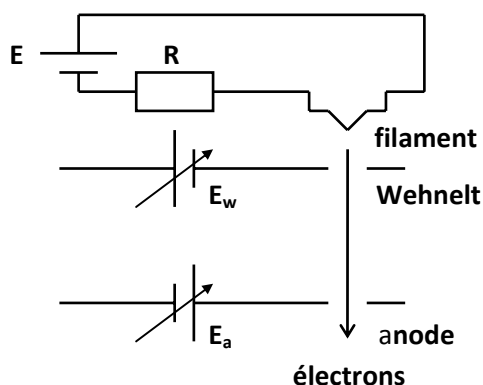


Le microscope électronique à balayage et les faisceaux d'électrons

1. Le canon à électron

Un filament généralement en tungstène est parcouru par un courant d'intensité de quelques ampères. Ainsi chauffés, les atomes libèrent des électrons. Ces électrons libres sont attirés par une anode, la tension impliquant leur vitesse et leur nombre est réglé par le Wehnelt.



a. Cas de la physique classique

Le théorème de l'énergie cinétique conduit à écrire :

$$\Delta E_c = W \text{ d'où } \frac{1}{2}mv^2 = qU \text{ et } v = \left(\frac{2eU}{m}\right)^{1/2} \text{ avec pour l'électron } m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg et } q = |e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C.}$$

On peut ainsi calculer :

V en kV	v en m.s ⁻¹
10	5,93.10 ⁷
100	1,87.10 ⁸
1000	5,93.10 ⁸

Le dernier résultat est évidemment absurde puisque supérieur à la vitesse de la lumière $c = 3 \cdot 10^5 \text{ km.s}^{-1}$.

b. La correction relativiste

Elle est introduite par Einstein en 1905. 2 lois nous sont ici utiles :

- L'énergie au repos et $E_0 = mc^2$
- L'énergie cinétique est $E_c = (\gamma - 1)E_0$ avec $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

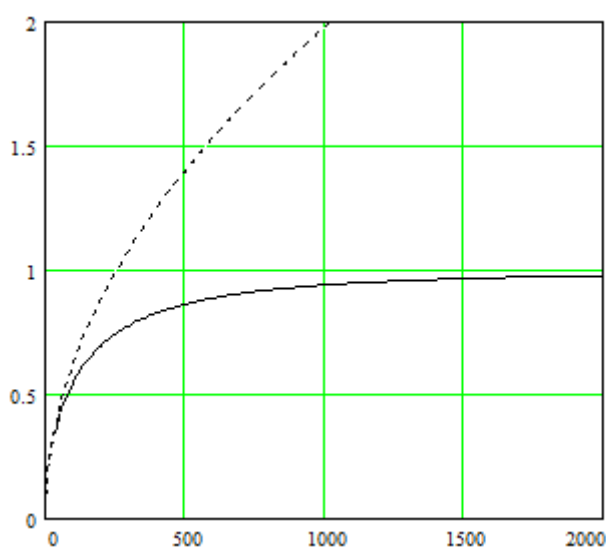
Le théorème de l'énergie cinétique s'écrit ainsi $\Delta E_c = W$ soit $(\gamma - 1)E_0 = eU$. On

$$\text{peut donc écrire } \gamma = 1 + \frac{eU}{E_0} \text{ soit } 1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{1}{\left(1 + \frac{eU}{E_0}\right)^2} \text{ et } \frac{v}{c} = \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{eU}{E_0}\right)^2}\right]^{1/2}.$$

On vérifiera que pour l'électron $E_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \times (3 \cdot 10^8)^2 / 1,6 \cdot 10^{-19} \times 10^6 = 0,51 \text{ MeV}$.

V en kV	v en km.s ⁻¹	$\gamma = 1 + \frac{eU}{E_0}$	v en km.s ⁻¹
10	59.300	1,02	58.500
100	187.000	1,20	164.700
1000	593.000	2,96	282.300

On peut tracer les courbes v/c non-relativiste et relativiste en fonction de U en kV :



Jusqu'à 10 à 20 kV, on peut utiliser les lois de la physique classique. Au-delà, la divergence est trop importante.

Pour les faibles vitesses, on a en effet :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}} = 1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} \text{ d'où } E_c = (\gamma - 1)E_0 = \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} E_0 = \frac{1}{2} m v^2.$$

c. La déviation des électrons

Sans détailler, les électrons sont déviés suivant une trajectoire circulaire par un champ magnétique et suivant une parabole par un champ électrique. On réalisera ainsi des lentilles électromagnétiques qui permettront de concevoir le fonctionnement d'un microscope électronique.



2. Le rayonnement associé

a. L'invariant relativiste

Une particule est caractérisée par

- son énergie au repos $E_0 = mc^2$,
- son énergie cinétique $E_c = (\gamma - 1)E_0$, soit $E = E_c + E_0 = \gamma E_0$
- et sa quantité de mouvement $p = \gamma mv$.

