

Interaction rayonnement- matière

Aïcha Hessler-Wyser

- Généralités
- Longueur d'ondes
- Interaction matière-ondes électromagnétiques
- Interaction matière-électrons
- Relaxation
- Diffusion des électrons

Correspond aux chapitres 2 à 4 du Carter et Williams

- Propriétés du rayonnement et information recherché
 - Longueur d'onde
 - Energie du rayonnement ou des particules
 - Mode d'interaction avec la matière => information obtenue

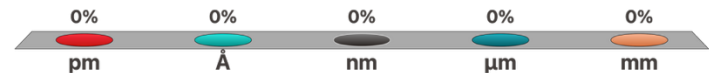
- Contingences expérimentales
 - **Sources** du rayonnement et propriété (brillance, monochromaticité, cohérence, etc)
 - Composants permettant de réaliser une **optique** (lentilles, miroirs, etc)
 - Efficacité des **détecteurs** (sensibilité, gamme dynamique, localisation spatiale, etc)
 - **Effets indésirables** (perturbation, dégâts d'irradiation, chauffage, etc)

Quel est l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du faisceau dans un microscope électronique?

- A. pm
- B. Å
- C. nm
- D. μm
- E. mm

Sondage: responseware.eu

ID: intromicro



Rayonnement électromagnétique: longueur d'onde

- Longueur d'onde:

De \approx km pour des ondes radios, dites "longues ondes", à 10^{-14} m pour les rayons γ .

- Relation énergie - longueur d'onde

$$E = h\nu = \hbar\omega$$

avec h la constante de Planck, $h = 6.6256 \cdot 10^{-34}$ Nms, ν la fréquence, ω la pulsation, et $c = \lambda\nu$ la vitesse de la lumière.

Ainsi:

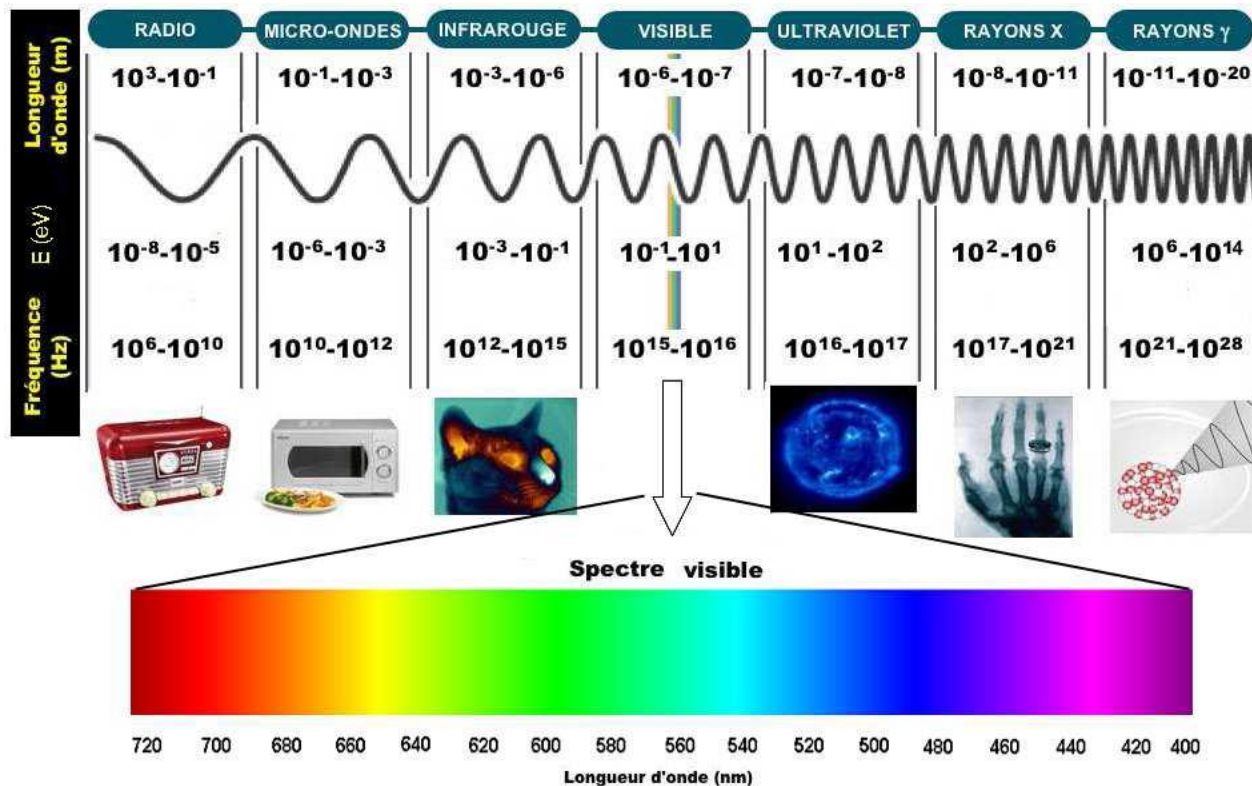
$$E = hc/\lambda$$

- Vecteur d'onde:

On définit le vecteur d'onde \mathbf{k} , dirigé dans la direction de propagation de l'onde et de module $|\mathbf{k}| = 1/\lambda$.

- Fonction d'onde:
$$\psi = e^{2\pi i \mathbf{k} \cdot \mathbf{r}}$$

Quelle longueur d'onde choisir?



Rayonnement de particules: longueur d'onde

Les particules sont de masse non nulle!

- Particules non relativistes:

$$\lambda = \frac{h}{(2m_0 eV)^{1/2}}$$

avec $p = m_0 v$ la quantité de mouvement de la particule, de masse m_0 au repos.

- Particules relativistes:

$$\lambda = \frac{h}{2m_0 eV \left[1 + \frac{eV}{2m_0 c^2} \right]^{1/2}}$$

avec $E_0 = m_0 c^2$ leur énergie au repos.

