

Un peu d'Histoire des Sciences



Albert Michelson - 1894

“The more important fundamental laws and facts of the physical science have all been discovered, and these are now so firmly established that the possibility of their ever being supplanted in consequence of new discoveries is exceedingly remote...

Our future discoveries must be looked for in the sixth place of decimals.”

Chicago address - 1894



Lord Kelvin – 1900

Il y a cependant “deux petits nuages”

“The beauty and clearness of the dynamical theory, which asserts heat and light to be modes of motion, is at present obscured by two clouds.

I – The first came into existence with the undulatory theory of light [...]; it involved the question, How could the earth move through an elastic solid, such as the luminiferous ether?

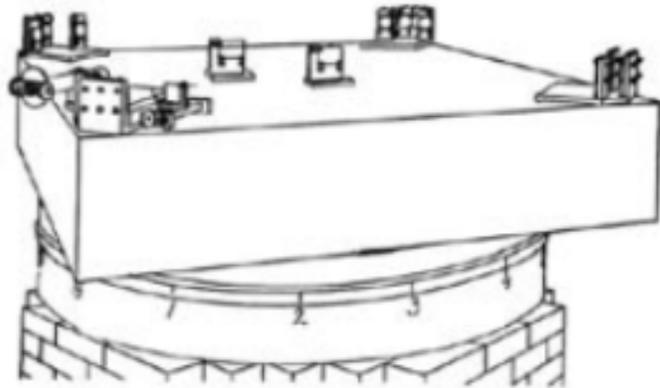
II – The second is the Maxwell-Boltzmann doctrine regarding the partition of energy”.

Conférence à la Royal Institution - 17 avril 1900

Lord Kelvin et ses deux nuages

Détection du mouvement de la Terre par rapport à l'éther
résultat négatif de l'expérience de Michelson et Morley

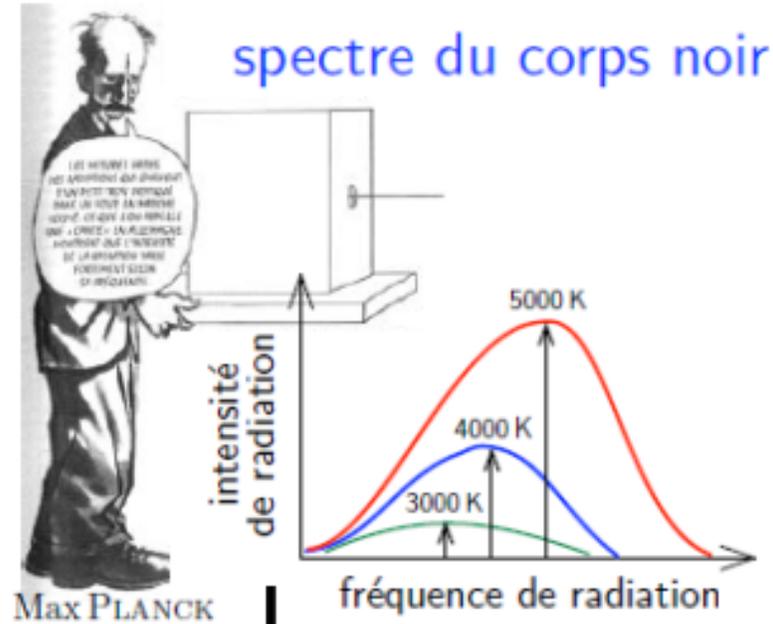
ART. XXXVI.—*On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*; by ALBERT A. MICHELSON and EDWARD W. MORLEY.*



Théorie de la relativité (1905)

abandon de la notion de temps absolu

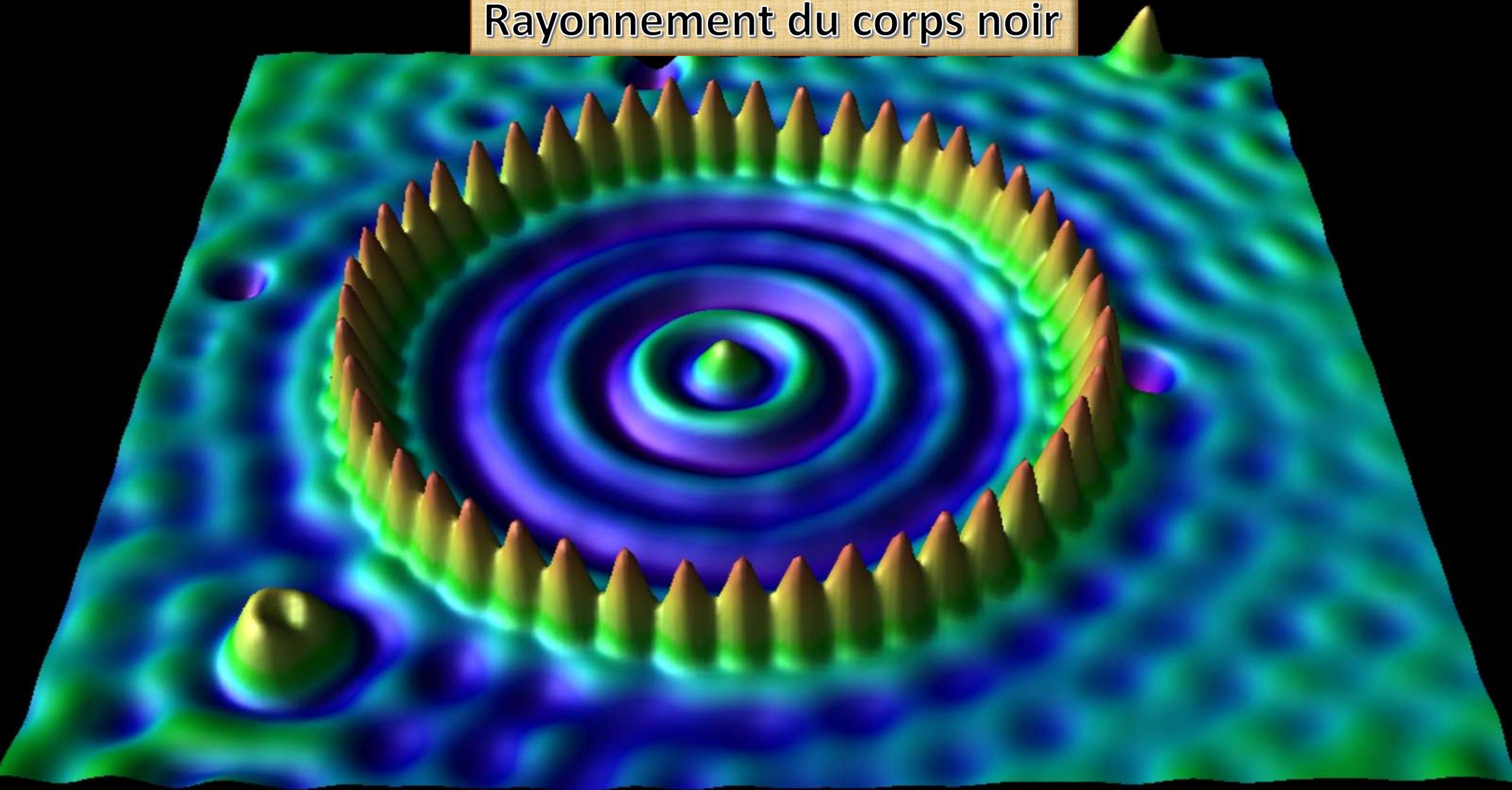
équipartition de l'énergie
lumière émise par un corps à l'équilibre thermodynamique



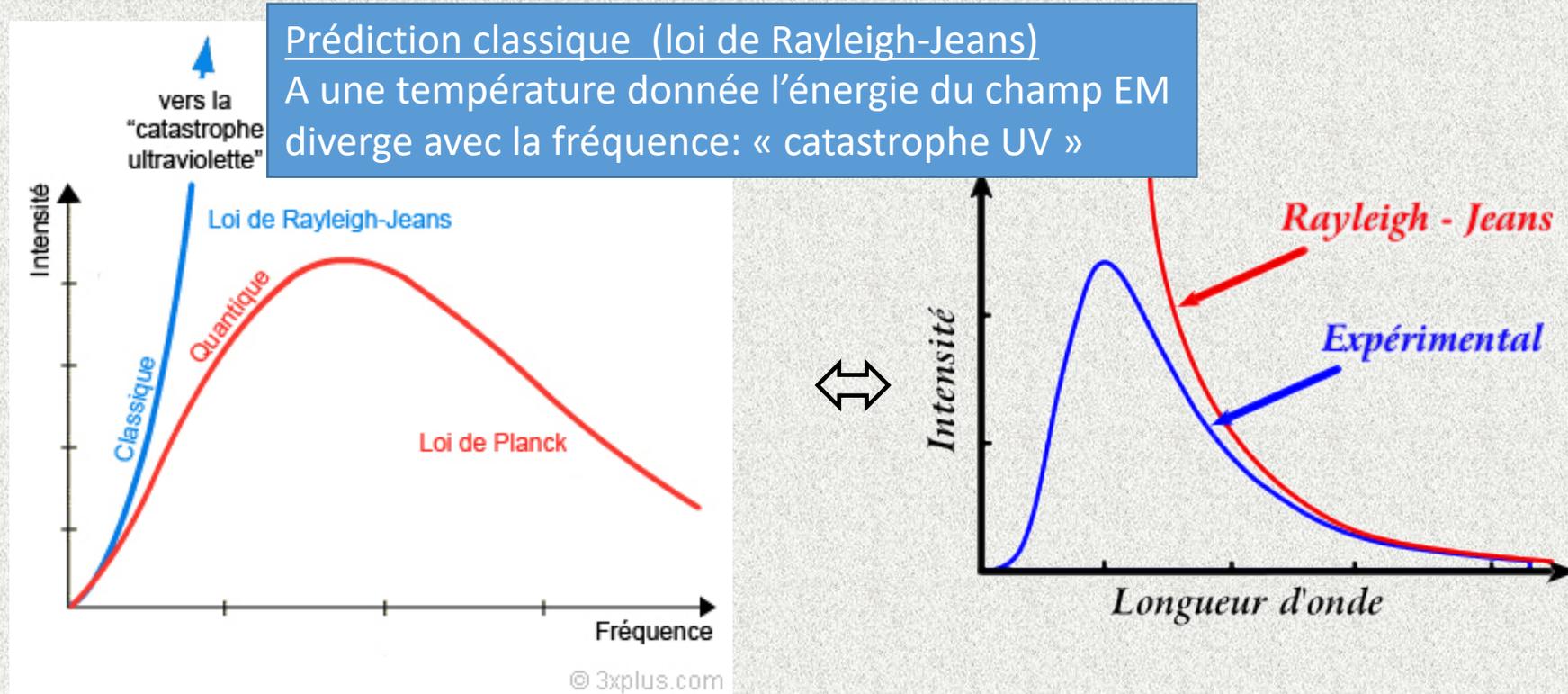
mécanique quantique (1900-1930)

abandon du déterminisme de la mécanique classique

Rayonnement du corps noir



La catastrophe ultraviolette



**Densités spectrales en énergie du champ EM
(densité d'énergie par unité de fréquence)**

- ⇒ Prédiction classique: la densité d'énergie du champ EM **diverge** à l'équilibre thermodynamique
- ⇒ c'est contraire à l'expérience (on pouvait s'y attendre)

