

Cours 09

Nature quantique du rayonnement

- Effet Compton
- Dualité “onde-particule” de la lumière

Nature ondulatoire de la matière

- Longueur d'onde de Broglie
- Expérience de Thompson
- Expérience de Davisson et Germer
- Diffraction d'électrons
- Microscope électronique
- Interférence d'électrons
- Description statistique

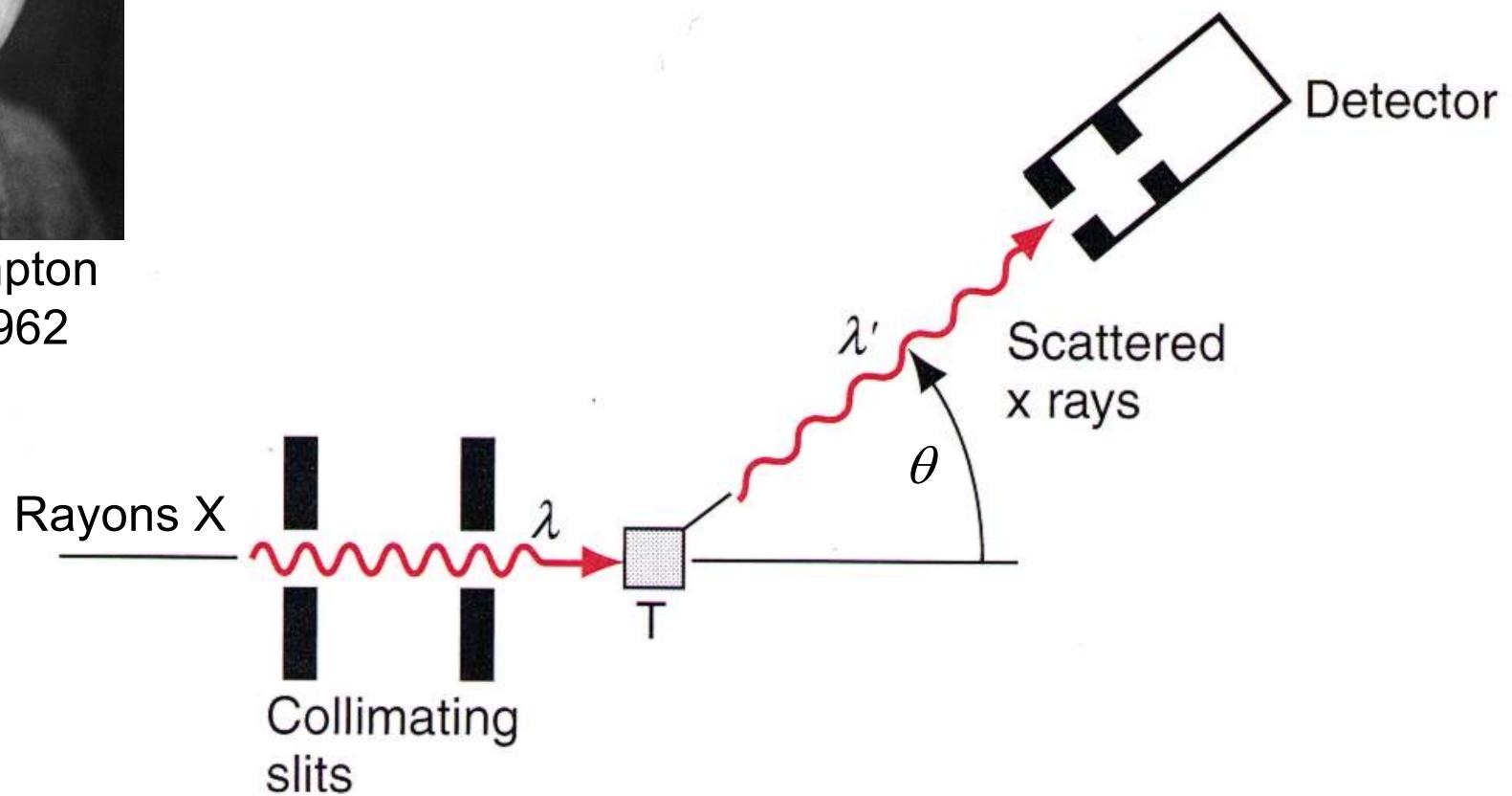
Expérience de Compton (1922)



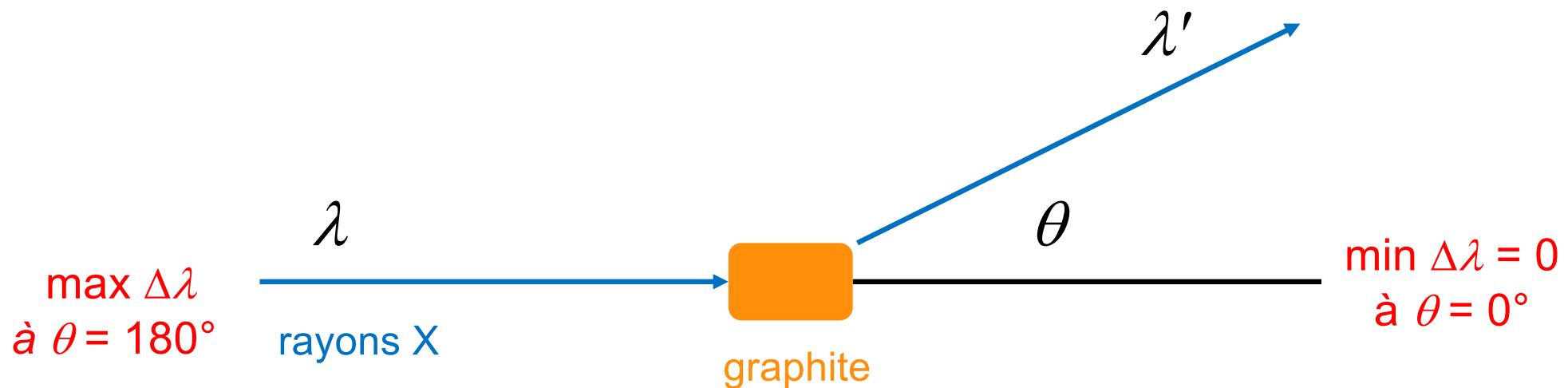
A. H. Compton
1892 - 1962



1927



Observation



- $\lambda \neq \lambda'$
- $\Delta\lambda$ dépend de θ

L'effet ne dépend pas du matériau et relève donc des électrons.

Explication classique

Les électrons dans un matériau sont mis en mouvement par la fréquence des rayons X. La physique classique prévoit alors que l'émission se fait avec la même fréquence ($\Delta\lambda = 0$) et qu'elle ne dépend pas de l'angle θ .

Le résultat de cette expérience est donc en contradiction avec la physique classique !

Explication de Compton

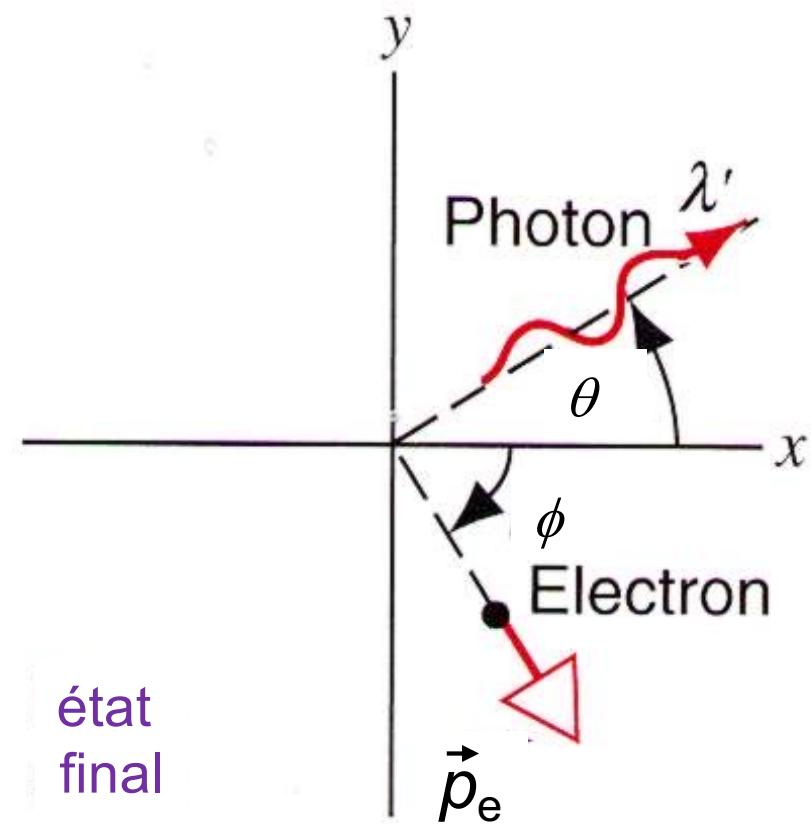
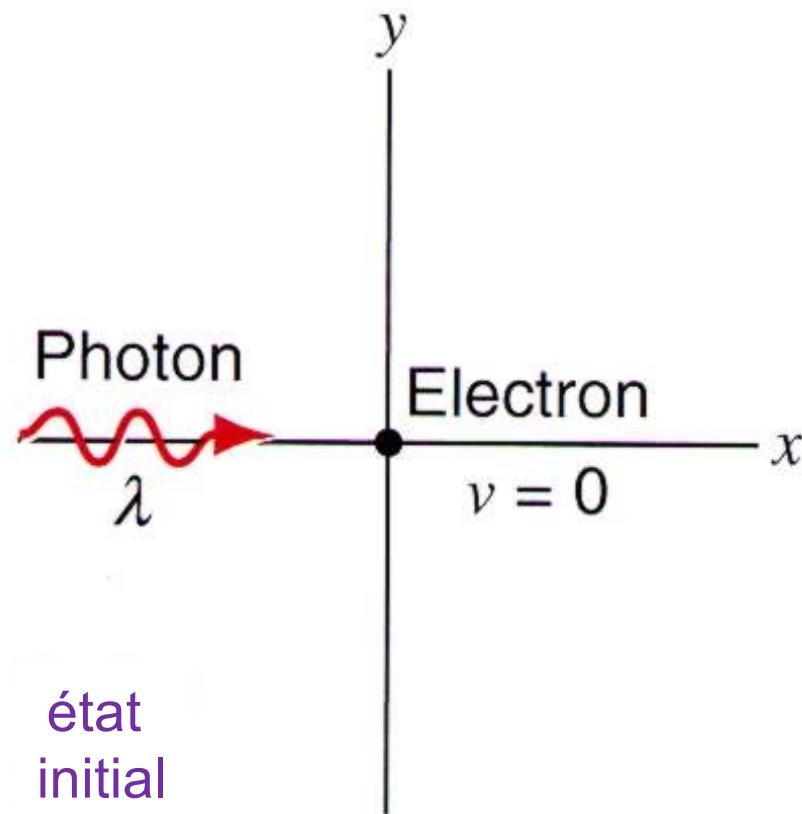
électron

