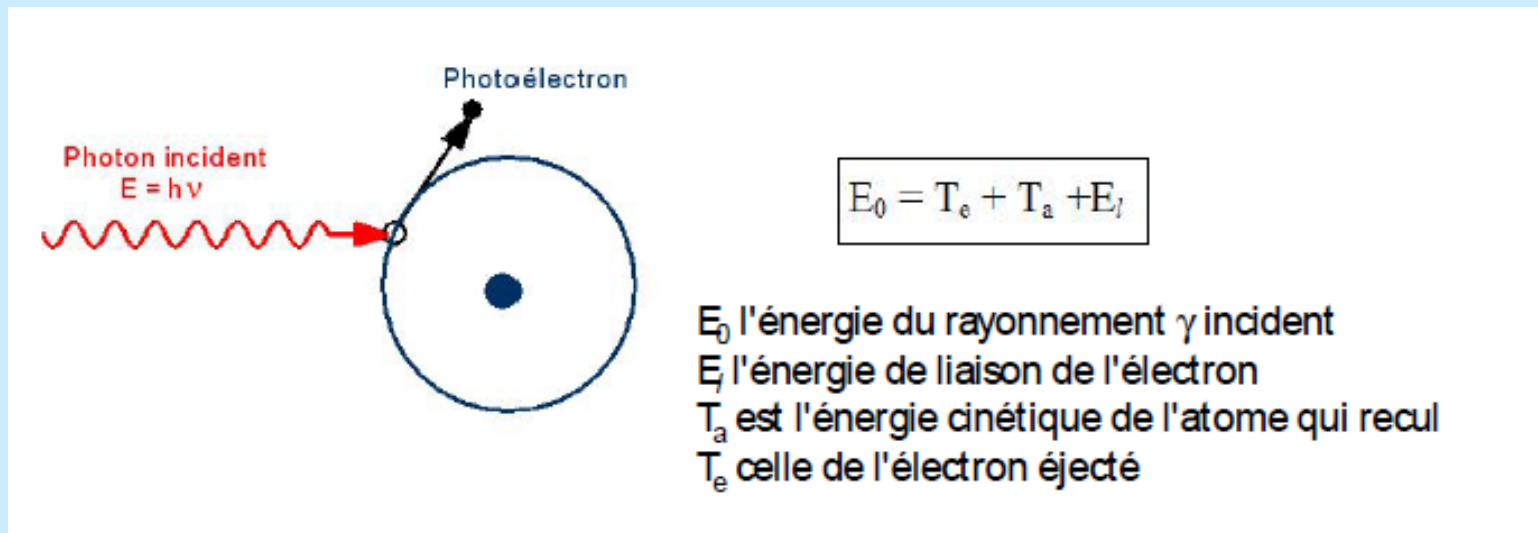
- Réémission d'un photon (même énergie, direction différente)



2- Interaction des Photons avec la matière

Effet photoélectrique

Dans l'effet photoélectrique, un rayonnement X ou γ est totalement absorbé par le milieu et un électron atomique est éjecté.



Exercice : montrer que l'effet photoélectrique ne peut pas avoir lieu sur un électron libre

2- Interaction des Photons avec la matière

Effet photoélectrique

$$E_\gamma = \frac{hc}{\lambda}$$

Si l'électron est libre



$$\left. \begin{array}{l} h\nu + m_e c^2 = m_e c^2 + T_e' \Rightarrow h\nu = T_e' \\ p_\gamma = p_e' \Rightarrow h\nu = p_e' c \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} T_e' = p_e' c \\ p_e'^2 c^2 = T_e' (T_e' + 2m_e c^2) \end{array} \right\} \Rightarrow m_e c^2 = 0$$