Max Planck et les quanta (1900)



Max Planck « explique » le spectre du corps noir en supposant que les échanges d'énergie entre la matière et le champ électromagnétique se font par quantités discrètes faisant intervenir le « quantum » d'énergie $h\nu$.

$$\Delta E = n \times h\nu = n \times \hbar\omega$$

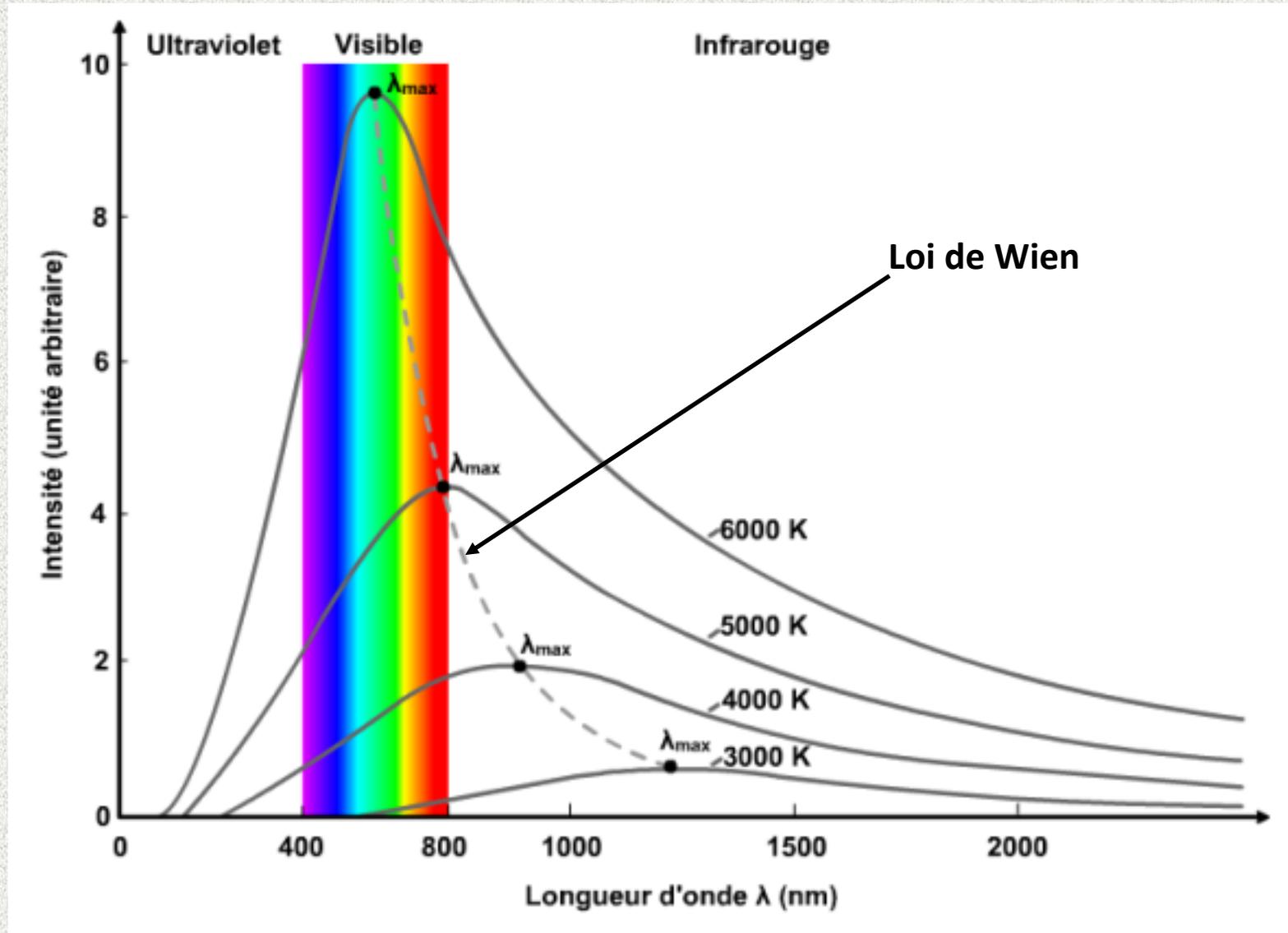
avec:

$$h = 6.626\ 068\ 96\ (33) \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

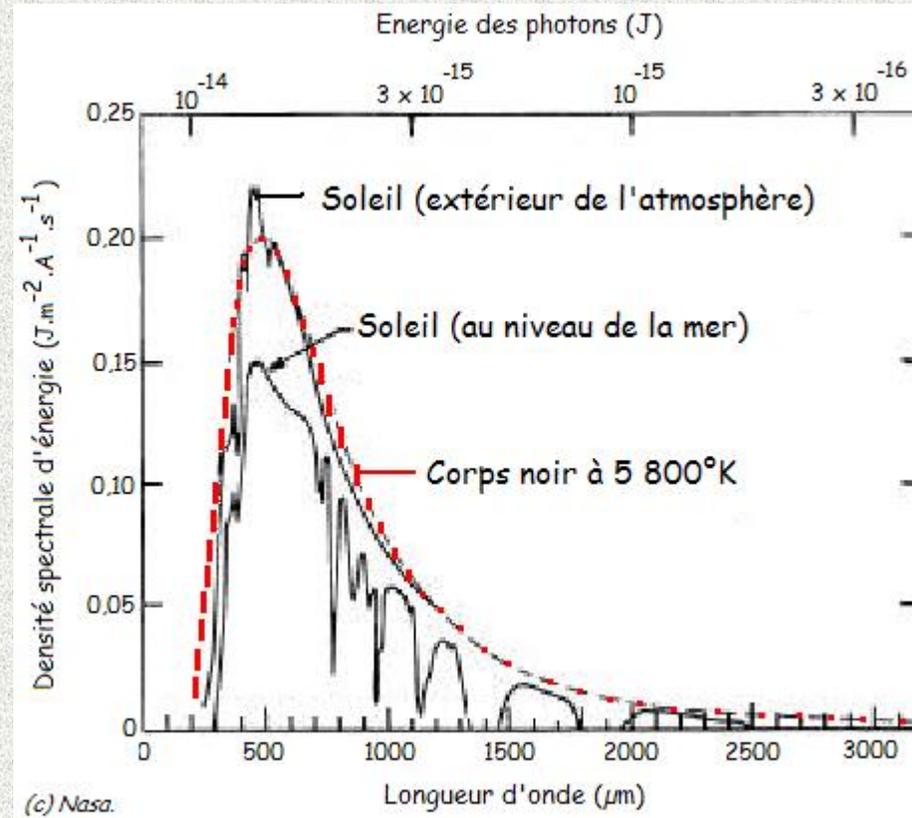
$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \simeq 1.05 \times 10^{-34}\ \text{J.s}$$

h = « quantum d'action », (homogène à un moment cinétique)