$$\left[\begin{array}{l} E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ p = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{array} \right]$$

photon (Einstein)

$$\left[\begin{array}{l} E = h\nu \\ p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \end{array} \right]$$

Collision photon-électron



Lois de conservation

énergie

$$h\nu + mc^2 = h\nu' + \sqrt{m^2c^4 + p_e^2c^2}$$

quantité de mouvement en x

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos\theta + p_e \cos\phi$$

quantité de mouvement en y

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin\theta + p_e \sin\phi$$

Calculs

On élimine d'abord ϕ entre les deux équations pour \vec{p}_e en utilisant $\cos^2\phi + \sin^2\phi = 1$:

$$p_e^2 c^2 (\cos^2\phi + \sin^2\phi) = (h\nu - h\nu' \cos\theta)^2 + (h\nu' \sin\theta)^2$$

$$p_e^2 c^2 = (h\nu - h\nu' + mc^2)^2 - m^2 c^4$$

Ensuite on élimine p_e entre cette équation et celle de l'énergie :

$$(h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2h\nu h\nu' \cos\theta = (h\nu)^2 + (h\nu')^2 - 2h\nu h\nu' + 2mc^2 (h\nu - h\nu')$$

$$\nu - \nu' = \frac{h}{mc^2} (1 - \cos\theta) \nu \nu'$$

Puis, on utilise $\nu = \frac{c}{\lambda}$ et $\nu' = \frac{c}{\lambda'}$ \rightarrow

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$$

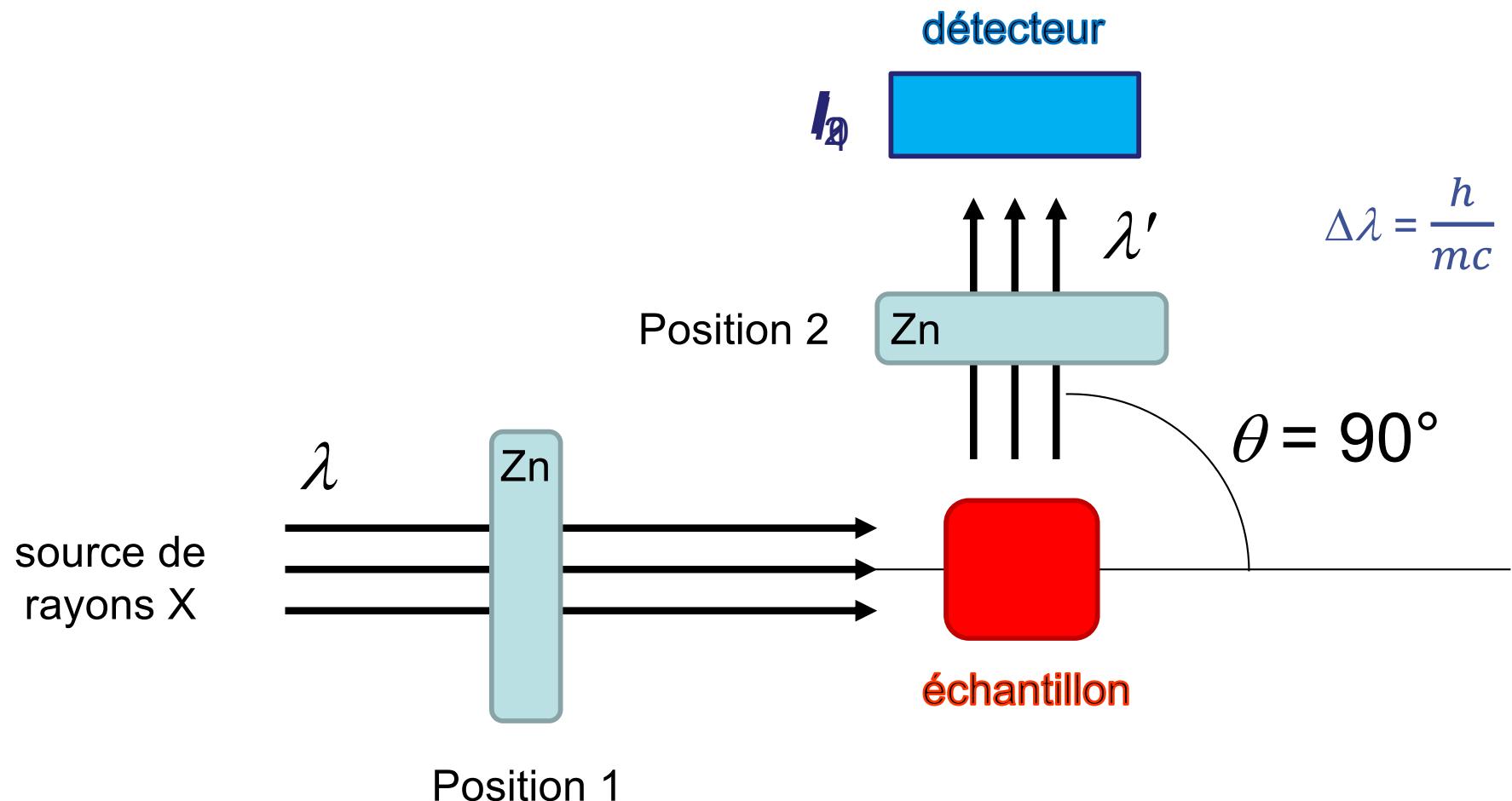
Formule de Compton

Formule de Compton

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$$

- Longueur d'onde Compton: $\lambda_C = \frac{h}{mc} = 2.4 \cdot 10^{-10} \text{ cm.}$
- $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ est mesurable pour les rayons X, lorsque λ est assez petit.
- $\Delta\lambda$ est indépendant de λ .

Expérience sensible à l'effet Compton



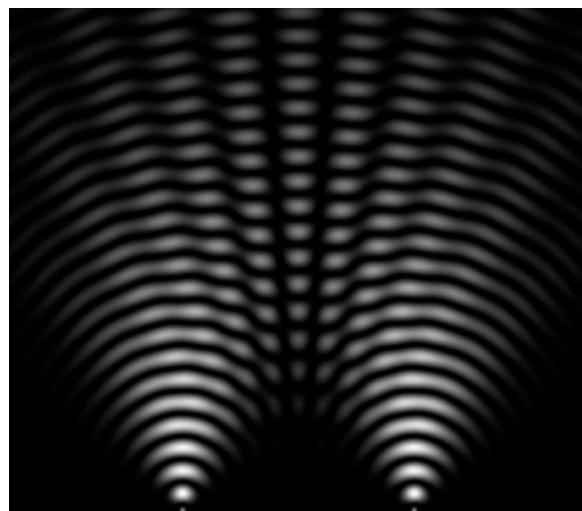
$I_2 \neq I_1 \rightarrow$ La transmission à travers la plaque de Zn dépend de λ !

Dualité “onde-particule” de la lumière

Selon les circonstances, la lumière présente une nature plutôt ondulatoire ou plutôt corpusculaire