- Neutrons:

$m_{o,n} = 1.675 \cdot 10^{-27}$ kg et $E_{o,n} = 940$ MeV alors que l'énergie typique d'un neutron dans un réacteur est de 2 MeV (>940 keV), et celle d'un neutron thermique entre qq meV et qq eV. Les neutrons sont donc non relativistes.

Rayonnement électronique: longueur d'onde

- Electrons:

On les considère relativistes au-dessus de 100 keV.

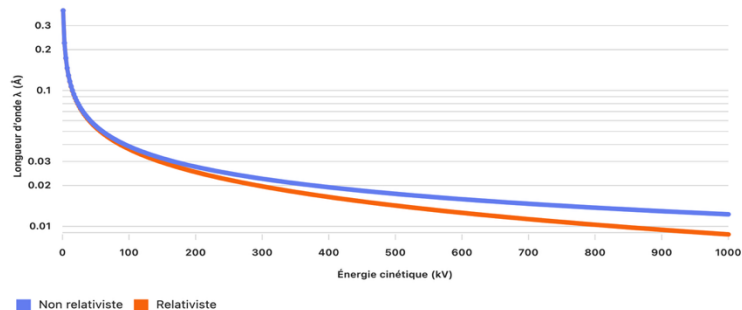
$$\lambda_e = \frac{1.33 \times 10^{-9}}{\sqrt{E} \sqrt{1 + E/2E_0}} \cong \frac{1.33 \times 10^{-9}}{\sqrt{V_{acc} + 10^{-6} V_{acc}^2}}$$

avec V_{acc} la tension d'accélération et E et E_0 les énergies cinétique et au repos exprimées en eV.

Dans un microscope électronique, on accélère les électrons avec une tensions variant **entre 500 V et 300 kV** (parfois jusqu'à 3 MeV)!

Des électrons?

Quelques valeurs



Charge de l'électron (e)

$-1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

1 eV

$1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Masse au repos de l'électron (m_0)

$9.109 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Energie au repos de l'électron (m_0c^2)

511 keV

Energie cinétique (charge x tension)

$1.602 \times 10^{-19} \text{ Nm}$ (pour tension 1 volt)

Constante de Plank (h)

$6.626 \times 10^{-34} \text{ Nms}$

1 ampère

1 C/sec

Vitesse de la lumière dans le vide (c)

$2.998 \times 10^8 \text{ m/sec}$

Tension d'accélération [KV]	λ non relativiste [nm]	λ relativiste [nm]	Masse [$\times m_0$]	Vitesse [$\times 10^8 \text{ m/s}$]
100	0.00396	0.00370	1.196	1.644
120	0.00352	0.00335	1.235	1.759
200	0.00273	0.00251	1.391	2.086
300	0.00223	0.00197	1.587	2.330
400	0.00193	0.00164	1.783	2.484
1000	0.00122	0.00087	2.957	2.823

Pourquoi utiliser des électrons?

Les plus petits objets visibles...

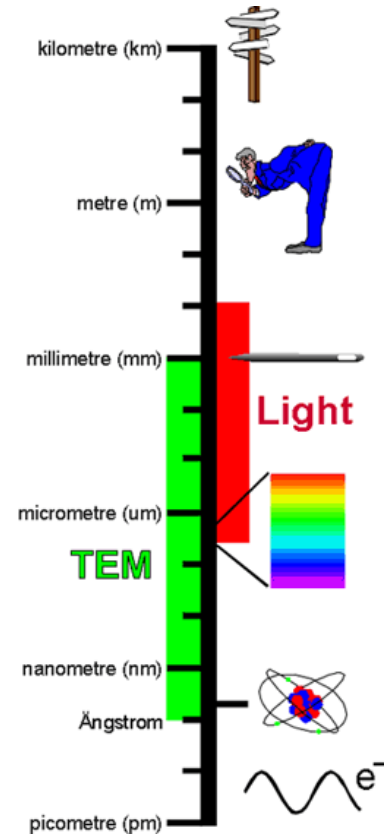
- à l'oeil nu: 0.1 mm (taille d'un batonnet)
- au microscope optique: 200 nm (grandissement max 2000 x)

Peut-on simplement agrandir l'image d'un objet pour voir chaque detail?