On peut donc écrire :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \text{ d'où } \gamma^2 = \frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \text{ soit } \gamma^2 - \gamma^2 \frac{v^2}{c^2} = 1 \text{ et } \frac{E^2}{E_0^2} - \frac{p^2 v^2}{m^2 v^2 c^2} = \frac{E^2 - p^2 c^2}{E_0^2} = 1$$

et finalement : $E^2 - p^2 c^2 = E_0^2$.

b. Les photons

Nous avons vu la loi de Planck $E = h \nu$. Les photons ont une masse nulle et se déplacent à la vitesse de la lumière $c = 3.10^5 \text{ km.s}^{-1}$.

L'invariant relativiste implique que pour un photon puisque $E_0 = 0$ donc $E = pc$ et par conséquent $p = \frac{E}{c} = \frac{h}{\lambda}$.

c. La relation de de Broglie

En 1924, de Broglie fonde la mécanique quantique en généralisant la loi de Planck à l'ensemble des particules matérielles.

On écrira donc qu'une onde est associée à une particule de quantité de mouvement p telle que sa longueur d'onde est $\lambda = \frac{h}{p}$.

On pourra calculer λ en écrivant $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{\gamma m v} = \frac{hc}{\gamma m v c} = \frac{2,45.10^{-12}}{\gamma \beta}$ avec $\beta = \frac{v}{c}$.

On obtient :

V en kV	$\gamma = 1 + \frac{eU}{E_0}$	v en km.s ⁻¹	β	λ en m
10	1,02	58.500	0,195	$1,22.10^{-11}$
100	1,20	164.700	0,549	$3,69.10^{-12}$
1000	2,96	282.300	0,941	$8,70.10^{-13}$

On note que la longueur d'onde diminue quand la vitesse augmente et qu'elle est plus petite que les dimensions atomiques.

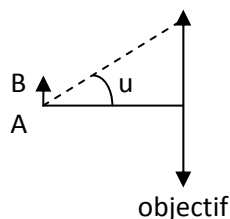
Davisson et Germer en 1928 ont prouvé le caractère ondulatoire des électrons en réalisant leur diffraction par un cristal de nickel.

d. Le pouvoir séparateur d'un instrument d'optique

Il s'agit de la plus petite distance qui puisse être résolue. On admettra la relation :

$\varepsilon = \frac{0,6 \lambda}{n \sin u}$ où λ est la longueur d'onde du rayonnement, n le milieu dans lequel il se déplace et u l'angle d'ouverture, c'est-à-dire celui sous lequel l'objectif voit l'objet.

On appelle aussi $n \sin u$ l'ouverture numérique.



	λ	u	n	ε
Microscope optique	$0,5 \mu\text{m}$	85°	1	$0,3 \mu\text{m}$
Microscope électronique	1 pm	10^{-3} rd	1	$0,6 \text{ nm}$

Le microscope électronique permet de diminuer considérablement le pouvoir séparateur mais cette diminution limitée par la plus faible ouverture.

3. Le microscope électronique à balayage

Nous prendrons le MEB Leica du lycée comme référence. Sa 1^{ère} qualité, au-delà de la simplicité de fonctionnement, n'est pas le grandissement mais la profondeur de champ. Un MEB permet de voir en relief, de l'ordre du mm, contrairement au

microscope optique qui ne peut voir net que des surfaces planes ; de l'ordre du μm , d'où la nécessité de très bien polir l'objet.

Le grossissement peut aller jusqu'à 30.000 mais en général on se limite à quelques milliers. Les microscopes électroniques les plus perfectionnés peuvent grandir jusqu'à quelques millions.

Le filament est en tungstène, éventuellement en LaB_6 . Le vide, indispensable pour permettre aux électrons de se déplacer, est inférieur à 10^{-2} Pa. Le filament est parcouru par un courant de l'ordre de 2,5 A.

Cette intensité détermine la durée de vie du filament : pour un filament de 0,1 mm de diamètre, $t = \frac{32}{J}$ en heures.

La loi de Dushman donne la valeur de la densité de courant :

$J = AT^2 e^{-\frac{W_0}{kT}}$ avec $A = 120 \text{ A.m}^{-2}$, la constante de Boltzmann $k = 8,61 \cdot 10^{-5} \text{ eV.K}^{-1}$ et le travail d'extraction des électrons du tungstène $W_0 = 4,5 \text{ eV}$.

On obtient ainsi :

T en K	J en A.cm^{-2}	t en h
2500	0,61	52
2600	1,47	22
2650	2,3	14
2700	3,45	9

Les électrons produits par le canon à électron sont accélérés par des tensions de l'ordre de 15 kV.

Ils traversent 3 lentilles électromagnétiques et 2 diaphragmes. On obtient un faisceau de largeur 10 nm qui balaye la surface de la pièce de la gauche vers la droite et du haut jusqu'en bas en $1/25^{\text{ème}}$ de seconde. L'intensité du faisceau est de l'ordre de 150 pA, réglable entre 1 pA et 1 μA .

On obtient des électrons rétrodiffusés, des électrons secondaires et des photons.

Le MEB du lycée exploite les électrons secondaires produit par la surface de l'échantillon observé. Ils sont analysés par un cristal scintillateur, à base d'oxydes d'yttrium et d'aluminium dopés au cérium, appelé détecteur Everhart-Thornley et noté SE1 sur la photo du MEB.

Les électrons rétrodiffusés, caractéristiques de l'élément analysé, permettent une analyse quantitative mais cela nécessite un matériel plus complexe et plus coûteux.