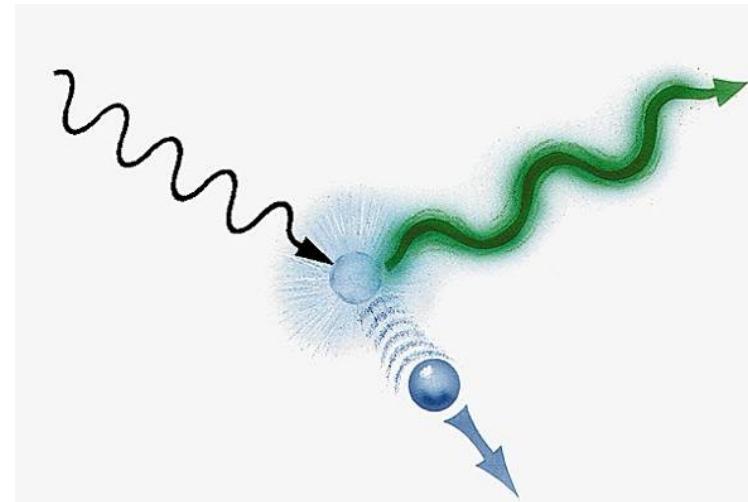
Nature ondulatoire

- diffraction
- interférence

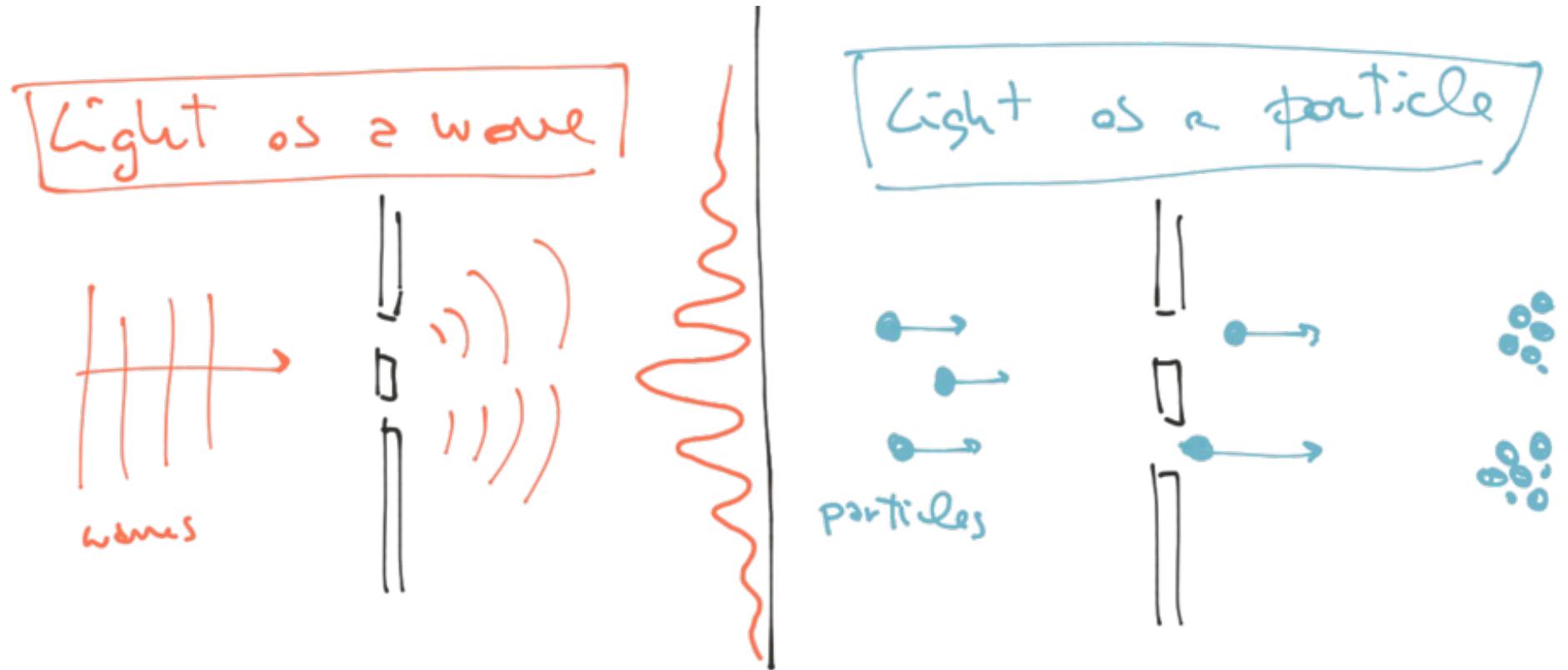


Nature corpusculaire

- effet photoélectrique
- effet Compton



Dualité de la lumière ?



Question qui mérite de la réflexion :

Que se passe-t-il si l'intensité est si faible qu'un seul photon passe à la fois ?

Cours 09

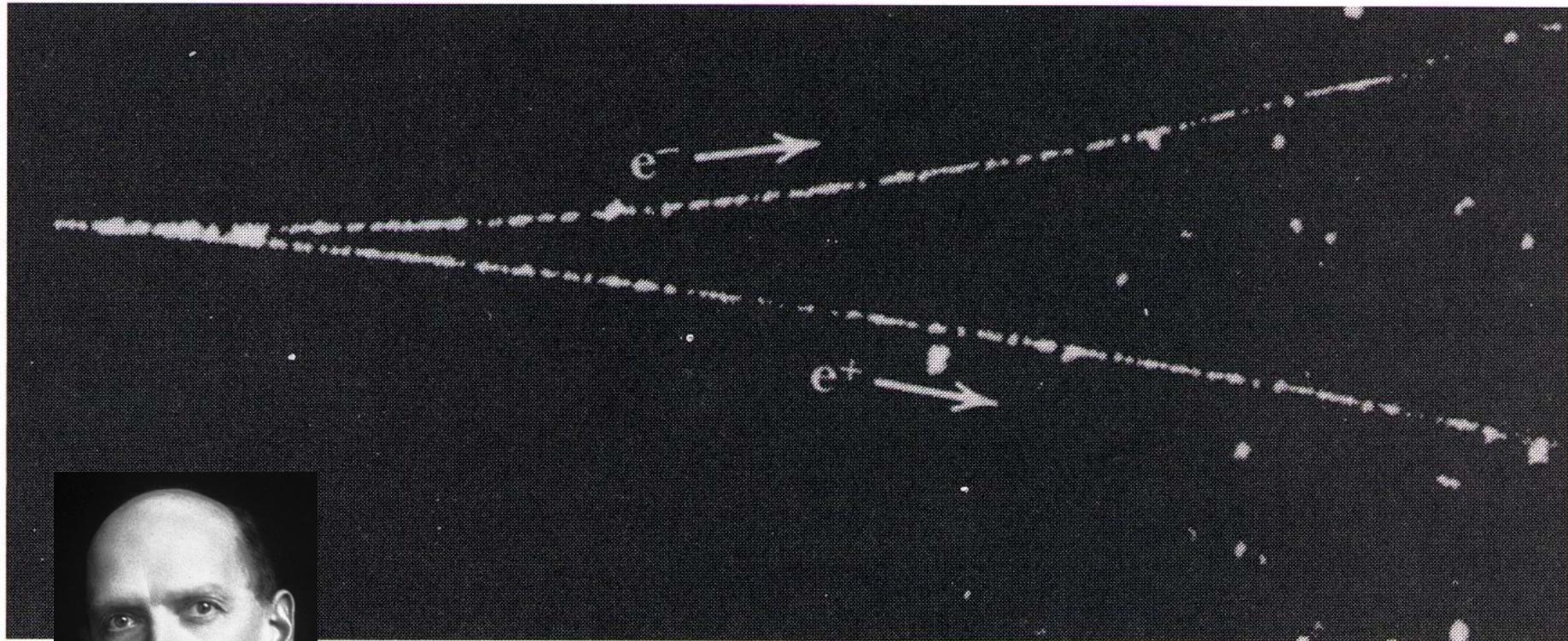
Nature quantique du rayonnement

- Effet Compton
- Dualité “onde-particule” de la lumière

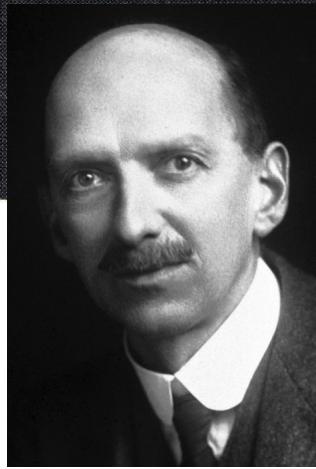
Nature ondulatoire de la matière

- Longueur d'onde de Broglie
- Expérience de Thompson
- Expérience de Davisson et Germer
- Diffraction d'électrons
- Microscope électronique
- Interférence d'électrons
- Description statistique

Traces d'électron et de positron



chambre à brouillard (1911)



C.T.R. Wilson
1869 - 1959



1927

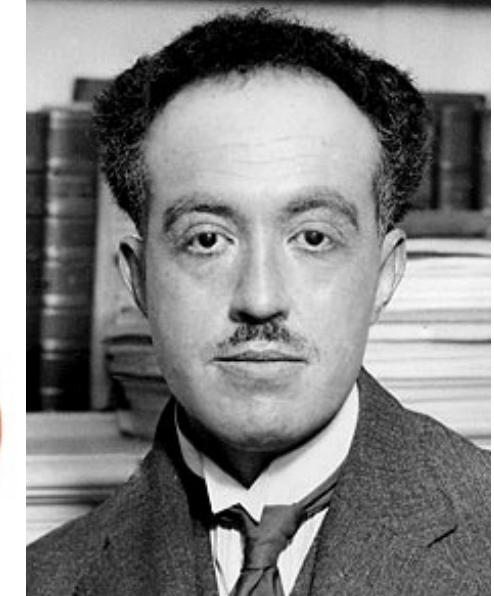
Hypothèse de Louis de Broglie

Nature corpusculaire du photon (Einstein, 1906)

$$\left[\begin{array}{l} E = h\nu \\ p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \end{array} \right]$$



1929



Louis de Broglie
1892 - 1987

Nature ondulatoire de la matière (de Broglie, 1924)

$$\left[\begin{array}{l} E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \stackrel{\text{de Broglie}}{=} h\nu = \frac{h}{2\pi} 2\pi\nu = \hbar\omega \\ \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \stackrel{\text{de Broglie}}{=} \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{2\pi} \frac{2\pi}{\lambda} = \hbar\vec{k} \end{array} \right]$$

longueur d'onde "de Broglie"

Onde de matière

$$\psi(\vec{x}, t) = A \exp(i \vec{k} \cdot \vec{x} - i \omega t)$$

Idée fascinante! Mais il y a des questions ouvertes :

- À quoi correspond l'amplitude A ?
- Quelle est la quantité physique qui présente un caractère ondulatoire ?

Cela n'est pas encore clair à ce stade...