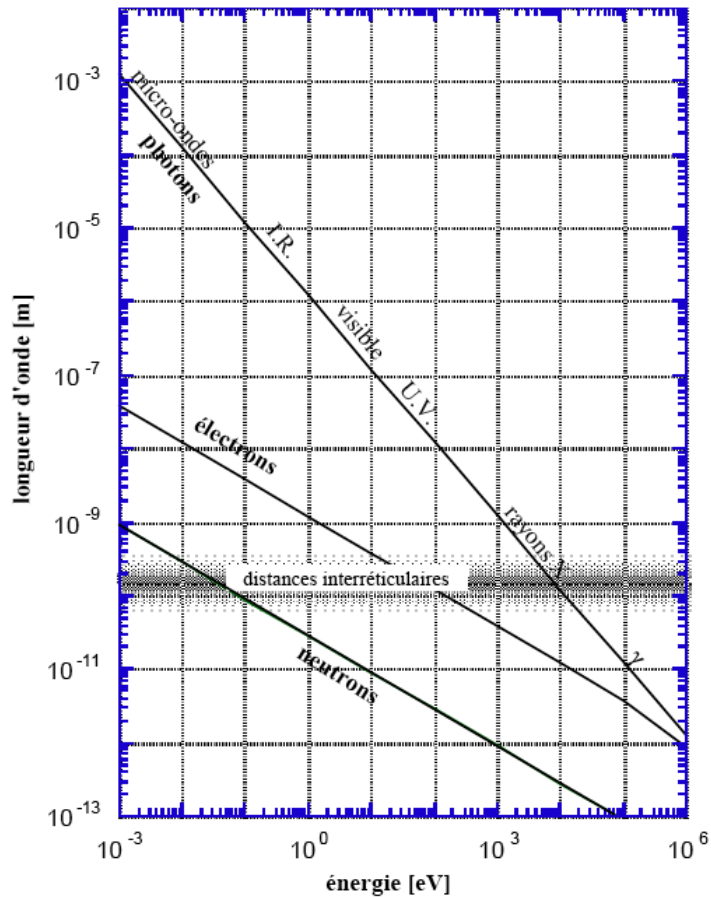
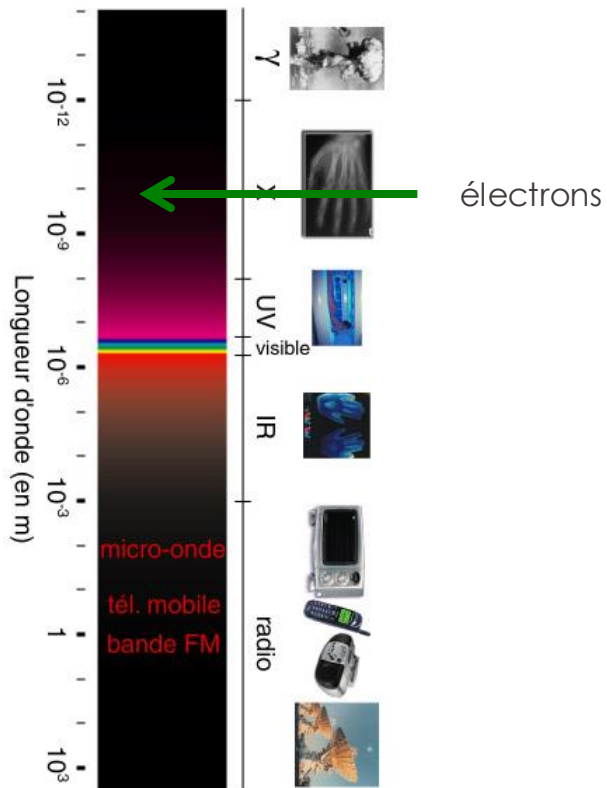
NON!! Il y a des limites physiques fondamentales:

- Type de rayonnement
- Longueur d'onde
- Technique d'observation

Au microscope optique, on observe la modification de la lumière visible après son interaction avec la matière



Pourquoi utiliser des électrons?



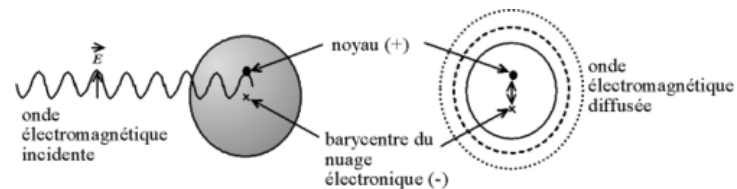
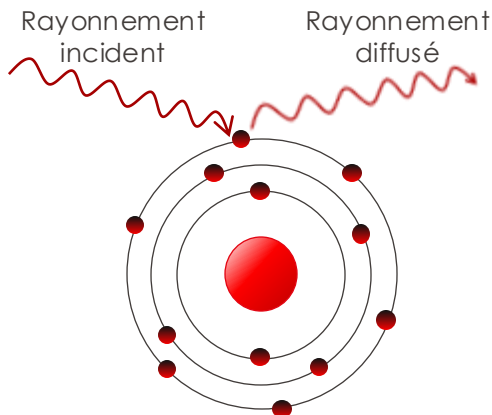
Rayonnement électromagnétique

- Diffusion Rayleigh (élastique)

Diffusion d'un rayonnement électromagnétique sur un électron

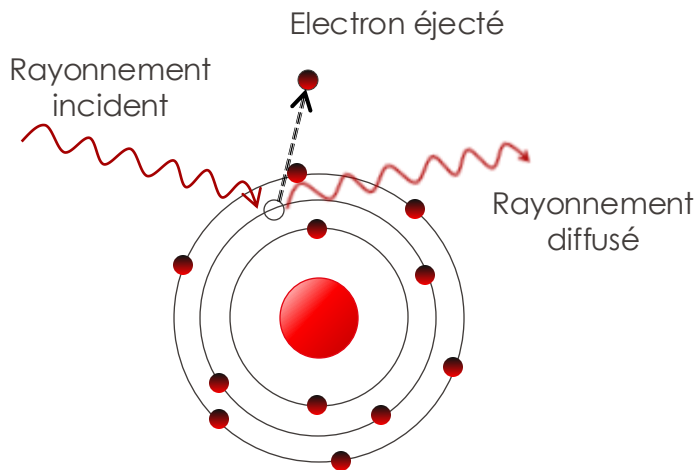
Mécanisme **élastique**: pas de transfert d'énergie

Peut se produire même à grande distance de la particule



Rayonnement électromagnétique

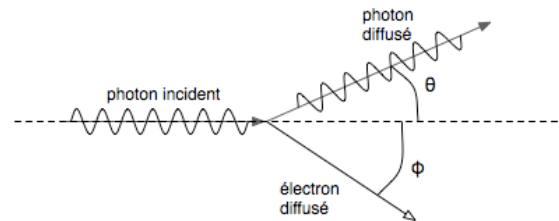
- Diffusion Compton (inélastique)



Diffusion d'un rayonnement électromagnétique sur un électron lié

Mécanisme **inélastique**: transfert d'énergie

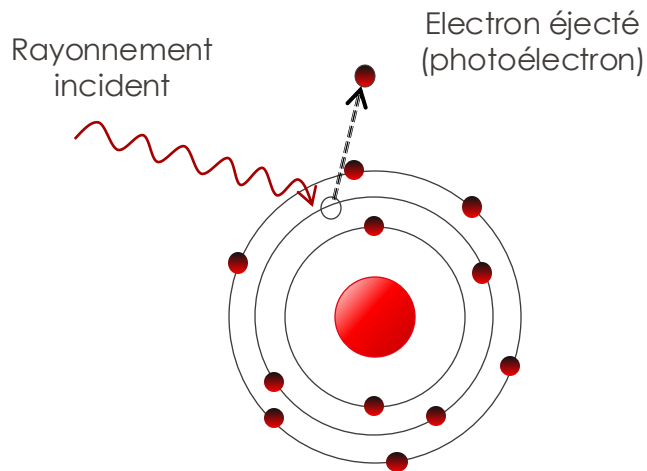
Excitation ou **ionisation** de l'atome



Diffusion Compton, collision d'un photon avec un électron au repos, Wikipedia

Rayonnement électromagnétique

- Effet photoélectrique (absorption)