Spectre du corps noir

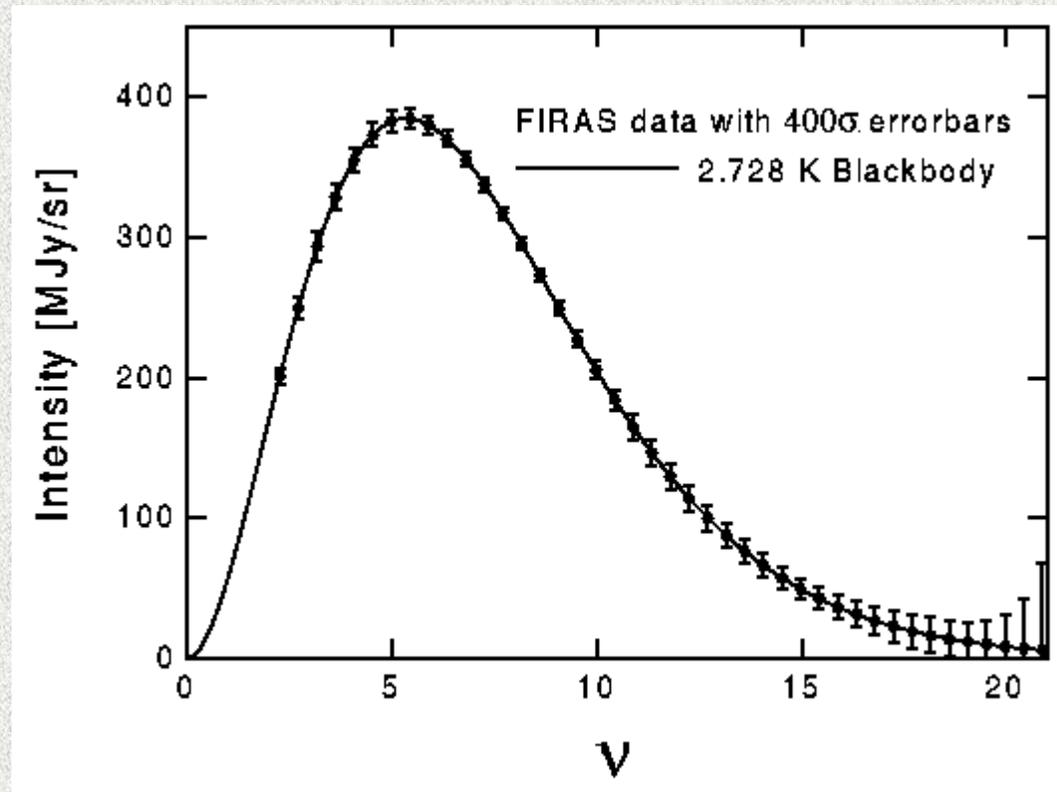


SPECTRE LUMIÈRE SOLAIRE

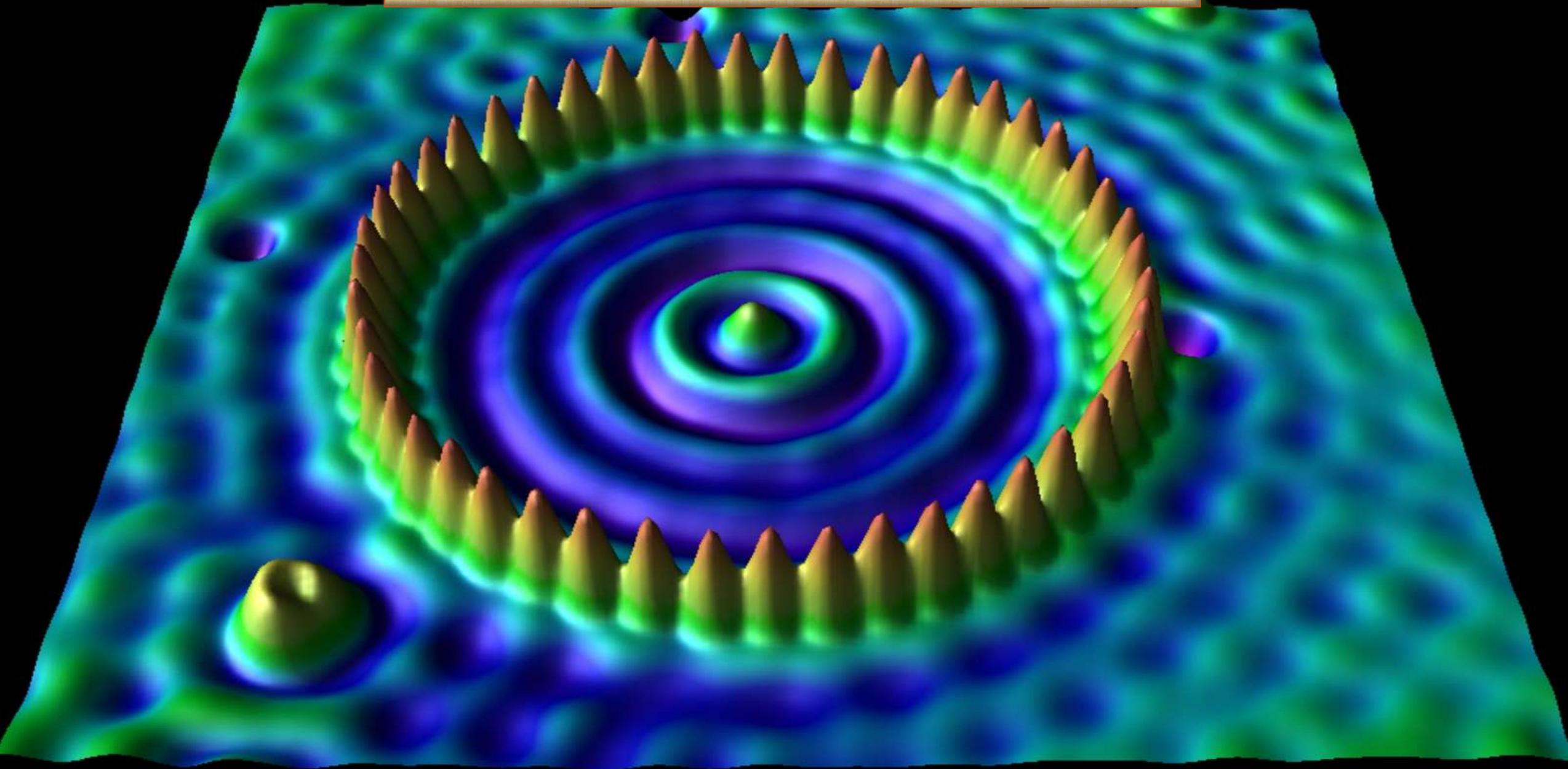


SOLEIL ~ CORPS NOIR À 5800 K

Fond diffus cosmologique = corps noir à 2.73 K



L'effet photo-électrique et le photon



Einstein et les quanta de lumière (1905)



Einstein va plus loin que Planck en identifiant les quanta de Planck à des particules élémentaires de lumière : les photons.

Cela lui permet de suite d'interpréter **l'effet photo-électrique**.

L'existence du photon est corroborée un peu plus tard par l'effet Compton.

La lumière de fréquence ω et de vecteur d'onde \vec{k} est composée de quanta (grains élémentaires)

– énergie $E = \hbar\omega$

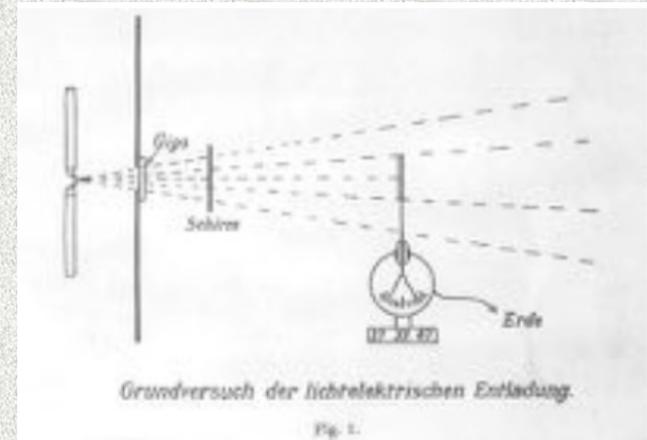
– impulsion $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ $|\vec{k}| = \frac{2\pi}{\lambda}$

C'est le premier exemple de dualité onde-corpuscule

L'effet photo-électrique de Hertz à Einstein (1)

Hertz (1887) puis Hallwachs (1888)

Expériences avec électroscope



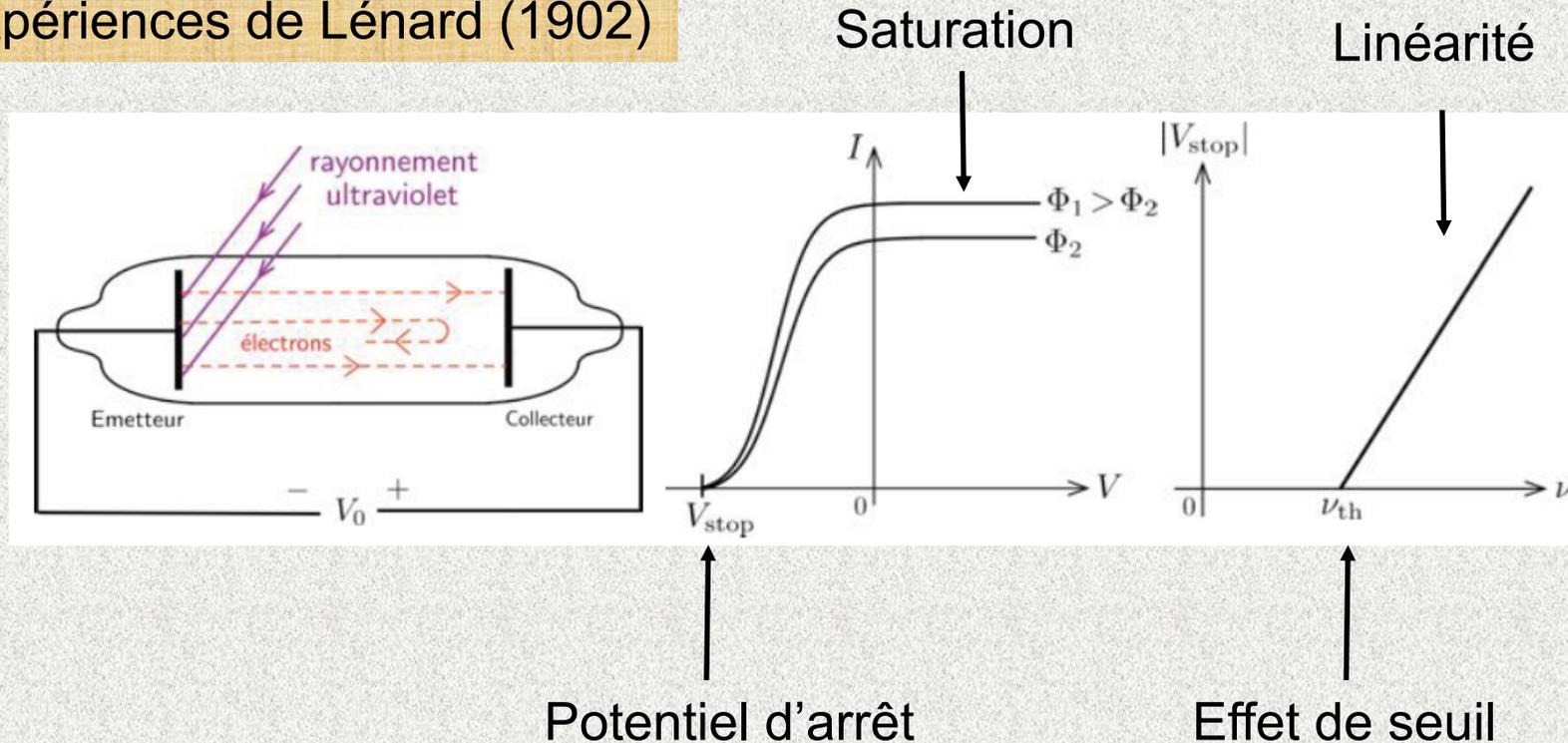
- Electroscopie initialement chargé négativement se décharge si lame de Zinc éclairée par une lumière riche en UV (lampe à vapeur de Magnésium).
- **Rien ne se passe si électroscope est chargé positivement.**
- L'effet est instantané.
- La décharge s'arrête si on interpose une vitre devant la source de lumière (stoppe les UV).