absurde

L'électron doit être lié à l'atome

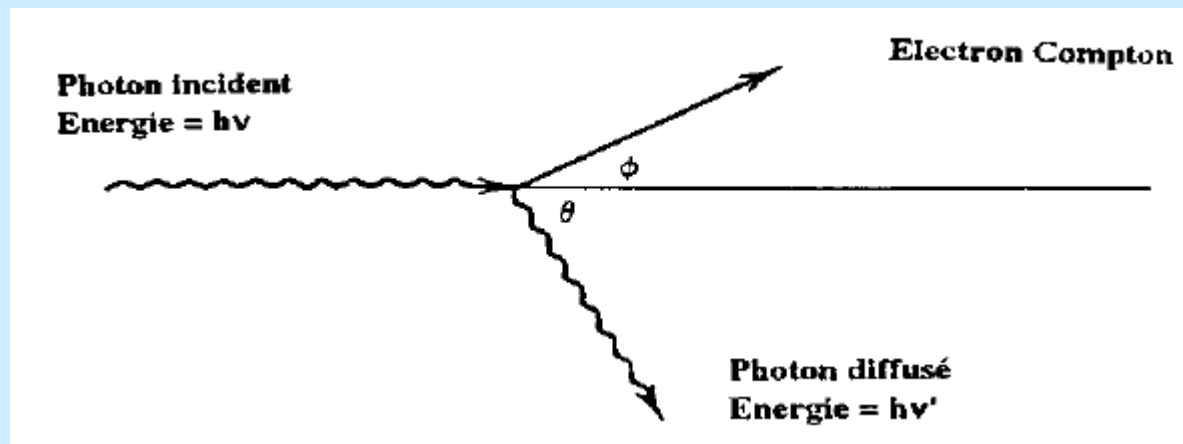
$$h\nu + m_e c^2 = m_e c^2 + T_e' + E_L + T_A \Rightarrow h\nu = T_e' + E_L + T_A$$

$$\vec{p}_\gamma = \vec{p}_e' + \vec{p}_A$$

2- Interaction des Photons avec la matière

Effet Compton

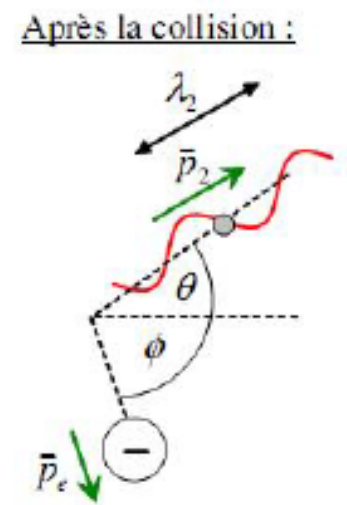
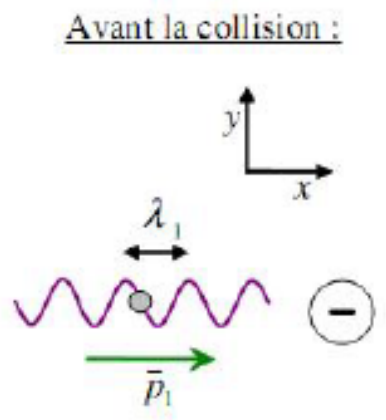
- Interaction avec **un électron peu lié** du milieu absorbeur



Dans la diffusion Compton, un rayonnement d'énergie $E_0 = h\nu$ est dévié d'un angle θ par rapport à sa direction incidente et l'électron recule dans la direction ϕ .

2- Interaction des Photons avec la matière

Effet Compton



conservation d'impulsion

$$\vec{p}_1 = \vec{p}_2 + \vec{p}_e$$

$$\begin{cases} p_1 = p_2 \cos(\theta) + p_e \cos(\varphi) & (1) \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0 = p_2 \sin(\theta) - p_e \sin(\varphi) & (2) \end{cases}$$