Longueur d'onde de Broglie : exemple 1

Particule macroscopique nonrelativiste de $m_0 = 1 \text{ g}$ et vitesse $v = 1 \text{ mm/s}$

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_0 v} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(10^{-3} \text{ kg}) \cdot (10^{-3} \text{ m/s})} \cong 6 \cdot 10^{-28} \text{ m}$$

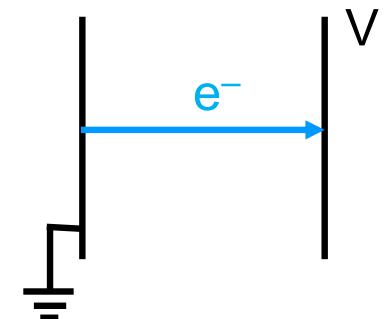
Cette longueur d'onde n'est pas mesurable ! Par comparaison, le diamètre d'un proton est égal à 10^{-15} m , soit 10^{13} fois plus grand !

Longueur d'onde de Broglie : exemple 2

Electron nonrelativiste accéléré par une différence de potentiel V

énergie potentielle initiale = énergie cinétique finale

$$\begin{aligned} eV &= \frac{1}{2} m_e v^2 \\ \Rightarrow v &= \sqrt{2 eV / m_e} \end{aligned}$$



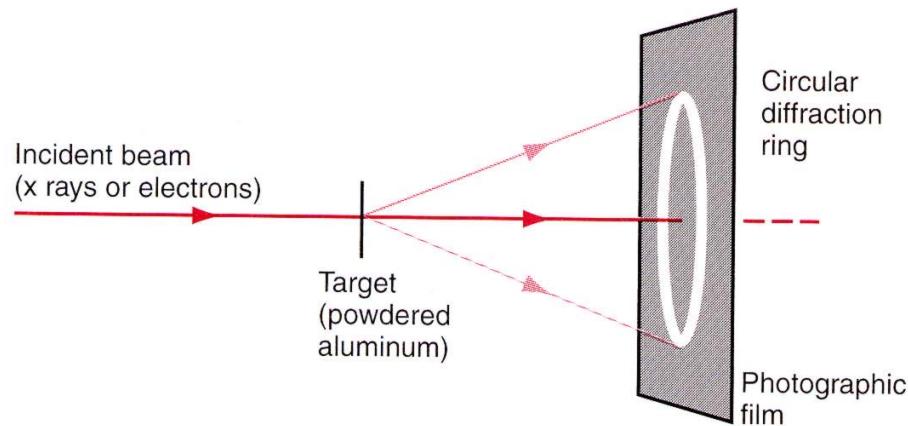
Longueur d'onde de Broglie pour $V = 120 \text{ V}$:

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{m_e v} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eV}} = \frac{6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{\sqrt{2(9.11 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(1.60 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV})(120 \text{ eV})}} \\ &\approx 1.12 \cdot 10^{-10} \text{ m} \end{aligned}$$

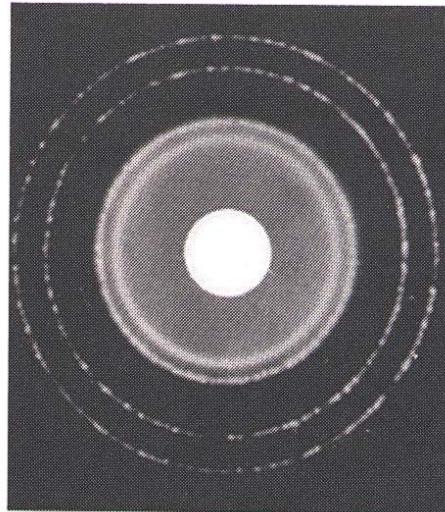
Longueur d'onde de l'ordre des distances atomiques dans les solides

→ devrait pouvoir se mettre en évidence par une expérience de diffraction (rayons X)

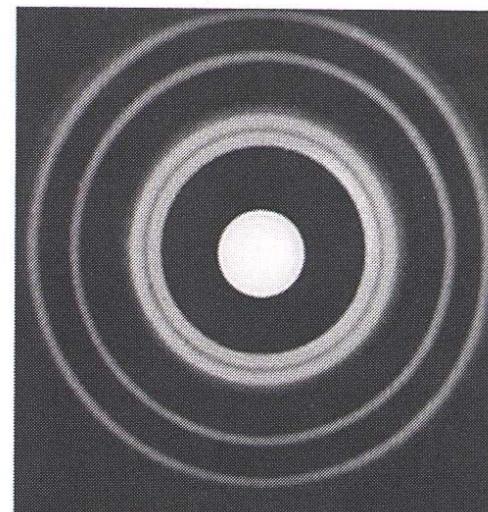
Expérience de Thomson (1927)



électrons



rayons X



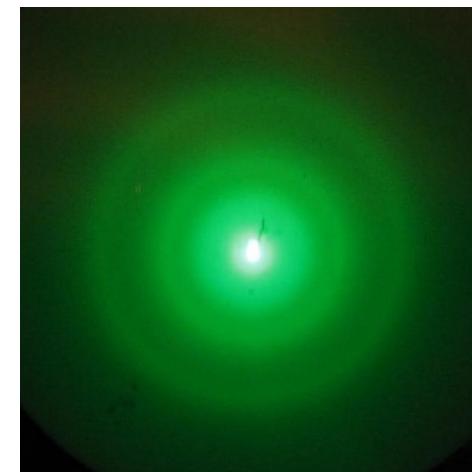
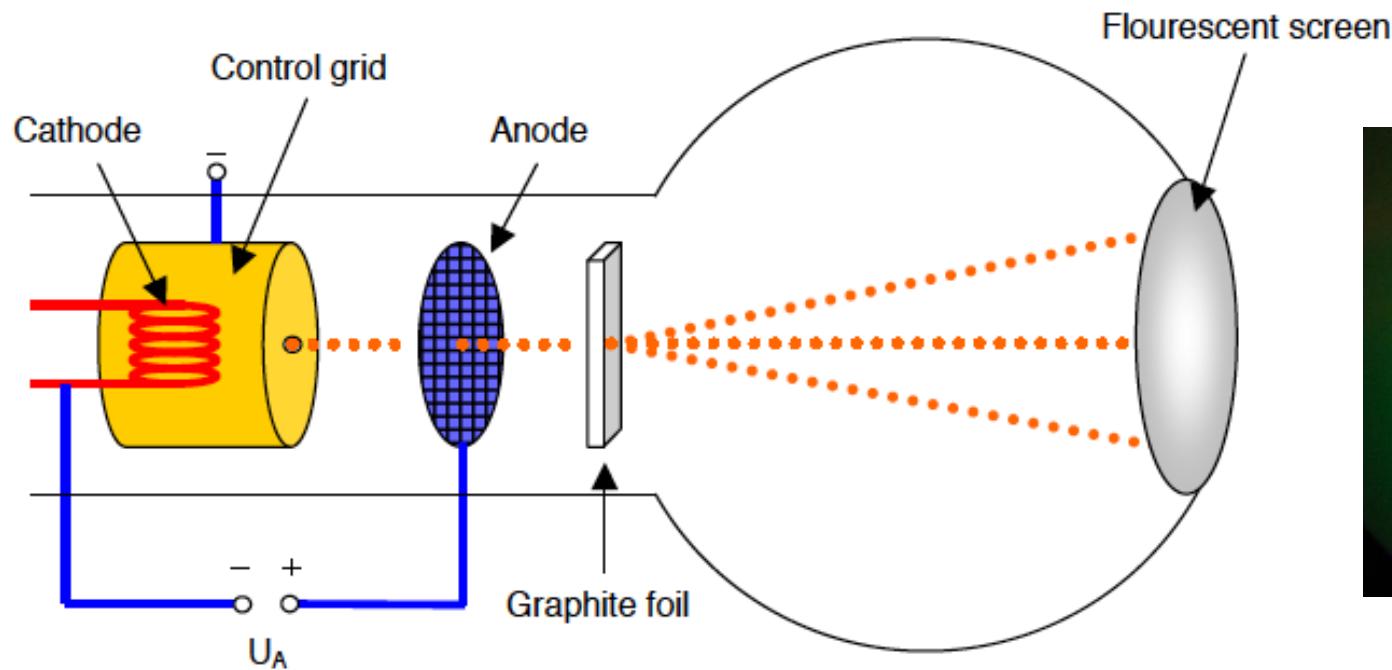
G.P. Thomson
1892 - 1975



1937

Cette expérience met en évidence la nature ondulatoire de l'électron !