Perte d'électrons !!!

NB : l'électron n'est découvert qu'en 1899 par J.J. Thomson

L'effet photo-électrique de Hertz à Einstein (2)

Expériences de Lénard (1902)



Inexplicable par la physique classique.

Interprétation par Einstein 1905

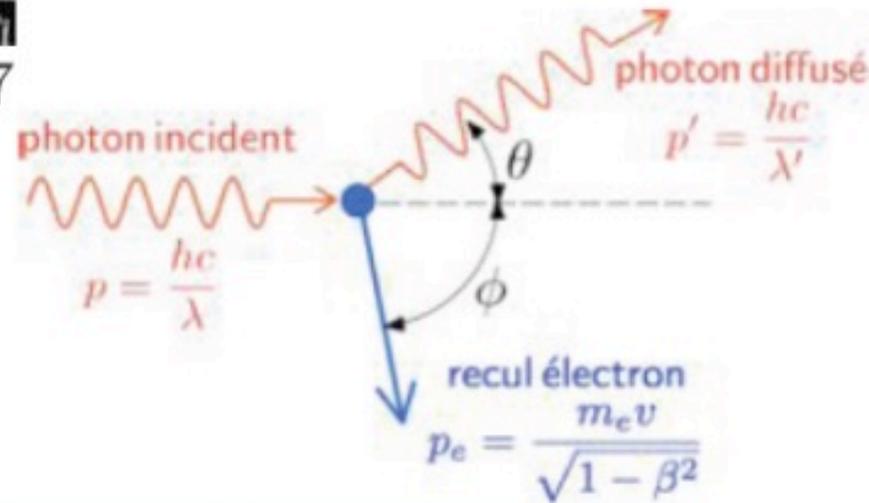
(choc totalement inélastique entre un *photon* et un électron)

Photon = particule - l'effet Compton



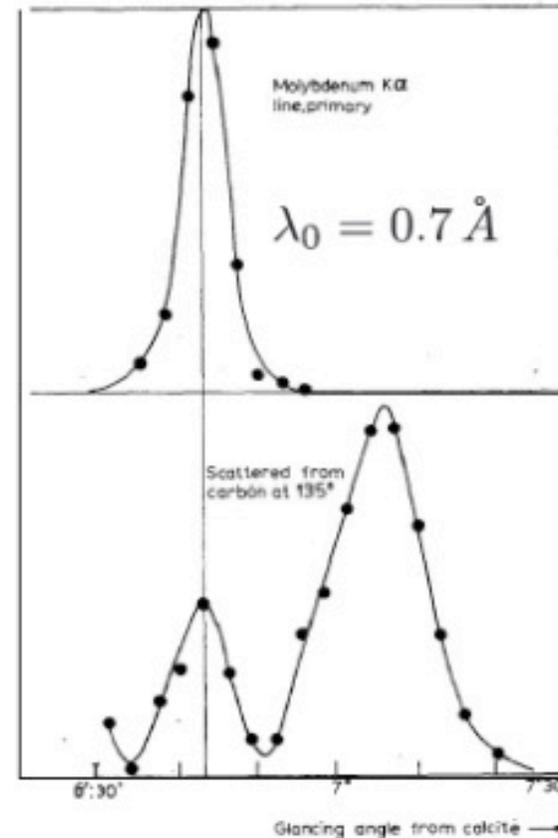
Nobel 1927

Rayons X envoyés sur une cible de graphite
Collision élastique entre photon et électron



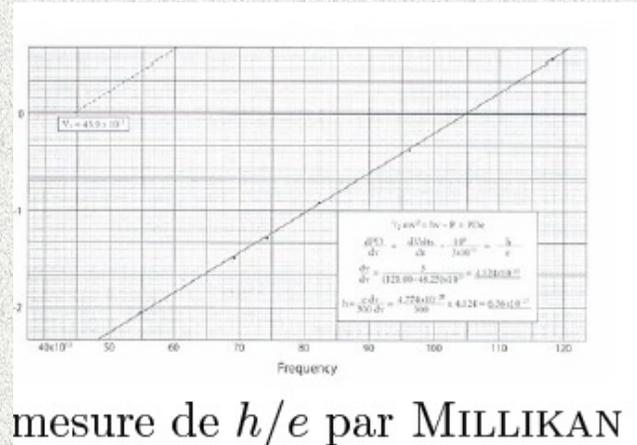
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$

longueur d'onde Compton $\lambda_C = \frac{h}{m_e c} \simeq 0.024 \text{ \AA}$



Dualité de la lumière

Aspect dual de la lumière, ondulatoire (interférences, diffraction) et corpusculaire (effet photo-électrique, effet Compton) définitivement admis après les expériences de Millikan (1915)



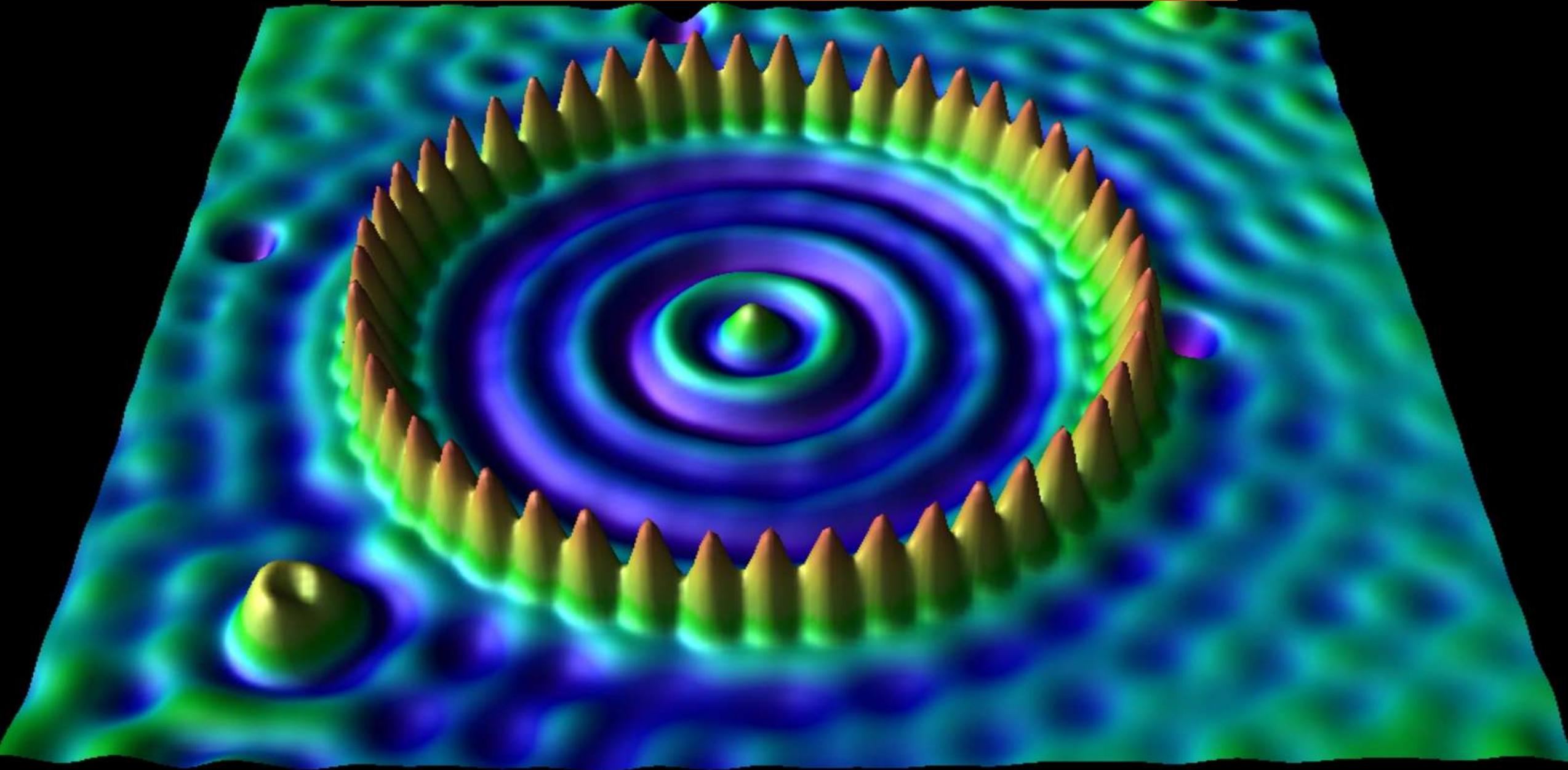
R.A. Millikan



“I spent ten years of my life testing the 1905 equation of Einstein’s, and contrary to all my expectations, I was compelled in 1915 to assert its unambiguous experimental verification in spite of its unreasonableness since it seems to violate everything we knew about the interference of light.”

Einstein prix Nobel 1921, Millikan prix Nobel 1923.