$$p_e^2 = p_1^2 - 2p_1 p_2 \cos(\theta) + p_2^2 \quad (3)$$

2- Interaction des Photons avec la matière

Effet Compton

conservation d'énergie

$$E_1 + m_e c^2 = E_2 + E_e$$

$$p_1 c + m_e c^2 = p_2 c + \sqrt{m_e^2 c^4 + p_e^2 c^2}$$

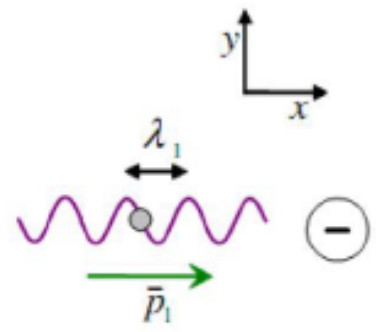
$$p_e^2 = (p_1 - p_2)^2 + 2m_e c(p_1 - p_2) \quad (4)$$

$$p_e^2 = p_1^2 - 2p_1 p_2 \cos(\theta) + p_2^2 \quad (3)$$

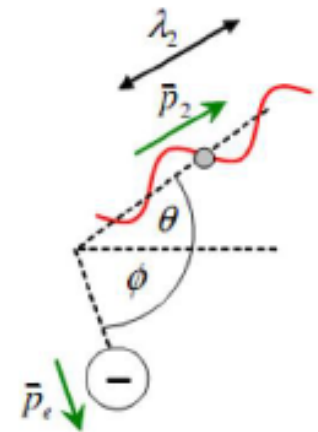
$$p_1 - p_2 = \frac{p_1 p_2}{m_e c} [1 - \cos(\theta)] \quad \xrightarrow{p = \frac{h}{\lambda}}$$

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e c} [1 - \cos(\theta)]$$

Avant la collision :



Après la collision :



2- Interaction des Photons avec la matière

Effet Compton

À partir des lois de conservation d'énergie et d'impulsion l'énergie E , du rayonnement après diffusion d'un angle θ s'écrit:

$$\boxed{\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{m_e c} [1 - \cos(\theta)]} \quad \longrightarrow \quad E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \varepsilon(1 - \cos(\theta))}$$

$$\varepsilon = \frac{E_\gamma}{m_e c^2}$$

$$\varepsilon = \frac{h}{m_e c} \times \frac{1}{\lambda} = 0.02426 \text{ \AA} \times \frac{1}{\lambda}$$

L'énergie cinétique de l'électron est donc

$$T_e = E_\gamma - E'_\gamma$$

$$T_e = E_\gamma \frac{\varepsilon(1 - \cos(\theta))}{1 + \varepsilon(1 - \cos(\theta))}$$

$$T_{e,\max} = E_\gamma \frac{2\varepsilon}{1 + 2\varepsilon}$$

L'énergie cinétique maximale de l'électron

2- Interaction des Photons avec la matière

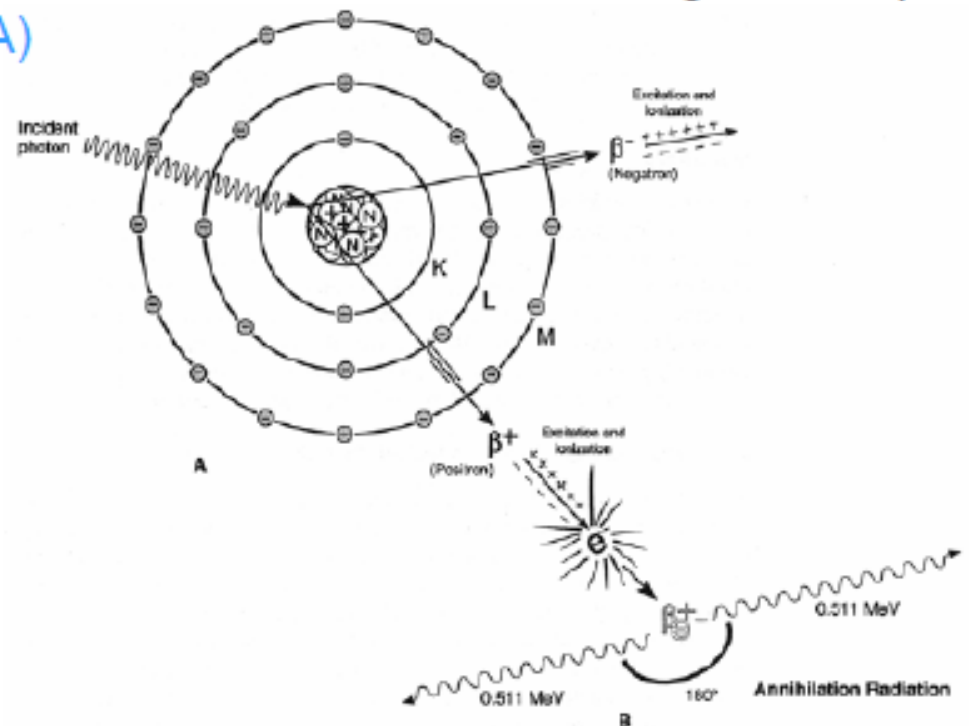
Création de paires (matérialisation)