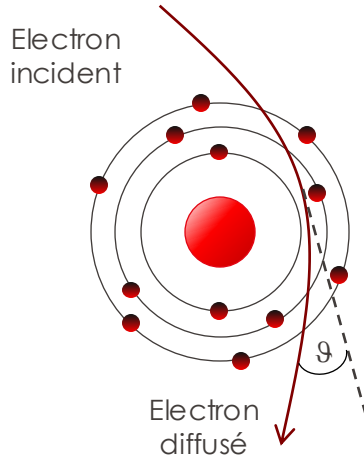
Absorption du rayonnement électromagnétique

Toute son énergie est transférée à l'électron

Ionisation de l'atome

Rayonnement: les électrons

- Diffusion élastique (Rutherford)

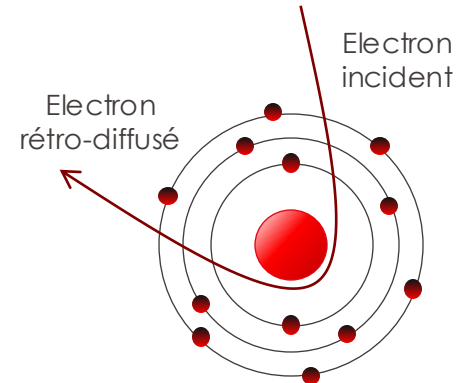


Mécanisme **élastique**: pas de transfert d'énergie

Diffusion à faible angle: interaction coulombienne avec le nuage électronique

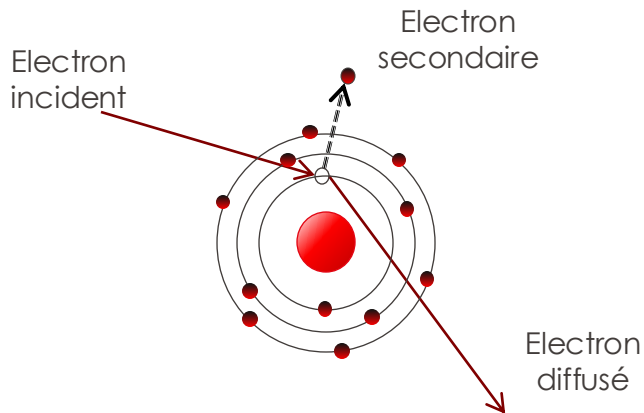
Diffusion à fort angle, ou rétrodiffusion: interaction coulombienne avec le noyau

Pas d'ionisation de l'atome



Rayonnement: les électrons

- Diffusion inélastique



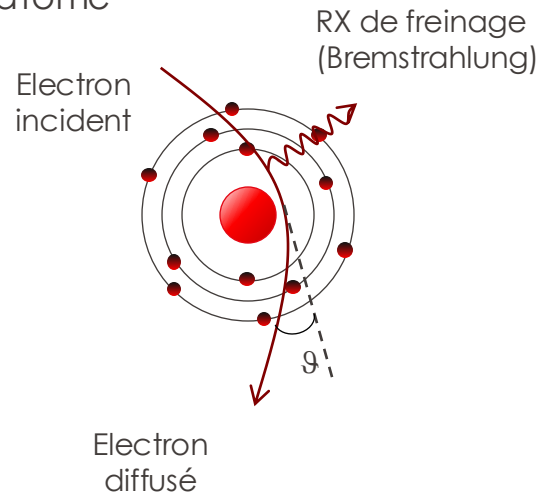
L'électron incident **éjecte** un électron lié de son site, puis change de direction, avec une énergie diminuée de l'énergie de liaison du SE

L'électron éjecté, de faible énergie, est un **électron secondaire** SE

L'électron incident peut aussi être **freiné** par interaction coulombienne avec le noyau

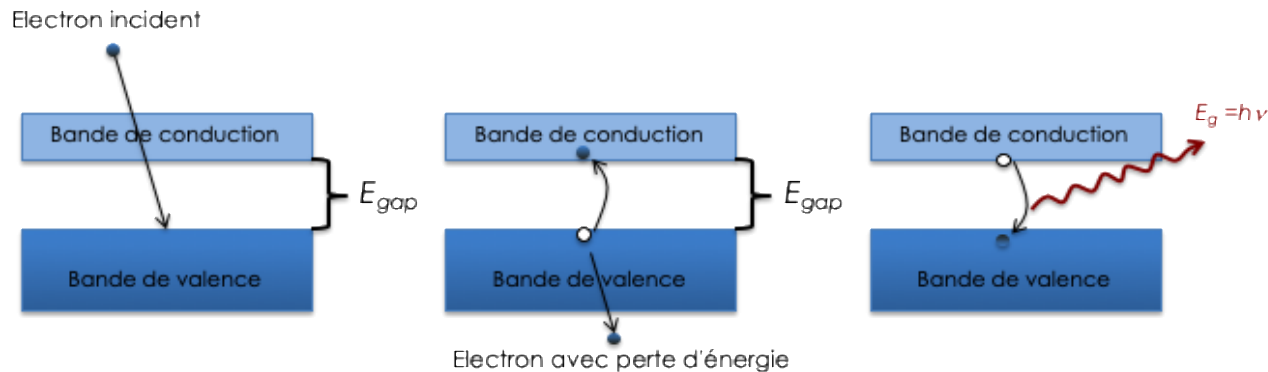
Mécanisme **inélastique**: transfert d'énergie