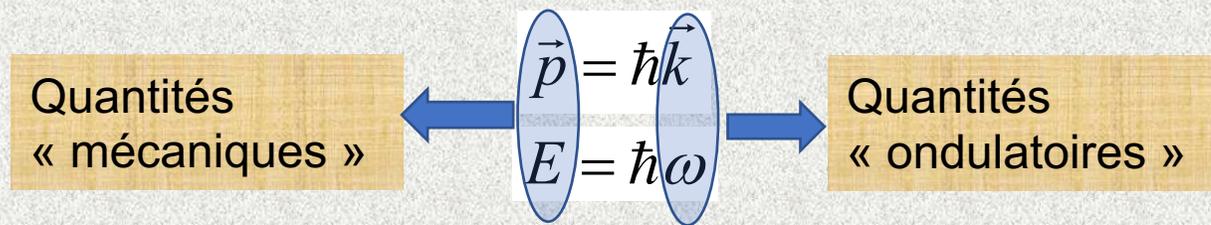
Louis De Broglie et la dualité onde-corpuscule



Dualité onde-corpuscule

Si la lumière que l'on pensait ondulatoire est aussi constituée de corpuscules, qu'en est-il des particules matérielles ? Ont-elles aussi un comportement ondulatoire ?

⇒ Hypothèse audacieuse de Louis de Broglie (1923) qui généralise le « statut dual » de la lumière à toutes les particules.



Longueur d'onde de « De Broglie »

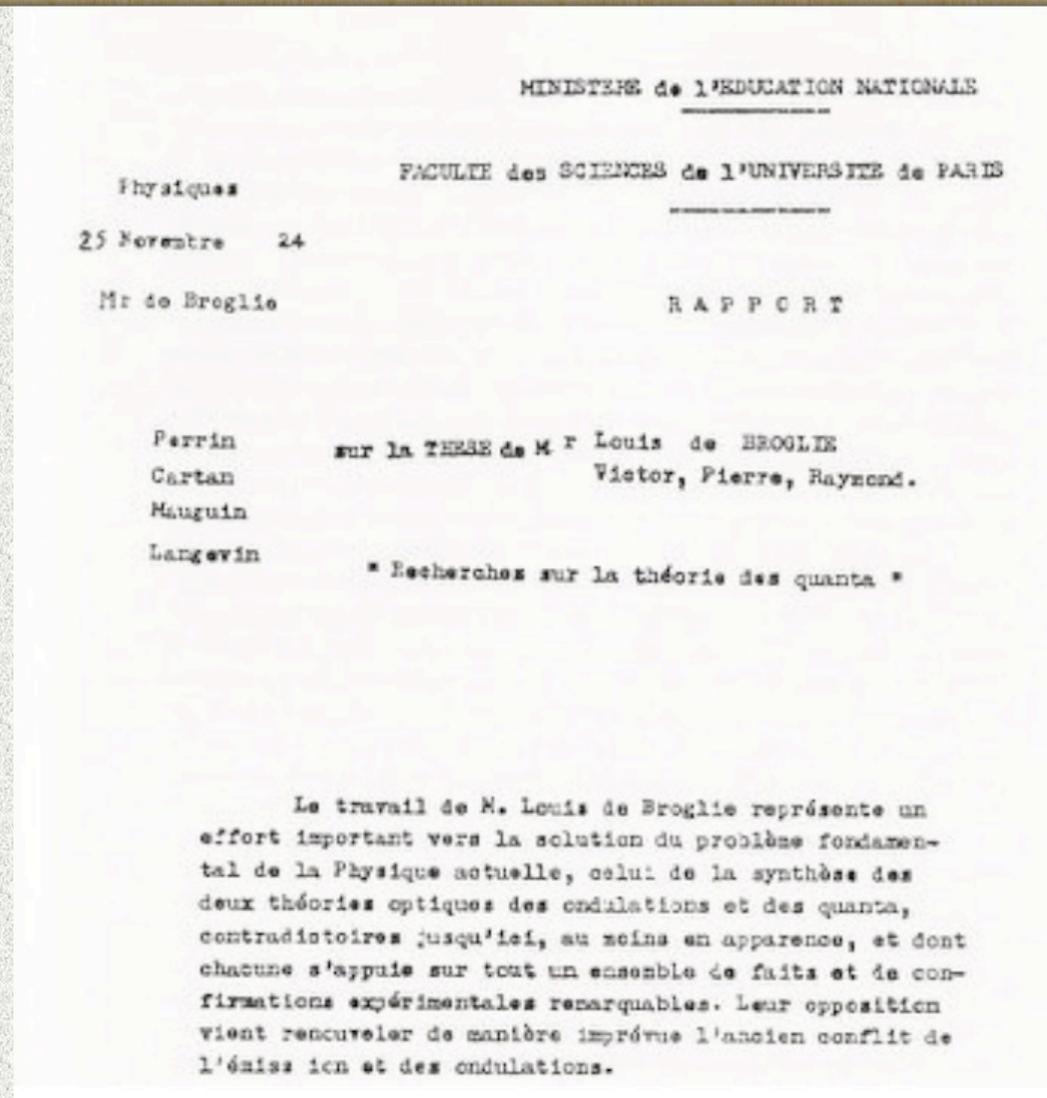
$$\lambda_{DB} = \frac{2\pi}{k} = \frac{h}{p}$$

Objets macroscopiques, ridiculement faible (non mesurable)
Objets microscopiques : fm, pm ...

Dualité onde-corpuscule



Prix Nobel 1929



Confirmation des « ondes de matière »

Première expérience de diffraction avec un faisceau d'électrons :
Davisson, Germer et Thomson (1927). Cible = cristal de Nickel.
Electrons diffracté par le réseau cristallin à l'instar des rayons X.
Electrons $\lambda_{DB} \approx 1$ Angstrom.

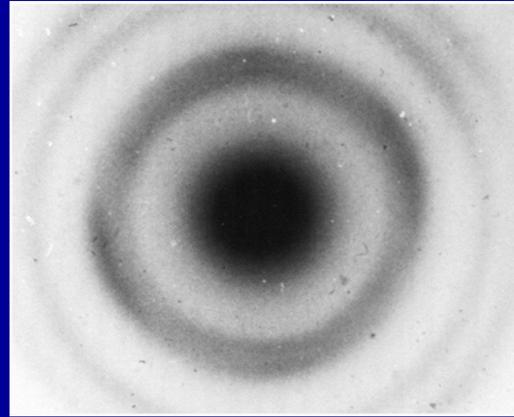
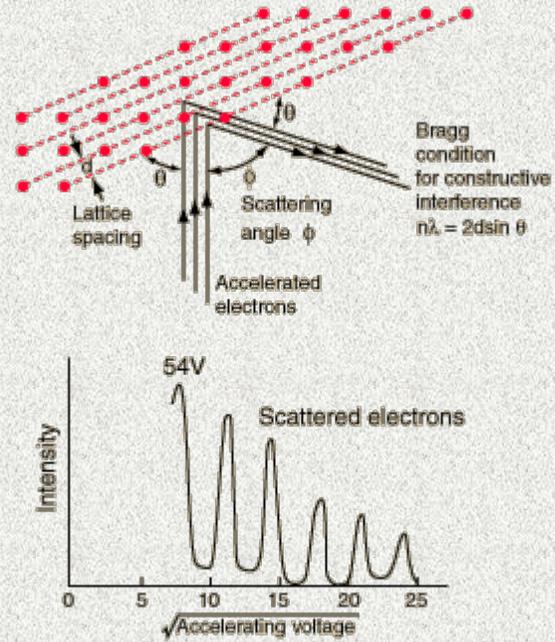


Clinton P. DAVISSON
& Lester H. GERMER



George P. THOMSON

Diffraction d'électrons



Electron diffraction pattern (Davisson, Germer, Thompson, 1927)