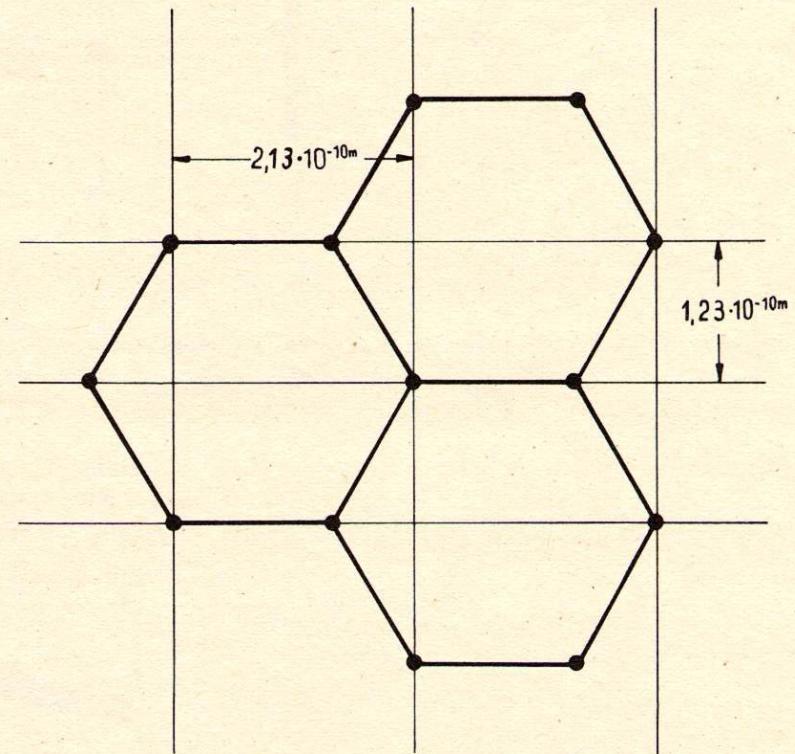
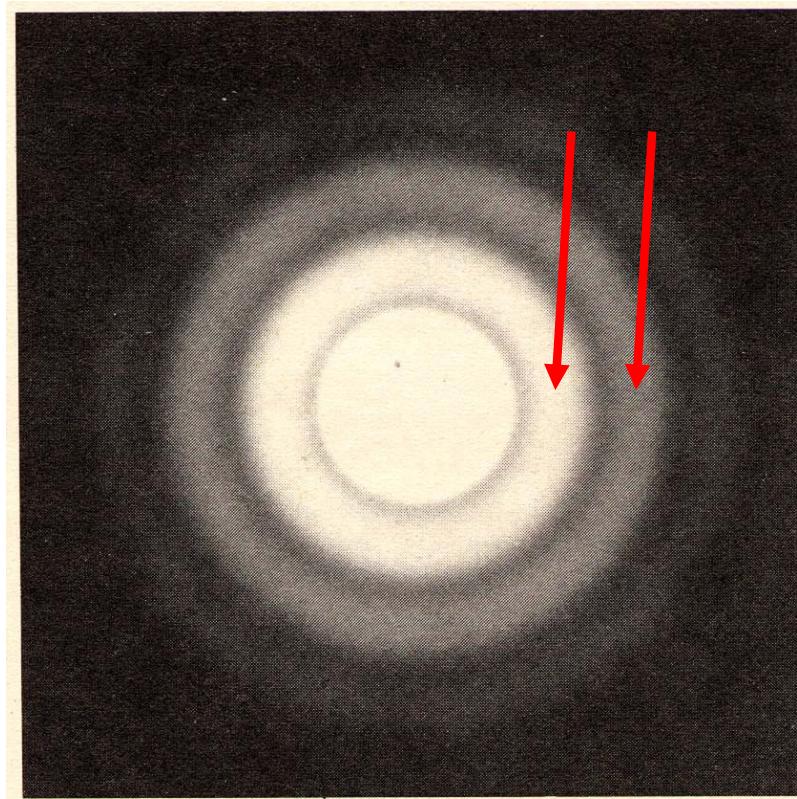
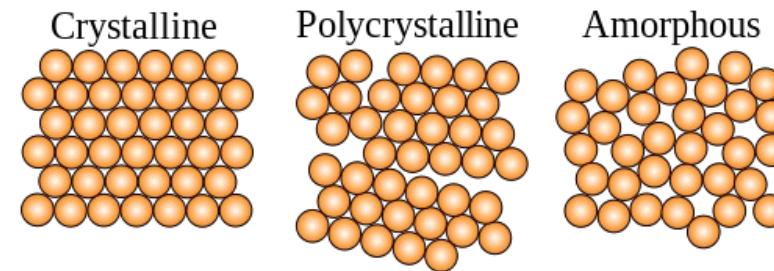
Tube à diffraction électronique



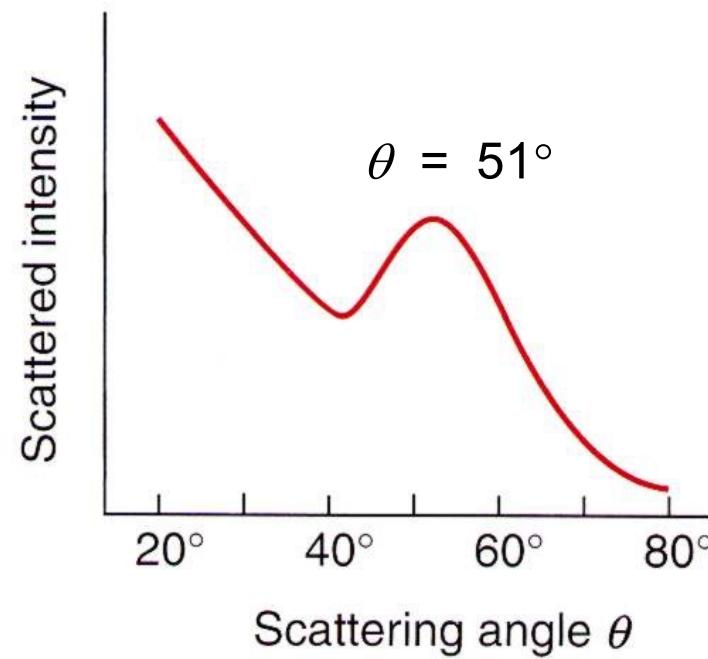
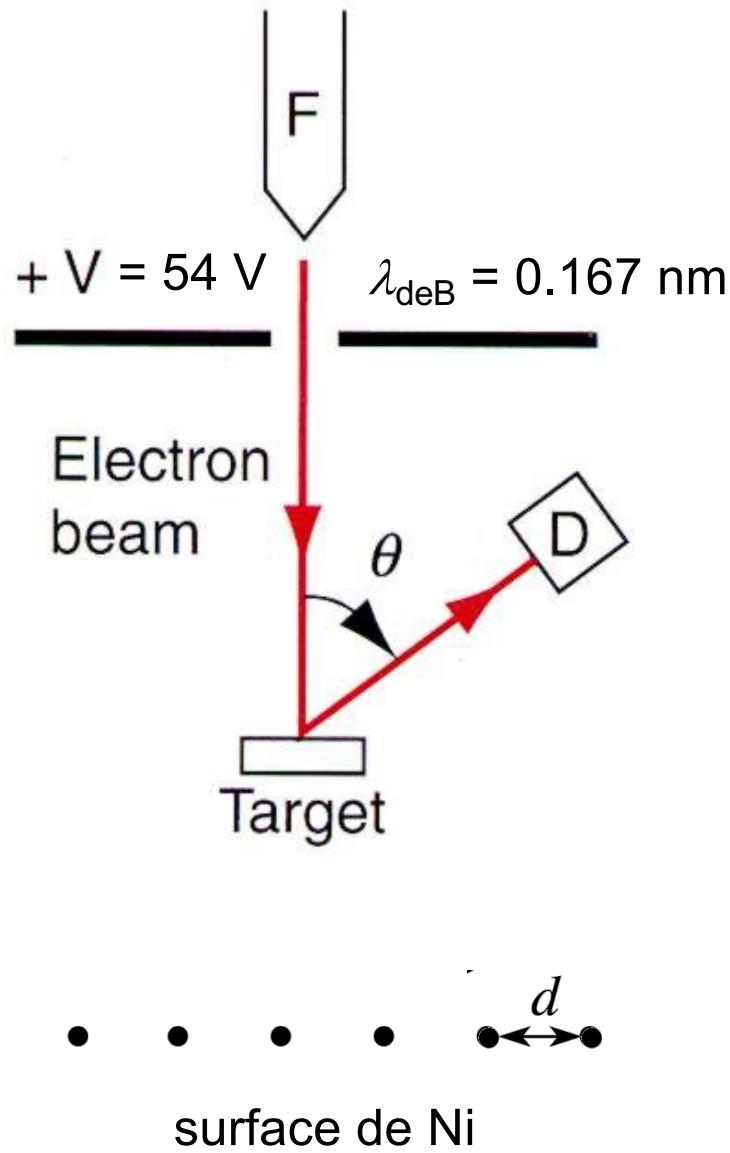
EPFL



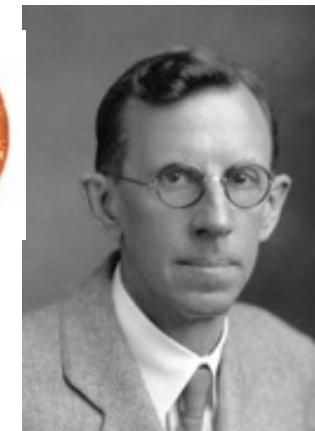
Diffraction électronique : graphite polycristalline



Expérience de Davisson et Germer (1927)