Possible **ionisation** de l'atome



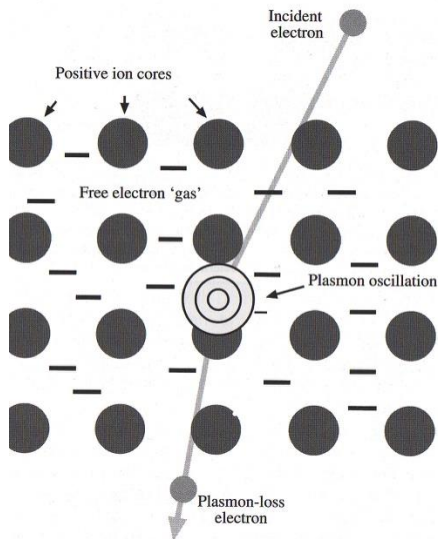
Rayonnement: les électrons

- Création de paires électrons-trous:
Un électron incident sur un semi-conducteur peut faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi une paire électrons-trous.
- Cathodoluminescence:
L'électron se recombine avec le trou, émettant un photon d'énergie équivalent à l'énergie de gap. Technique qui permet de mettre en évidence des défauts qui modifient l'énergie de gap.



Rayonnement: les électrons

- Interaction avec les plasmons

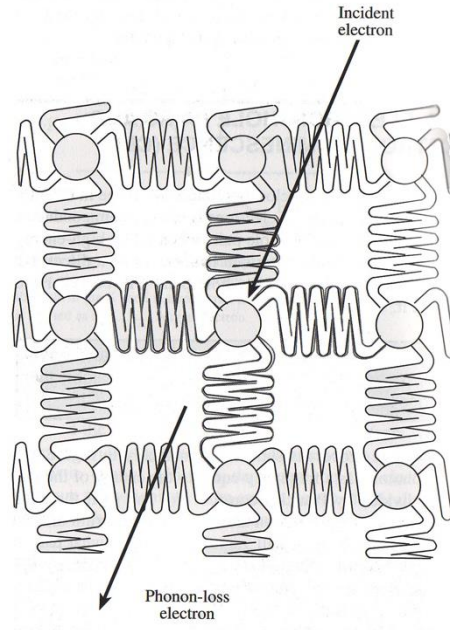


Les plasmons sont des oscillations collectives des électrons libres qui ont lieu lorsqu'un électron traverse le "gaz" d'électrons libres.

L'énergie d'un plasmon est une fonction de la densité d'électrons libres, qui change avec Z , donc l'excitation plasmon implique une **perte d'énergie de l'électron incident qui est chimiquement dépendante de l'échantillon.**

Rayonnements: les électrons

- Interaction avec les phonons



Les phonons sont des oscillations où tous les atomes d'un cristal vibrent collectivement. De telles vibrations peuvent être équivalentes à un chauffage de l'échantillon.

Les électrons qui excitent des phonons perdent une énergie < 0.1 eV, mais peuvent être diffusés à large angle, perturbant ainsi un diagramme de diffraction ou un cliché. **Pas d'information utile** avec les phonons.

Rayonnements: les électrons

- Résultat de l'interaction inélastique des électrons avec la matière
 - Vibration du réseau (phonons: chauffage de la matière)
 - Excitation des niveaux électroniques superficiels (transition bandes de valence/conduction)
 - Excitation des niveaux atomiques profonds (ionisation)
 - Déplacement d'atomes (dégâts dans la matière)
 - Rupture de liaisons chimiques (transformation de la matière)
- L'importance relative de ces types d'interactions varie d'un matériau à l'autre (pas de formulation simple de l'absorption des électrons)

Quel matériau permet d'absorber le mieux les électrons?

- A. B
- B. Al
- C. Cu
- D. Pb

Sondage: responseware.eu


ID: intromicro



Rayonnements: absorption

Notion de libre parcours moyen...

- Epaisseur nécessaire pour absorber 99% d'un rayonnement pour différents éléments



Protection Pb

	13-Al 2.7 g/cm ³	29-Cu 8.93 g/cm ³	82-Pb 11.3 g/cm ³
	35 mm 3 mm	0.10 mm 0.10 mm	0.017 mm 0.034 mm
	m	0.26 m	14 m
Electrons $\lambda=0.037 \text{ \AA}$ à 100 kV $\lambda=0.020 \text{ \AA}$ à 300 kV	39 μm	42 μm ~330 μm	11 μm 0.6 μm

Quel matériau permet d'absorber le mieux les neutrons?