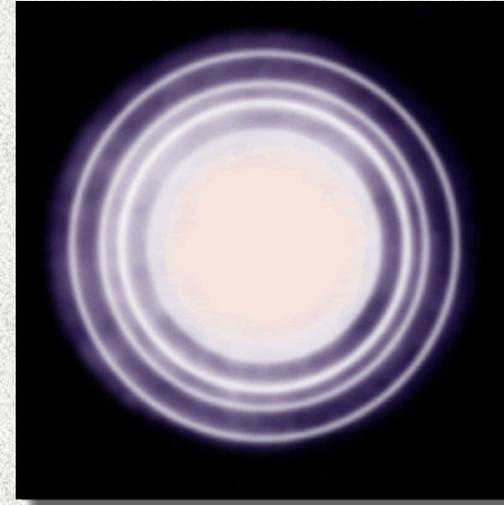
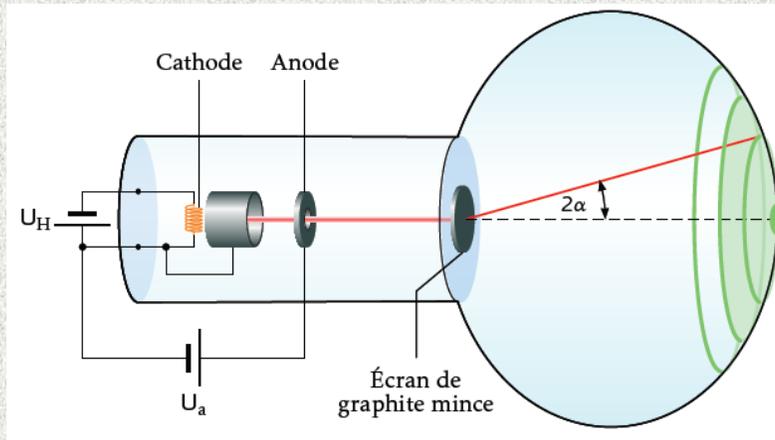
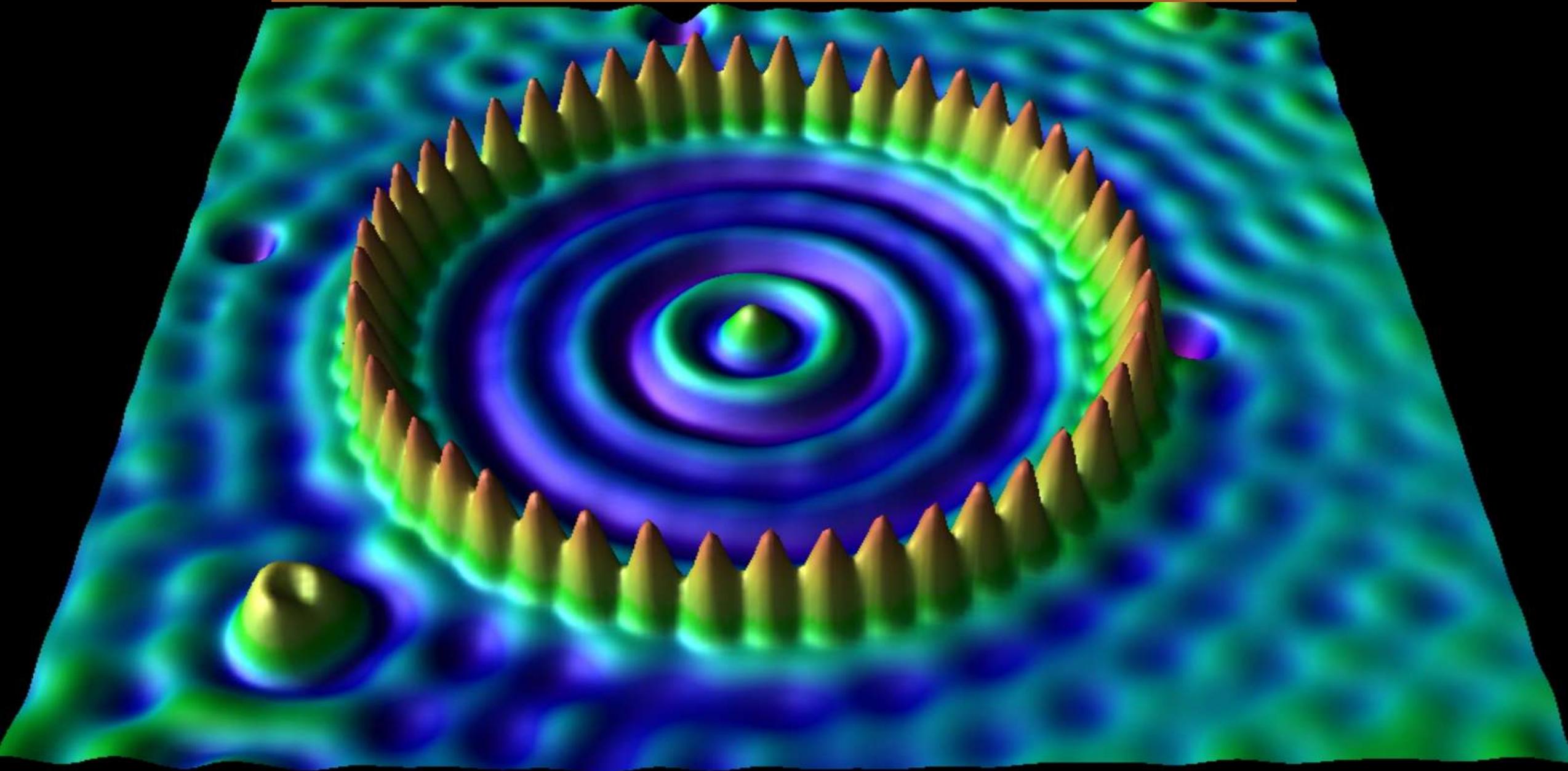


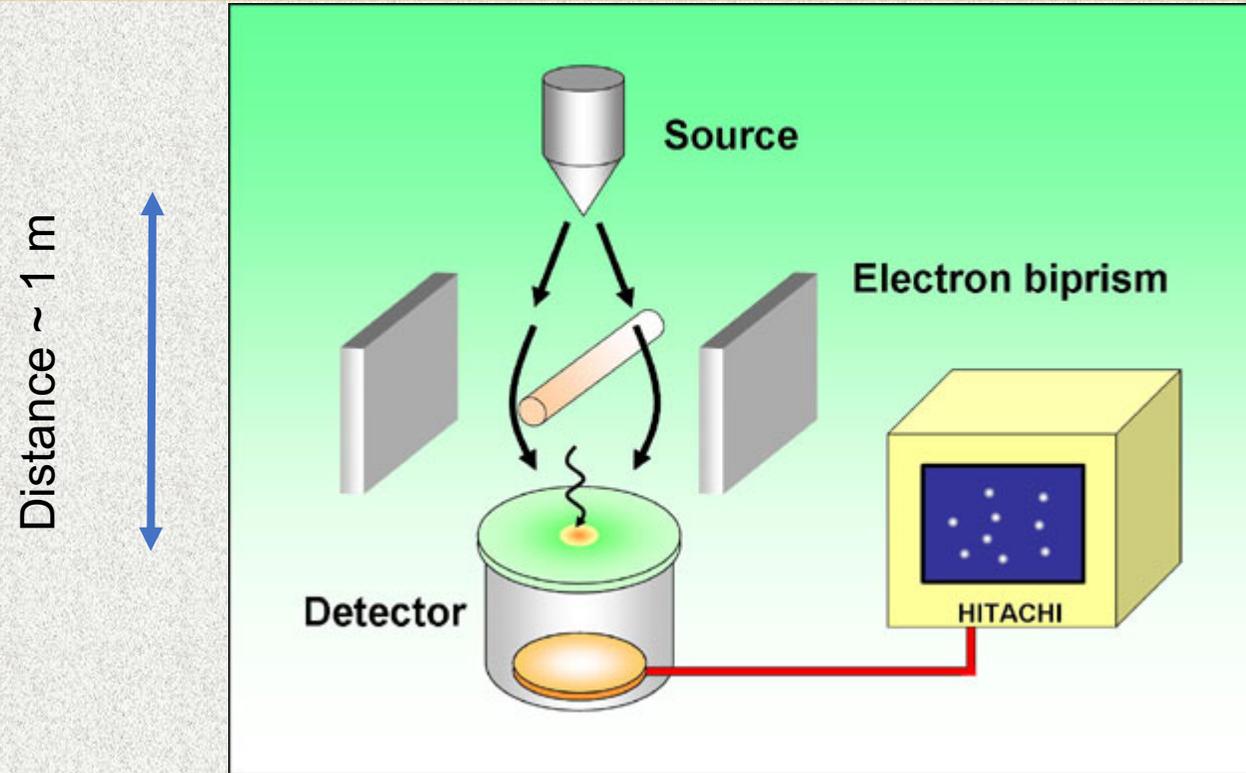
Figure de diffraction obtenues sur un cristal d'argent (poudre) avec des électrons dont l'énergie cinétique correspond à une longueur d'onde de de Broglie de **0,645 Angström**

Expériences d'interférences « quantiques » récentes



Fentes d'Young avec des électrons

Fentes d'Young avec une source pouvant envoyer les électrons un à un.
Expérience de Tonomura (Hitachi Labs), 1989.



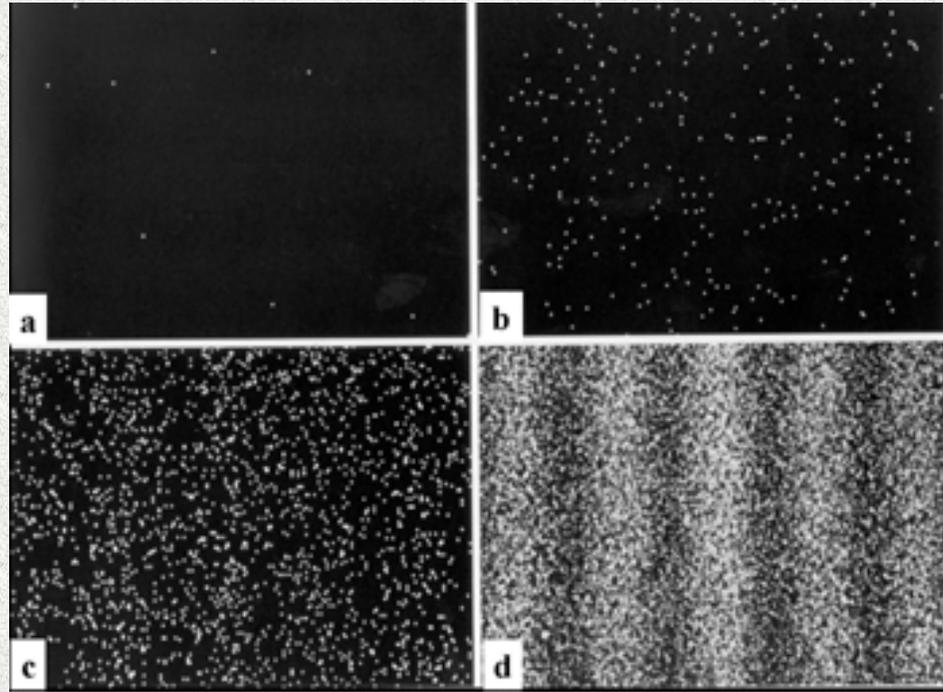
énergie d'accélération 50 keV
→ vitesse $\simeq 0.41 \times c$
filament de diamètre $\simeq 1 \mu\text{m}$
flux $\simeq 10$ électrons par seconde

Fentes d'Young avec des électrons: Le film

```
<iframe width="560" height="315"  
src="https://www.youtube.com/embed/Panqo  
Ha_B6c" frameborder="0" allow="autoplay;  
encrypted-media" allowfullscreen></iframe>
```