1937



C.J. Davisson
1881 - 1958



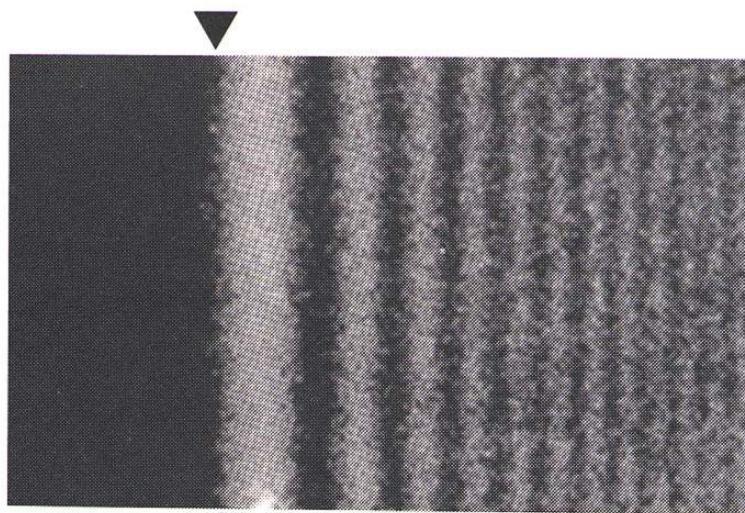
L.H. Germer
1896 - 1971

$$\sin \theta = \lambda / d$$

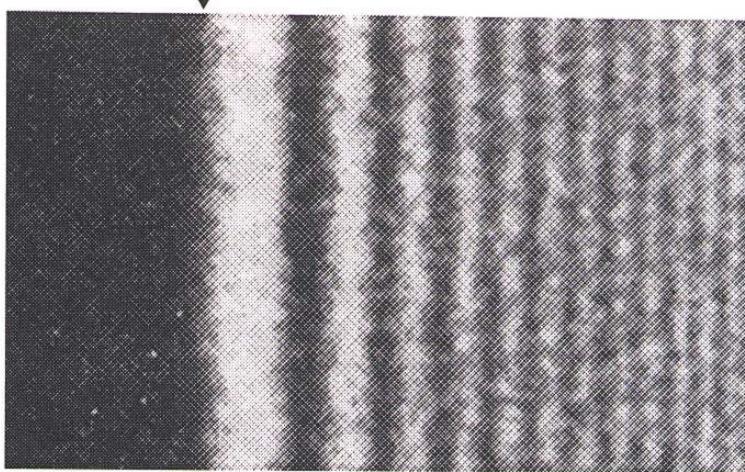
$$d = 0.215 \text{ nm}$$

Diffraction d'électrons

Lame



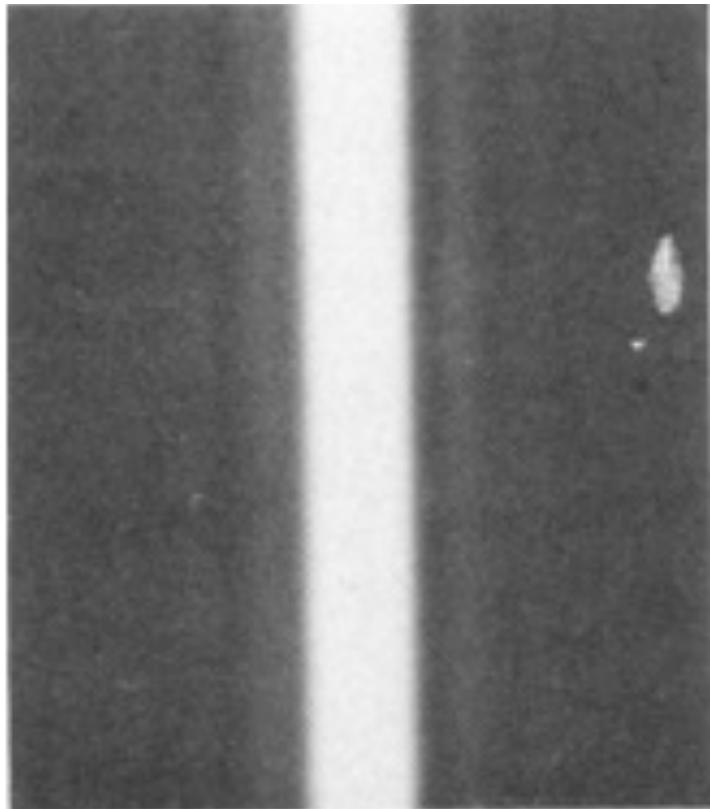
lumière visible



électrons de 38 keV
(x 180'000)

Diffraction d'électrons

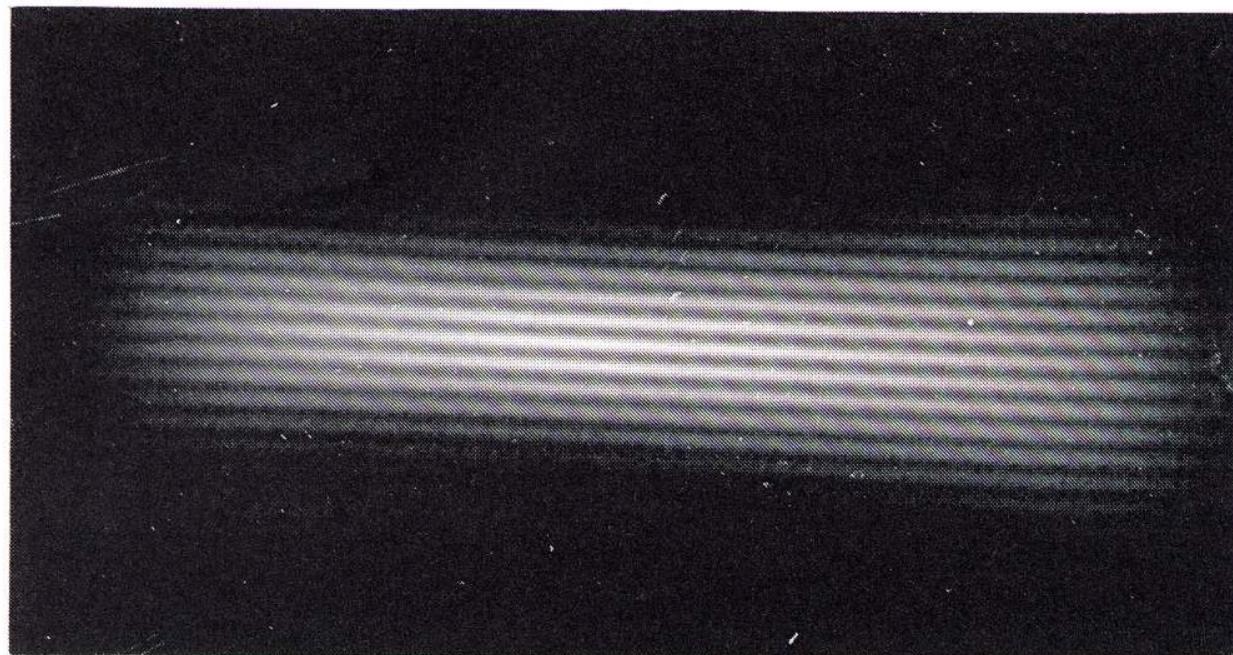
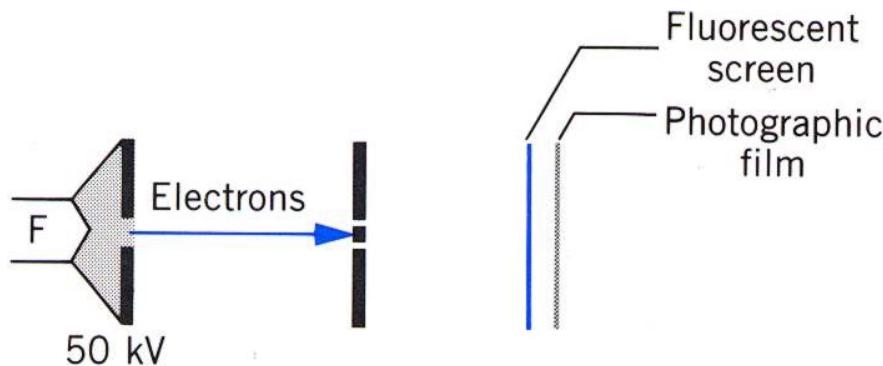
Fente