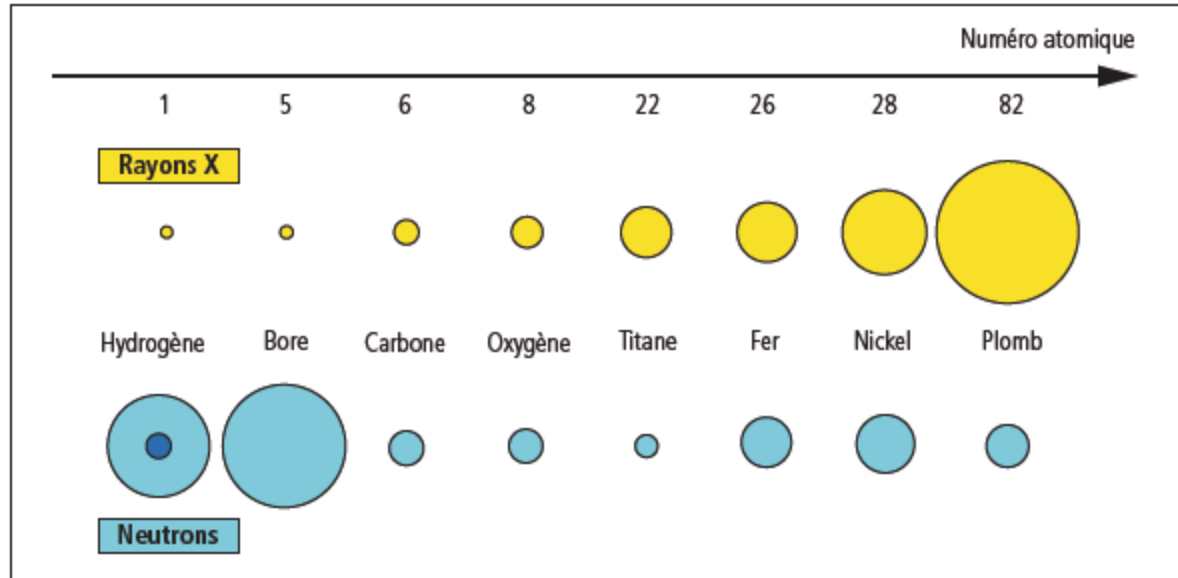
- A. B
- B. Al
- C. Cu
- D. Pb

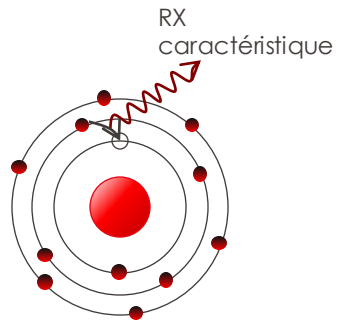
Sondage: [responseware.eu](https://www.responseware.eu)

ID: intromicro



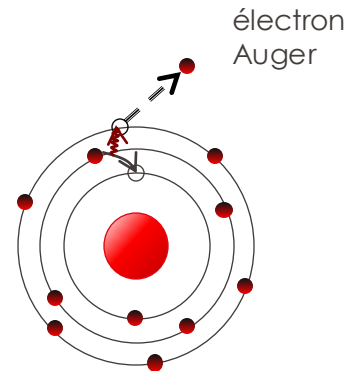
- Probabilité de voir les neutrons ou les RX interagir avec différents matériaux





Fluorescence

Energie de transition modérée, émission de photon visible ou UV



Fluorescence X

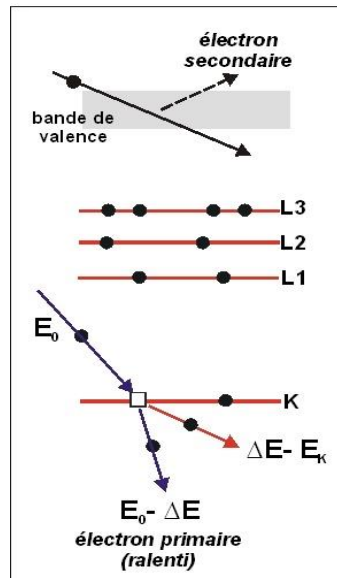
Energie RX caractéristique de la transition et donc de l'élément



Emission Auger

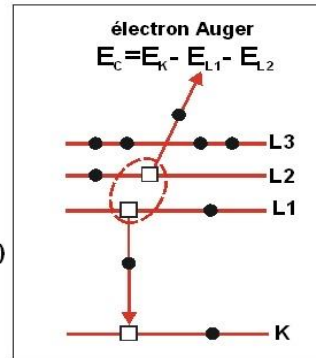
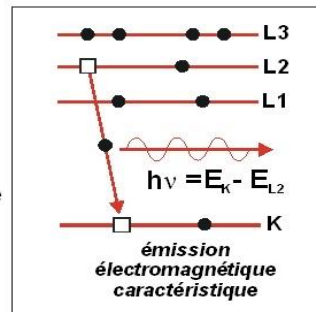
Photon X recapturé pour éjection d'un électron, d'énergie caractéristique de l'élément

- Fluorescence X
- Electrons Auger

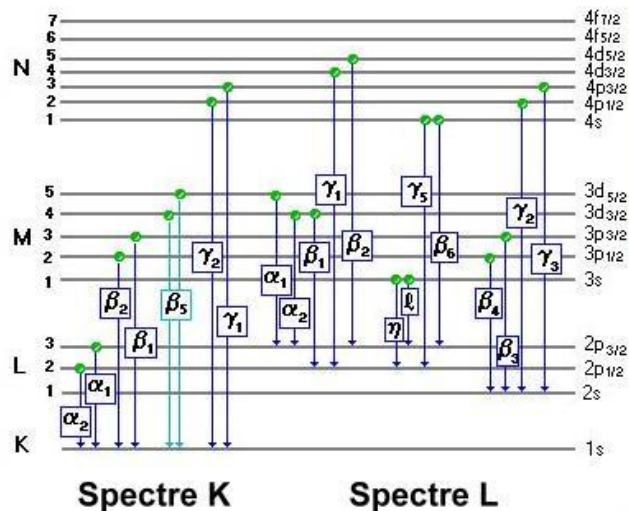


transition radiative
(rendement : ω)

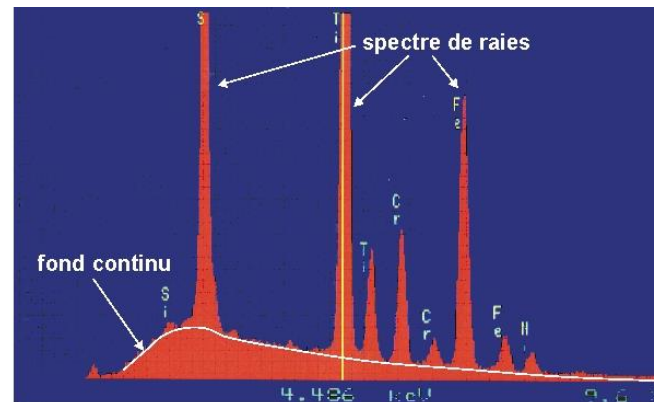
transition Auger
(rendement : $a=1-\omega$)



Rayonnements: relaxation

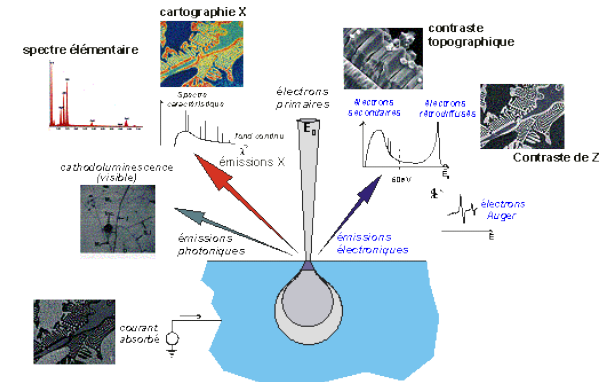


Emission RX: Spectre EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)