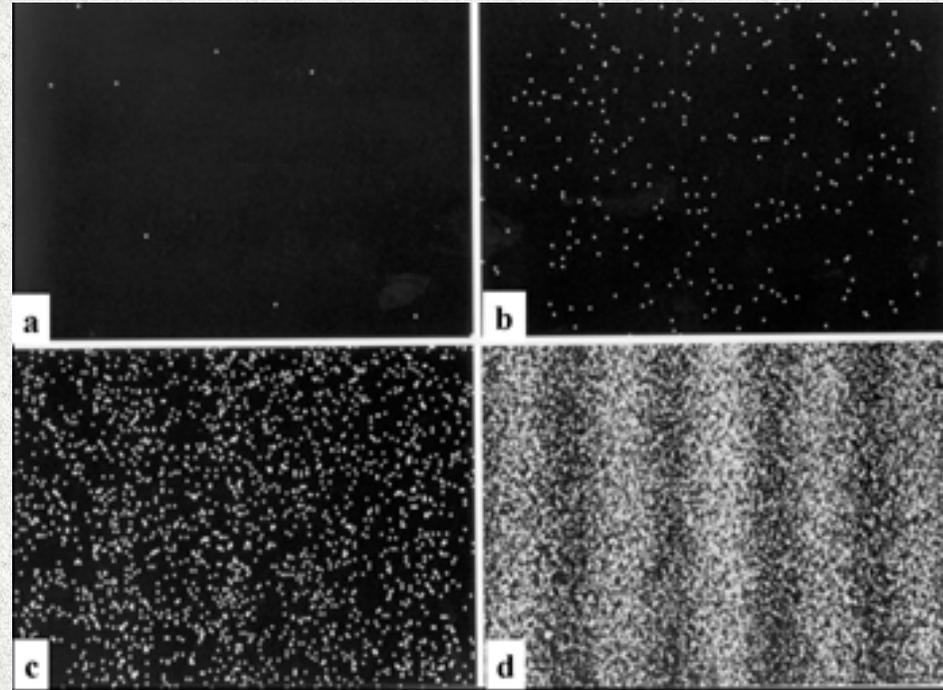
https://www.youtube.com/watch?v=PanqoHa_B6c

Fentes d'Young avec des électrons



- Chaque électron est détecté en un point de l'écran et non sur une tâche étendue : particule ponctuelle !
- Chaque point d'impact semble aléatoire. Un point d'impact seul n'apporte aucune info.
- Deux électrons pourtant préparés dans les mêmes conditions (même conditions initiales de position, vitesse ...) sont détectés en 2 endroits différents de l'écran
- L'ensemble se distribue finalement, après un grand nombre d'impacts, avec une distribution spatiale semblable aux franges d'interférence en optique.

Fentes d'Young avec des électrons

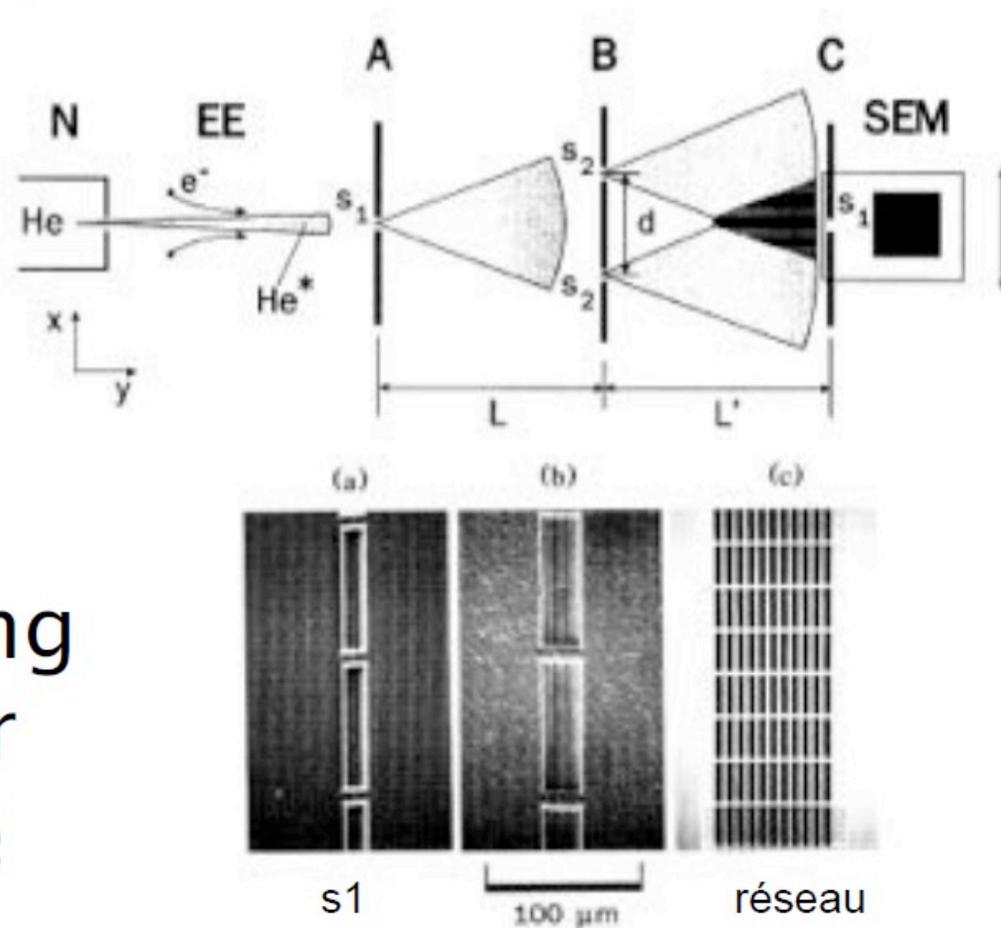


La mécanique classique ne peut pas expliquer ce résultat.
La mécanique quantique ... OUI ! (elle est faite pour)

Interférences avec des atomes (1)

Séparation du front d'onde

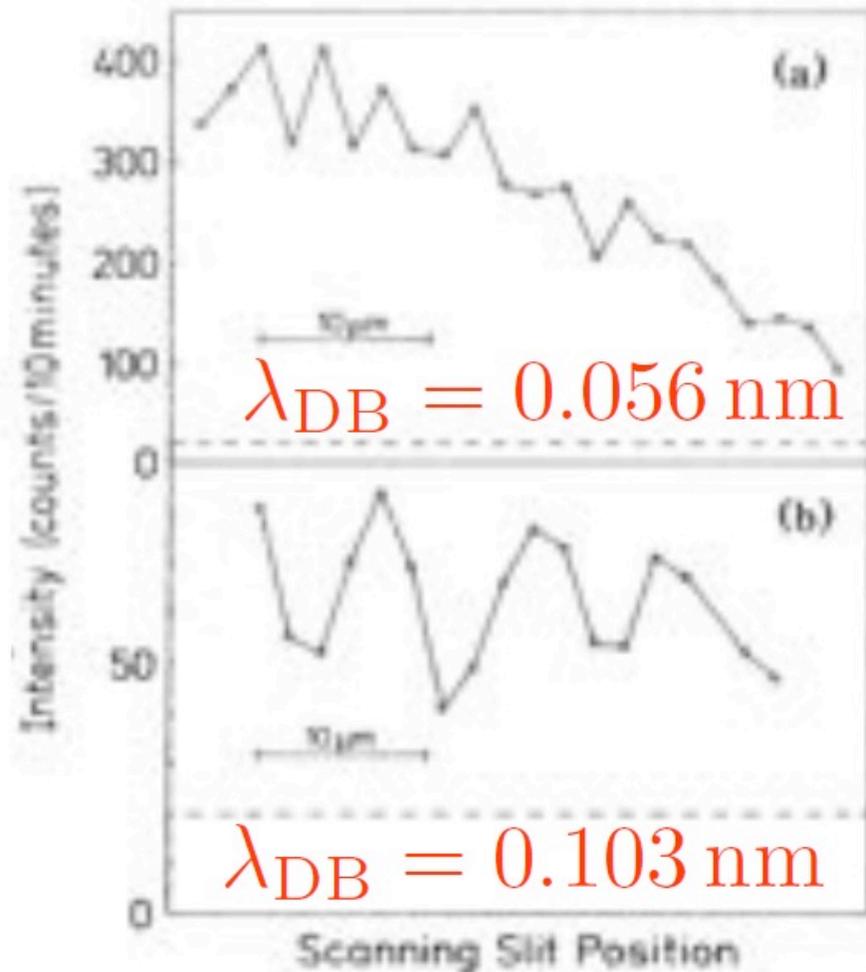
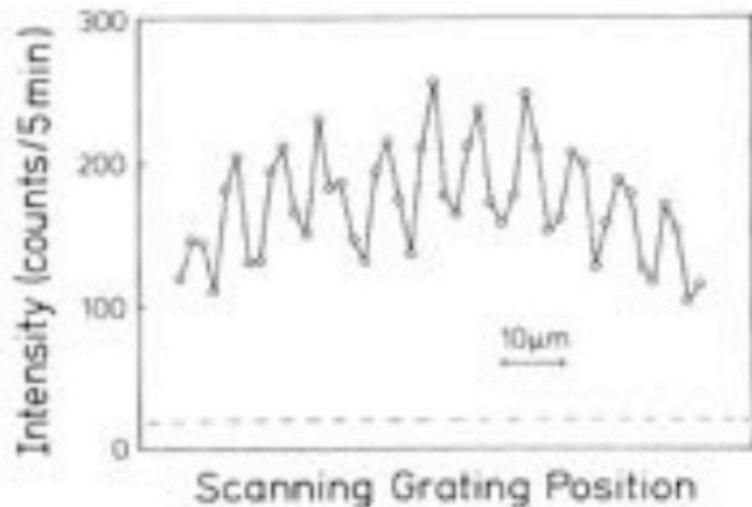
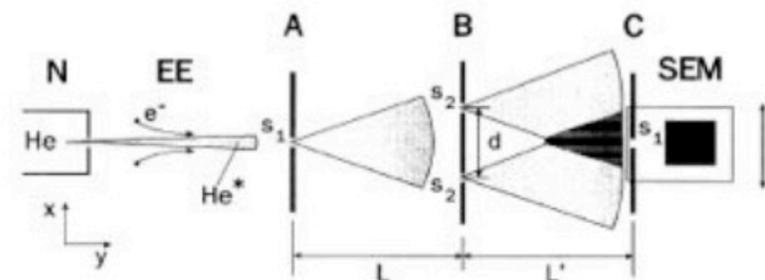
O. Carnal & J. Mlynek – Konstanz, 1991



Fentes d'Young
réalisées par
lithographie

Interférences avec des atomes (1)