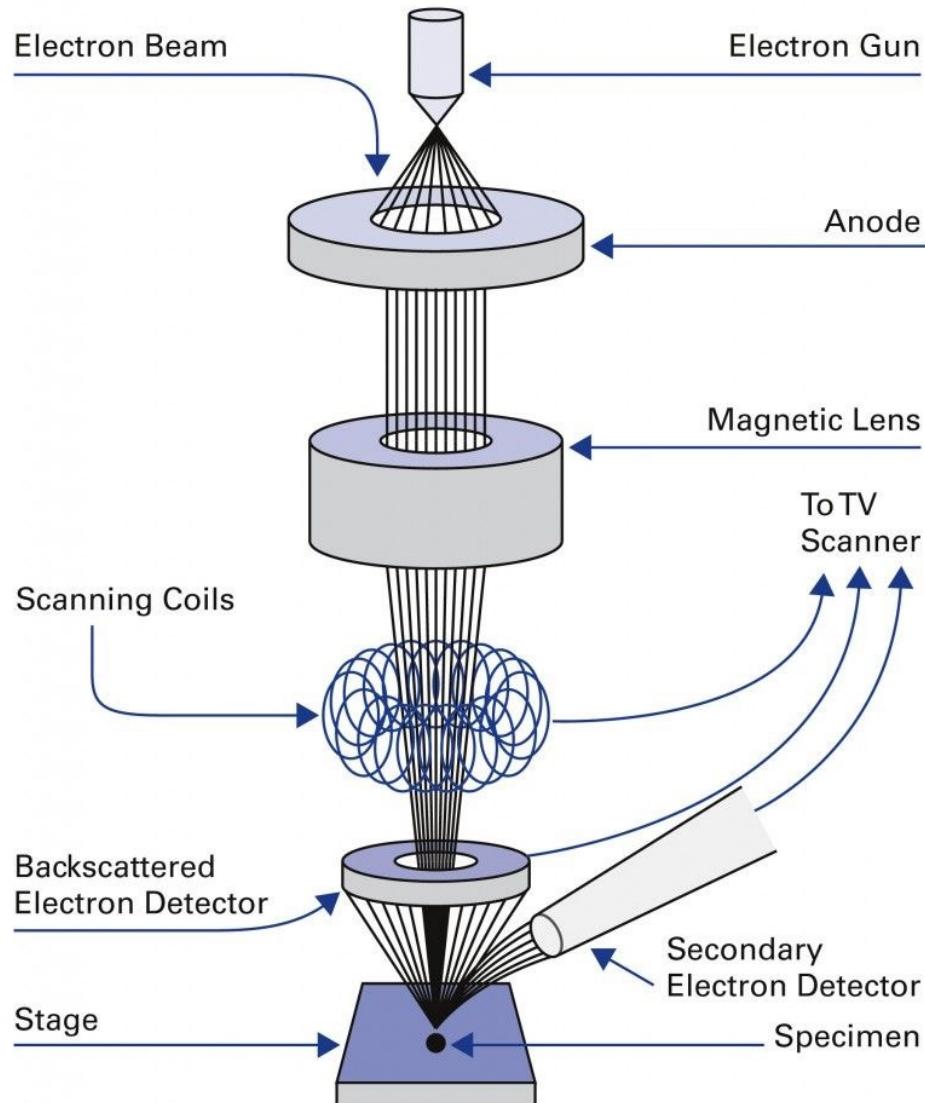
Ouverture circulaire



Interférence d'électrons



Microscope électronique

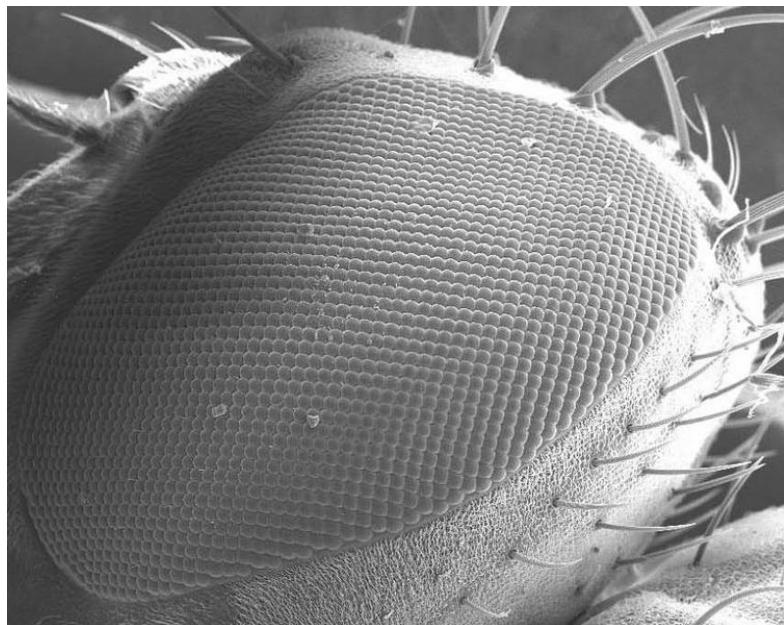


Résolution

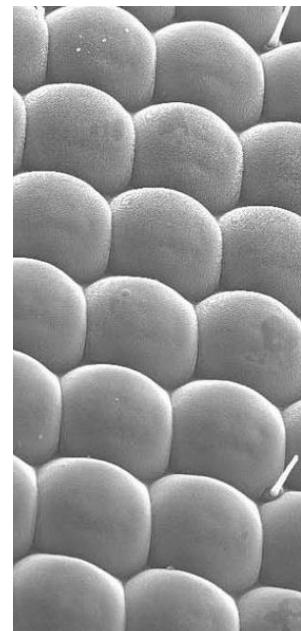
microscope optique : 200 nm

microscope électronique: 1 nm

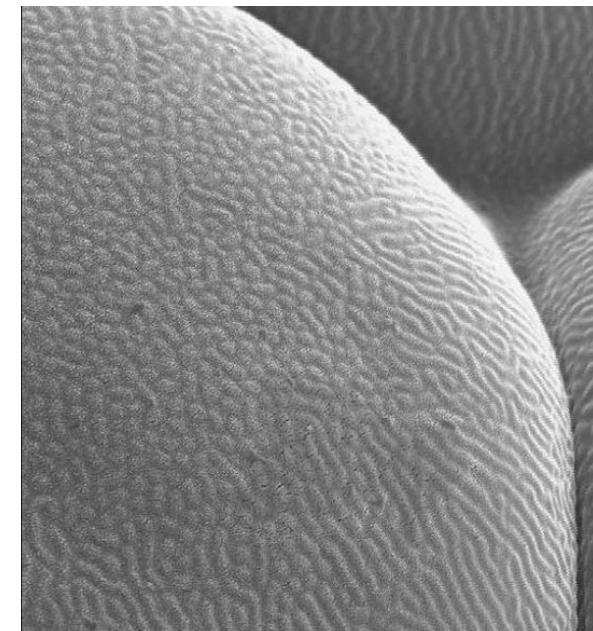
Image de microscope électronique



œil d'une mouche grossi 100x

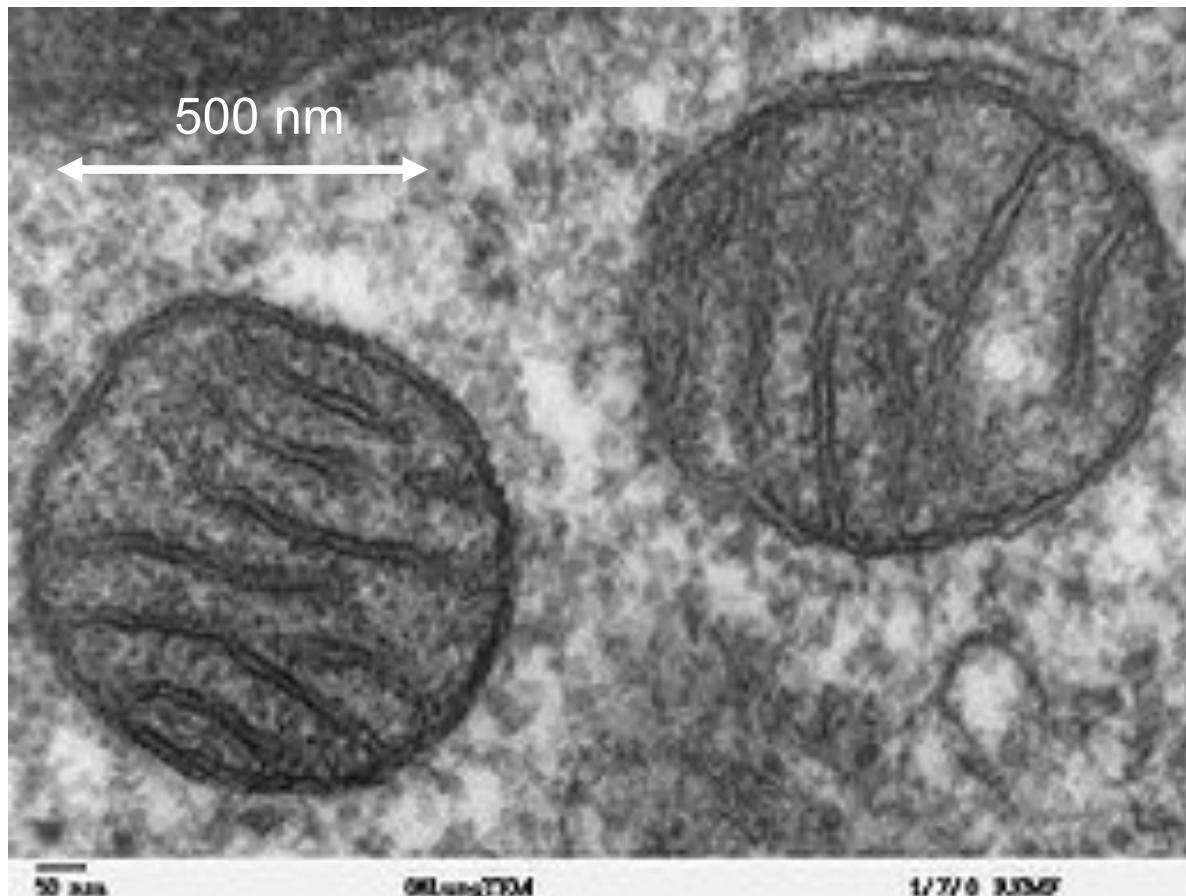


1'000x



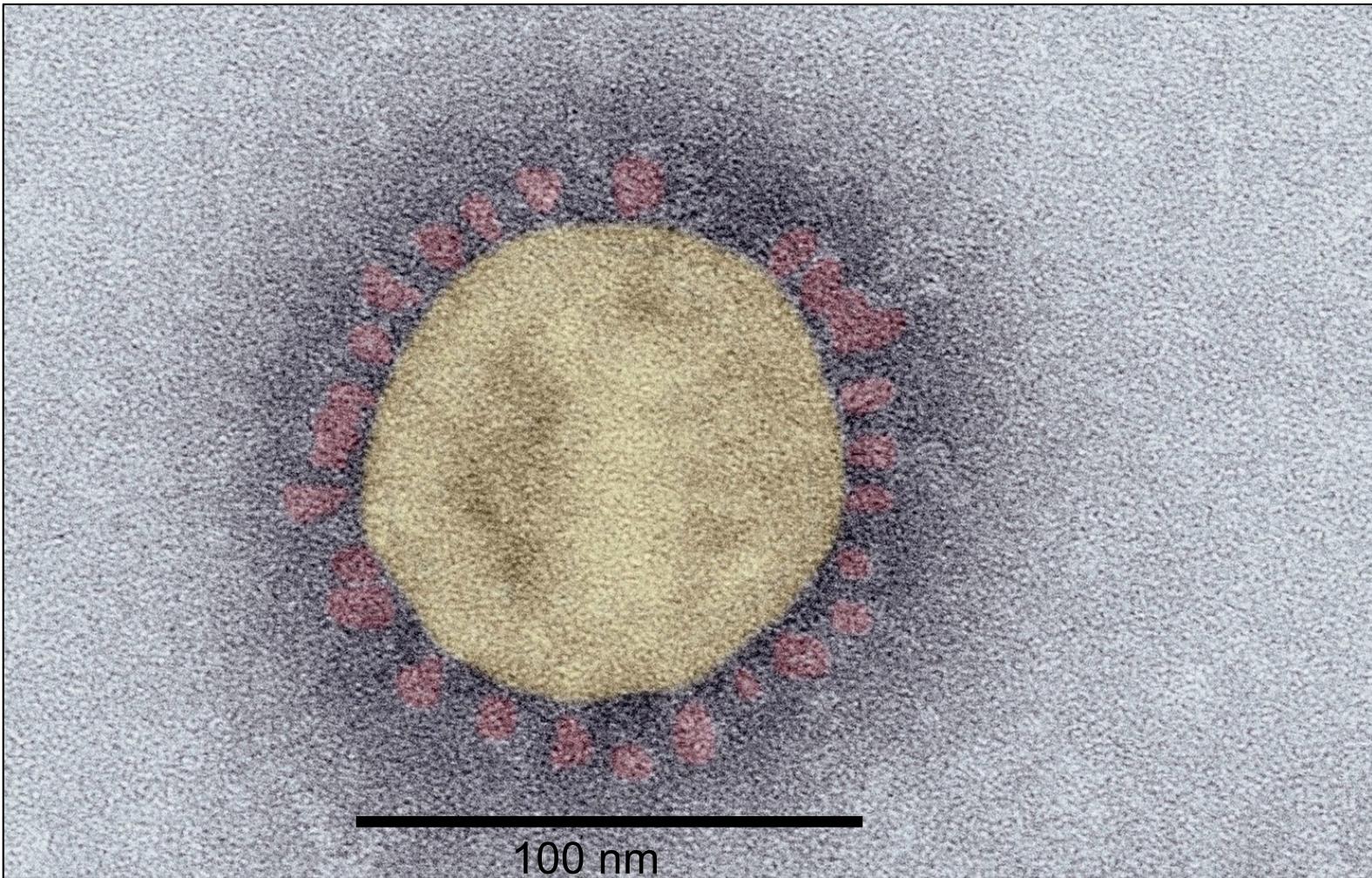
10'000x

Image de microscope électronique



mitochondrie (organite) de mammifère

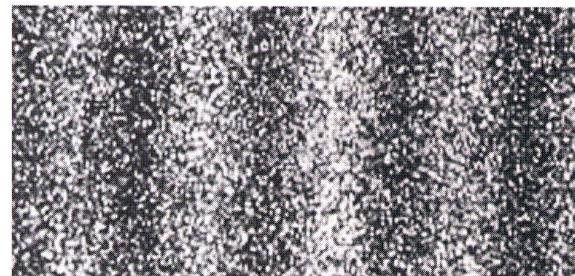
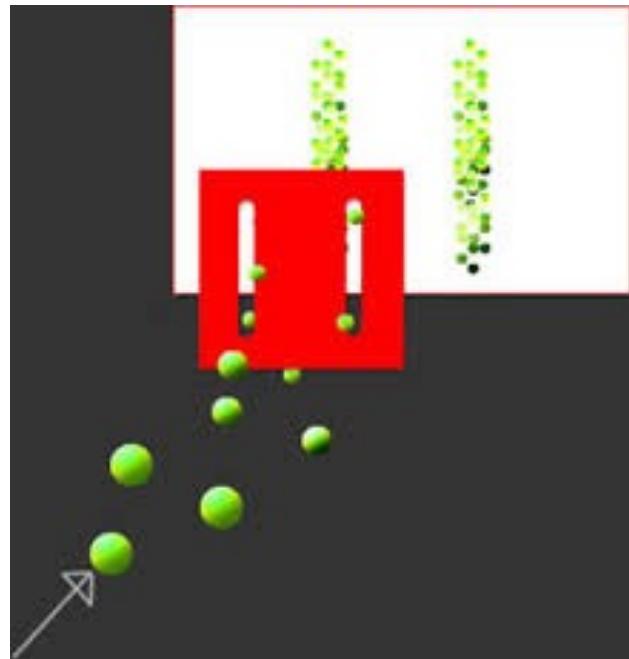
Image de microscope électronique



SARS-CoV-2 (COVID19)

Interférence de deux fentes

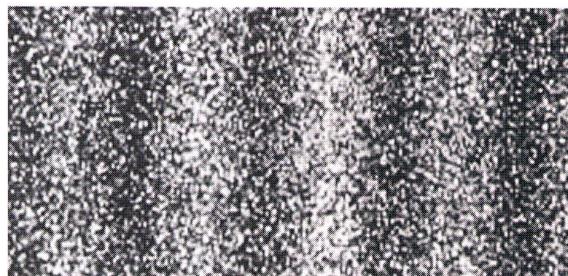
Comment l'image d'interférence se réalise-t-elle ?



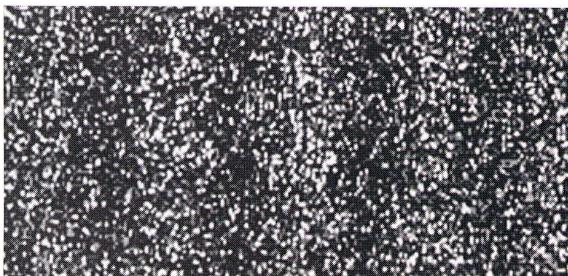
On peut faire passer un électron à la fois

Interférence d'électrons: un électron à la fois...

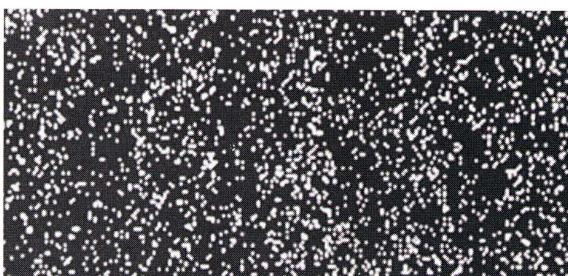
70'000 électrons



20'000 électrons



3'000 électrons



100 électrons



Constatations concernant les électrons

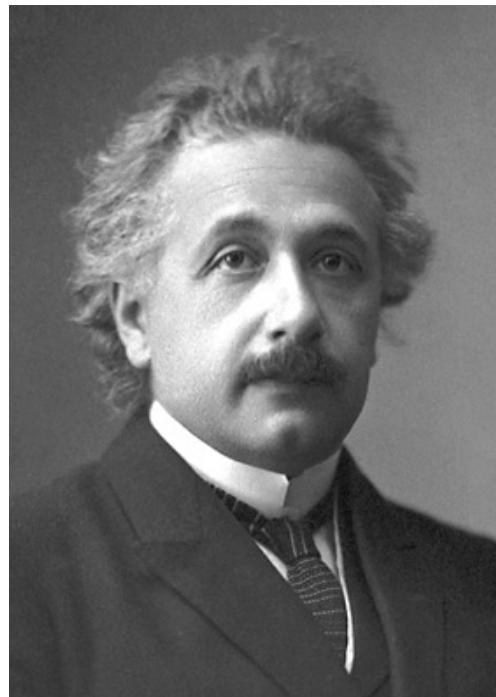
- Les impacts des électrons sont bien localisés. L'électron ne se divise pas.
- On ne peut pas savoir où l'impact aura lieu. Les électrons ont tous la même énergie et la même quantité de mouvement avant de passer par les fentes. Il y a un aspect d'indéterminisme qui intervient.
- La densité des impacts donne la figure d'interférence qu'on connaît. Il s'agit d'une propriété moyenne qui comprend beaucoup d'impacts.