■ Phénomène

- Matérialisation d'une paire électron – positron
- Disparition du photon au voisinage du noyau
- Excédent d'énergie du photon incident est distribué en énergie cinétique pour l'électron et le positron (A)

$$h\nu = T_{e^-} + T_{e^+} - 2m_e c^2$$

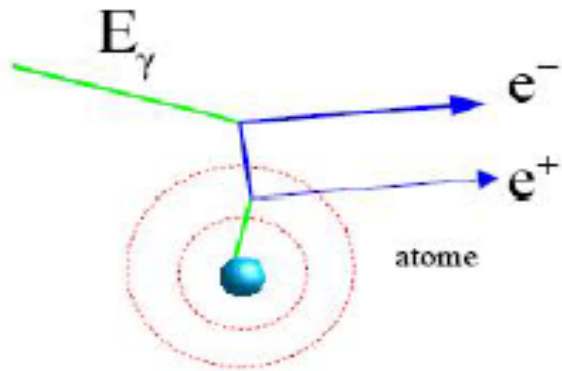
- Positron rapidement freiné (ionisation + excitation)
- Annihilation positon avec électron du milieu
- Émission de 2 photons de 511 keV (B)



2- Interaction des Photons avec la matière

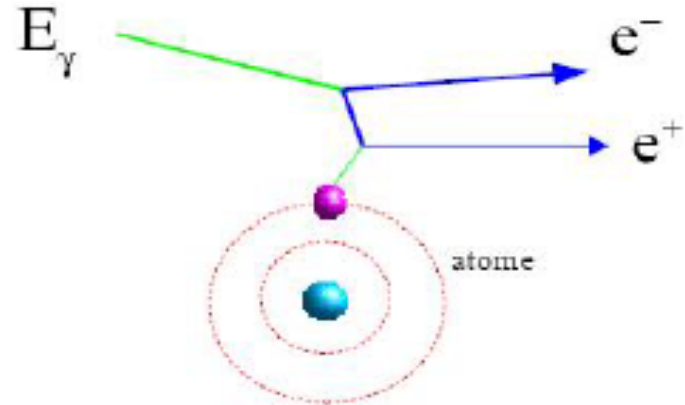
Création de paires (matérialisation)

la matérialisation d'un photon est impossible dans le vide



Dans le champ du noyau

$$E_\gamma \geq 2 m_e + \frac{2 m_e^2}{m_N}$$



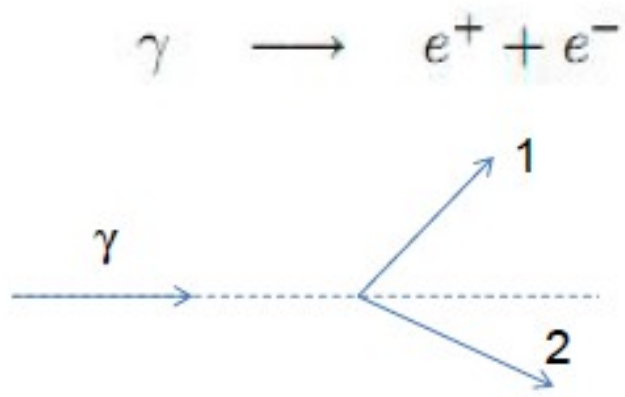
Dans le champ d'un électron

$$E_\gamma \geq 4 m_e$$

Exercice : montrer que la matérialisation d'un photon est impossible dans le vide