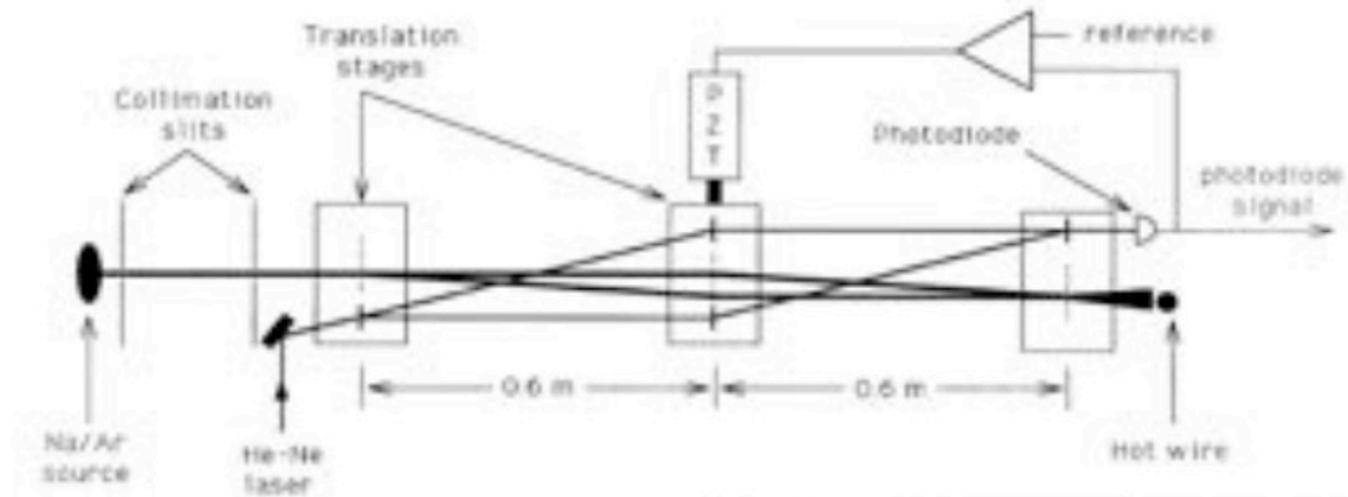
Expérience de Carnal et Mlynek – 1991



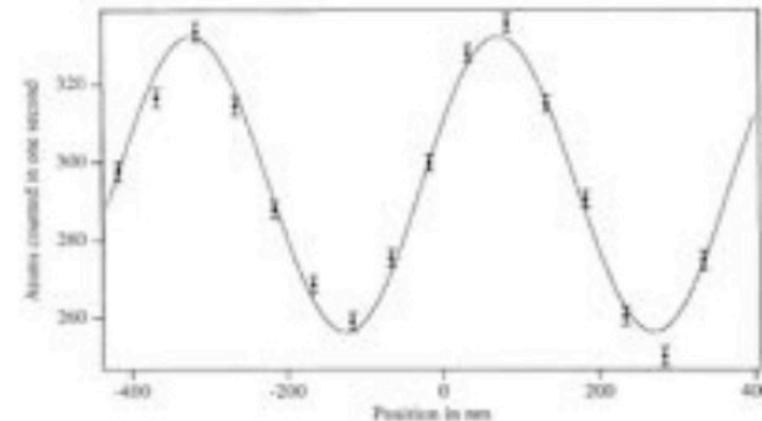
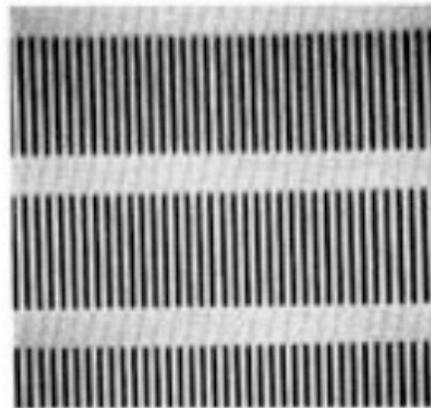
Interférences avec des atomes (2)

Interféromètre à division d'amplitude

David Pritchard – MIT (1991)



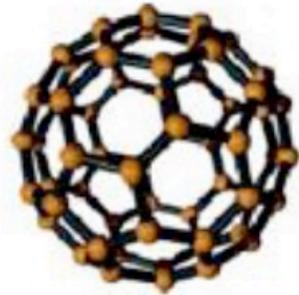
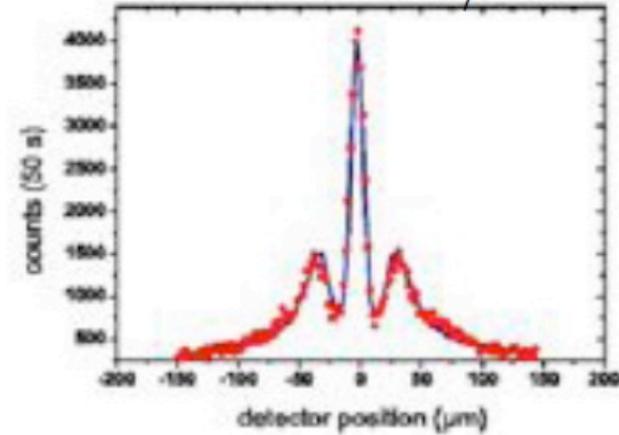
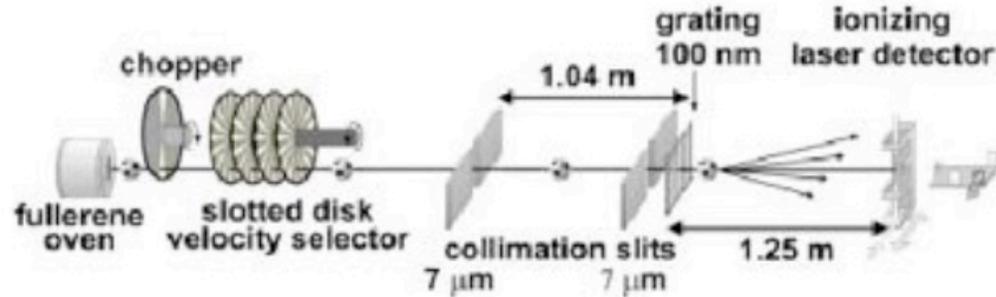
Période
200 nm



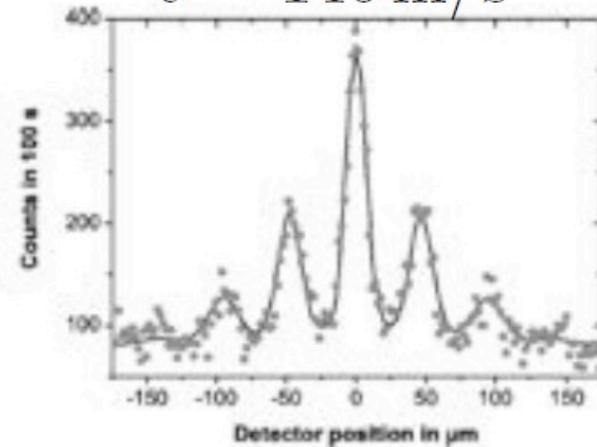
Interférences avec des “gros” objets

Anton Zeilinger & Markus Arndt – Vienne, 1991

$$v = 200 \text{ m/s}$$

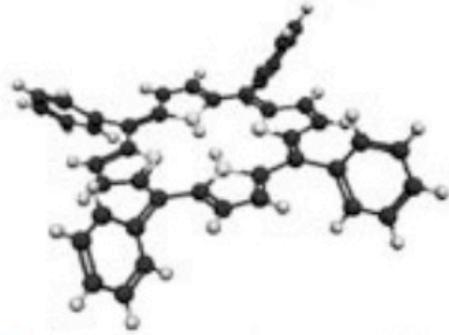


$$v = 140 \text{ m/s}$$



Interférences avec des objets devenant de plus en plus gros...

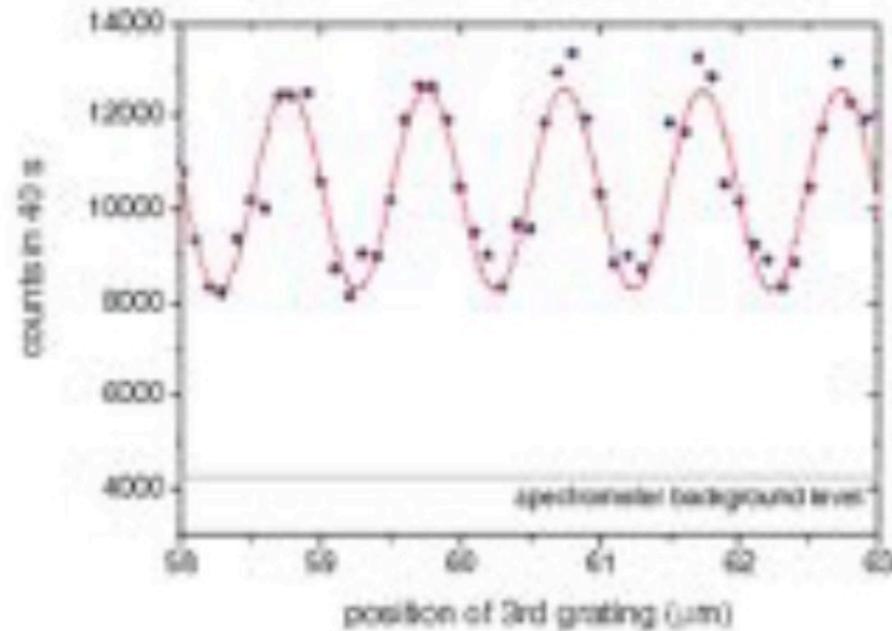
Anton Zeilinger & Markus Arndt – Vienne, 1993



Tetraphenylporphyrine
 $C_{44}H_{30}N_4$



Fluorofullérène $C_{60}F_{48}$



Conclusion:

Les phénomènes « d'interférences quantiques » ne s'arrêtent pas aux « petits objets », mais ils deviennent (sauf exception et jusqu'à preuve du contraire) de moins en moins « visibles » pour des raisons d'ordre de grandeur.

FIN-COURS 0