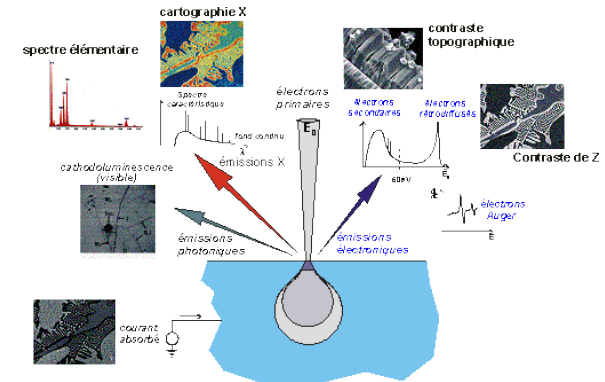
Electrons incidents sur un échantillon massif, que se passe-t-il? Emissions électroniques

- Electrons **secondaires** (SE): relatives à des électrons de faible énergie (5 à 10 eV)
- Electrons **rétrodiffusés** (BSE): relatives à des électrons d'énergie proche de l'énergie incidente E_0
- Electron **Auger**: relatives à la présence de certains éléments de la cible, d'énergie spécifique

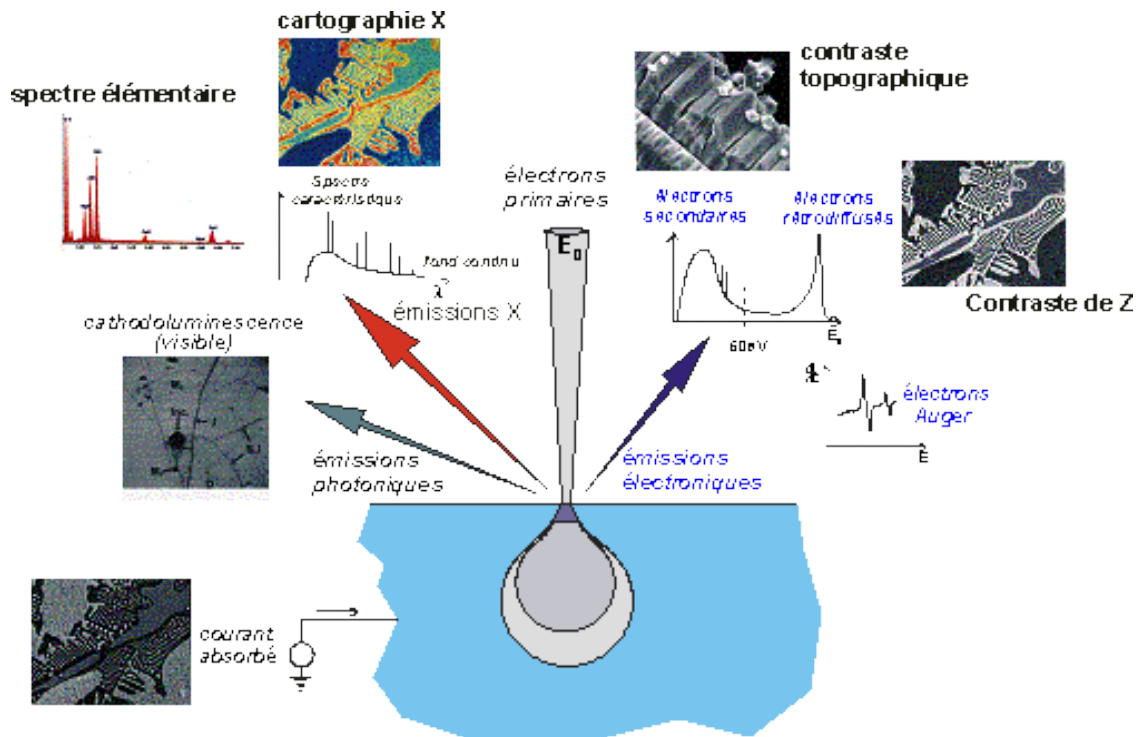


Electrons incidents sur un échantillon massif, que se passe-t-il? Emissions électromagnétiques