2- Interaction des Photons avec la matière

Création de paires (matérialisation)



$$E_\gamma = E_1 + E_2$$

$$\vec{P}_\gamma = \vec{P}_1 + \vec{P}_2$$

$$\begin{cases} \frac{h\nu}{c} = P_1 \cos(\theta_1) + P_2 \cos(\theta_2) \\ 0 = P_1 \sin(\theta_1) - P_2 \sin(\theta_2) \end{cases}$$

$$E^2 = P^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

$$E_\gamma = h\nu \quad P_\gamma = \frac{h\nu}{c}$$

$$\cos(\theta_1) = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{m_0^2 c^4}{E_1^2}}} > 1$$

2- Interaction des Photons avec la matière

Création de paires (matérialisation)

- La matérialisation nécessite donc la présence d'un catalyseur A qui intervient dans le bilan sous la forme



- Déterminer l'énergie de seuil dans les deux cas suivants :
 - A est un électron au repos.
 - A est un noyau atomique au repos.

$$\left\{ \begin{array}{l} E_\gamma + E_N = E_1 + E_2 + E'_N \\ \vec{P}_\gamma + \vec{P}_N = \vec{P}_1 + \vec{P}_2 + \vec{P}'_N \\ E^2 = P^2 c^2 + m_0^2 c^4 \\ E = T + m_0 c^2 \end{array} \right\} P^2 c^2 = T(T + 2m_0 c^2)$$
$$T_N = 0 \Rightarrow P_N = 0 \Rightarrow E_N = m_N c^2$$



$$\boxed{[E_{\gamma,s}]_{lab} = 2m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{m_N} \right)}$$

2- Interaction des Photons avec la matière

Création de paires (matérialisation)

Quel que soit le référentiel considéré, il existe une quantité invariante faisant intervenir l'énergie totale d'un système et sa quantité de mouvement totale.

$$\left(\sum E_i\right)^2 - \left(\sum p_i\right)^2 c^2 = C^{te}$$

$$E = T + mc^2$$

$$\sum T_i = 0 \text{ au seuil}$$

$$\left[\left(\sum E_i\right)^2 - \left(\sum p_i\right)^2 c^2\right]_{lab} = \left[\left(\sum E_i\right)^2 - \left(\sum p_i\right)^2 c^2\right]_{cdm}$$

$$\left[\left(E_\gamma + E_N\right)^2 - \left(p_\gamma + p_N\right)^2 c^2\right]_{lab} = \left[\left(E'_{e^-} + E'_{e^+} + E'_N\right)^2 - \left(p_{e^-} + p_{e^+} + p_N\right)^2 c^2\right]_{cdm}$$

$$E_N^2 = p_N^2 c^2 + m_N^2 c^4 = m_N^2 c^4 \quad \Rightarrow \quad E_N = m_N c^2$$

$$\left[\left(E_\gamma + m_N c^2\right)^2 - \left(p_\gamma\right)^2 c^2\right]_{lab} = \left[\left(E'_{e^-} + E'_{e^+} + E'_N\right)^2\right]_{cdm}$$

$$\left[\left(2E_{\gamma,s} m_N c^2 + m_N^2 c^4\right)\right]_{lab} = \left(2m_e c^2 + m_N c^2\right)^2 \quad \longrightarrow \quad \boxed{\left[E_{\gamma,s}\right]_{lab} = 2m_e c^2 \left(1 + \frac{m_e}{m_N}\right)}$$

**Fin de la
première
partie**