On conclut que la mécanique quantique est gérée par une description statistique : on ne peut pas déterminer où l'électron aura son impact mais seulement la distribution des probabilités d'impact.

Il s'agit d'une propriété fondamentale de la matière, c'est-à-dire elle ne reflète pas notre incapacité à mieux décrire le système.

Albert Einstein dans une lettre à Max Born (déc.1926) : “En tout cas, je suis convaincu qu’Il ne joue pas aux dés”

“Jedenfalls bin ich überzeugt, daß der nicht würfelt”



Albert Einstein
1879 - 1955



Prix Nobel
1921



Max Born
1882 - 1970

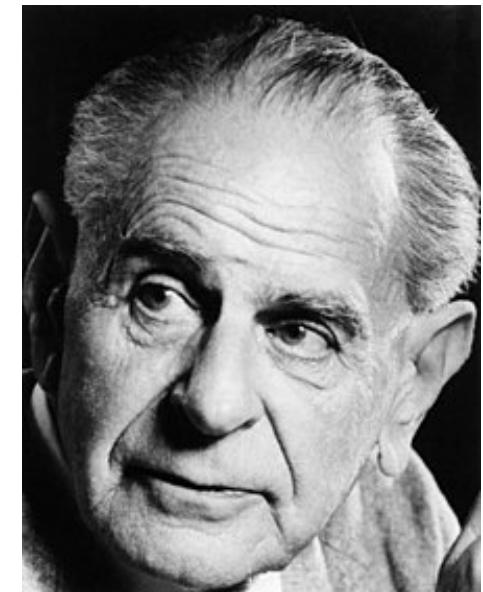


Prix Nobel
1954

[link](#)

Philosophie de la science

- Aucune théorie universelle stricte n'est justifiable à partir d'un principe d'induction, c'est-à-dire sur la base d'un dénombrement d'énoncés particuliers.
- Toute théorie scientifique doit pouvoir potentiellement être réfutable.



Karl R. Popper
1902 - 1994

Se poser la question si une théorie est bien “vraie” n'a pas de sens.

Une théorie scientifique reste en vigueur jusqu'à ce qu'elle ne soit réfutée sur la base de faits empiriques.

La mécanique quantique donne des prédictions précises en 10^{-8} et est ainsi une des théories les plus précises que l'humanité ait su produire.

Cours 09

Nature quantique du rayonnement

- Effet Compton
- Dualité “onde-particule” de la lumière

Nature ondulatoire de la matière

- Longueur d'onde de Broglie
- Expérience de Thompson
- Expérience de Davisson et Germer
- Diffraction d'électrons
- Microscope électronique
- Interférence d'électrons
- Description statistique