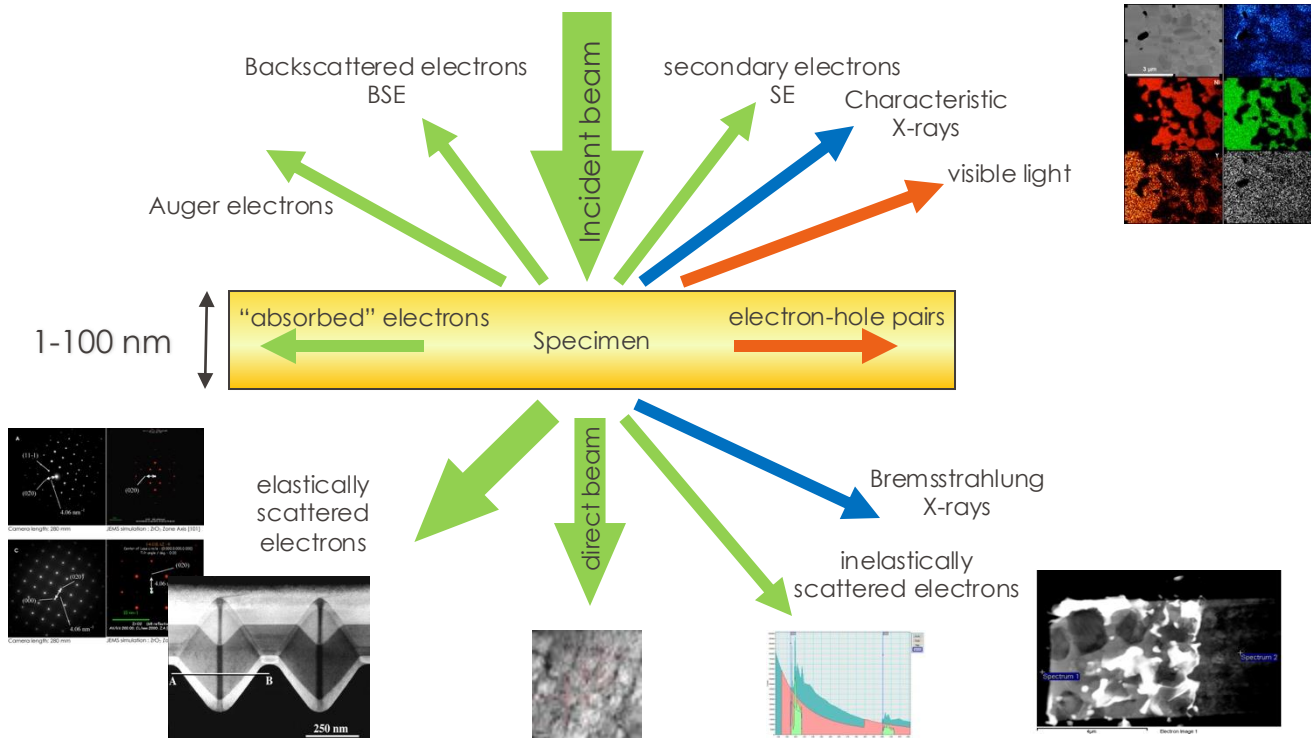
- Rayonnement X répartis en une émission continue ("**Bremstrahlung**" ou "rayonnement de freinage")
- Rayonnement X d'énergie **caractéristique** des éléments du matériau
- Rayonnement de cathodoluminescence: rayonnement **visible** émis principalement par des matériaux isolants ou semi-conducteurs



Electrons incidents sur un échantillon massif, que se passe-t-il?



Electrons incidents sur un échantillon mince



Rayonnements: interactions

Rayon primaire	Rayon X	Electrons	Neutrons	Ions
Modification matière	<ul style="list-style-type: none"> vibration él. él. de recul défauts excitation des niveaux atomiques 	<ul style="list-style-type: none"> vibrations thermiques excitation plasmons rupture liaisons déplac. atomes excitation des niveaux atomiques 	<ul style="list-style-type: none"> vibrations thermiques rupture liaisons déplacements atomiques 	<ul style="list-style-type: none"> vibrations thermiques rupture liaisons déplac. atomes pulvérisation implantation excitation des niveaux atomiques
	•désexcitation	•désexcitation		•désexcitation
Modification rayonnement	<ul style="list-style-type: none"> diffusion élastique diffusion inélastique absorption 	<ul style="list-style-type: none"> diffusion élastique diffusion inélastique absorption pertes d'énergie 	<ul style="list-style-type: none"> diffusion élastique diffusion inélastique absorption 	<ul style="list-style-type: none"> diffusion absorption
Rayonnement secondaire	• photoélectrons	<ul style="list-style-type: none"> RX freinage él. secondaires 		<ul style="list-style-type: none"> ions secondaires RX freinage
	• RX caract. • él. Auger caract.	<ul style="list-style-type: none"> RX caractéristiques él. Auger caract. 		• RX caractéristiques
Applications	<ul style="list-style-type: none"> diff. RX (structure) spect. Compton spect. absorption (XAS, EXAFS) spect. photoélect.(XPS, ESCA) 	<ul style="list-style-type: none"> diffraction électronique (struct.) source RX images (SEM, TEM) spectr. perte d'énergie (EELS) 	• Diffraction neutronique (structure)	<ul style="list-style-type: none"> structure spectr. ions secondaires (SIMS) implantation
	<ul style="list-style-type: none"> fluorescence X (XRF) spectr. Auger (ESCA) 	<ul style="list-style-type: none"> microanalyse X (EPMA, EDS) spectr. Auger (AES) 		

Diffusion d'é: quelques notions

■ Section efficace d'interaction avec un atome

- Elle représente la probabilité qu'un électron incident ne subisse une interaction avec un atome
- On peut définir la section efficace totale pour un atome en séparant les contributions élastique et inélastiques $\sigma_T = \sigma_{él} + \sigma_{inél}$ $\sigma = \pi r^2$

où r diffère selon les mécanismes de diffusion.

- Pour un échantillon de N atomes/vol, et donc d'épaisseur t , on a:

$$Q_T = N\sigma_T = \frac{N_0\sigma_T\rho}{A} \qquad Q_T t = \frac{N_0\sigma_T(\rho t)}{A}$$

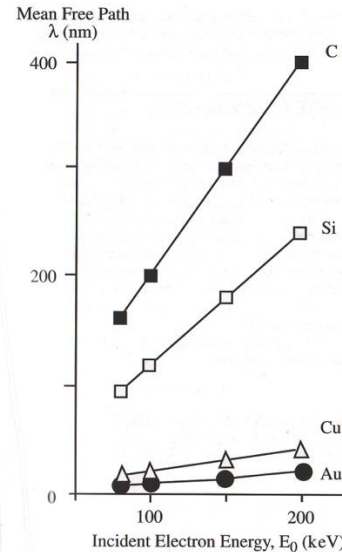
avec N_0 le nombre d'Avogadro (atomes/mole), A le poids atomique (g/mole) et ρ la densité atomique.

Diffusion d'é: quelques notions

- Libre parcours moyen
 - Il donne la **distance moyenne parcourue par un électron** dans un échantillon avant de subir une interaction:

$$\lambda = \frac{1}{Q_T} = \frac{A}{N_0 \sigma_T \rho}$$

Note: σ_T dépend de la vitesse de l'électron!



Ce qu'il faut retenir...

- Pourquoi des électrons?
- Ordres de grandeur
- Les différents mécanismes de diffusion, EM et électrons
- Libre parcours moyen, absorption, paramètres d'influence
- Emissions résultant de la relaxation

