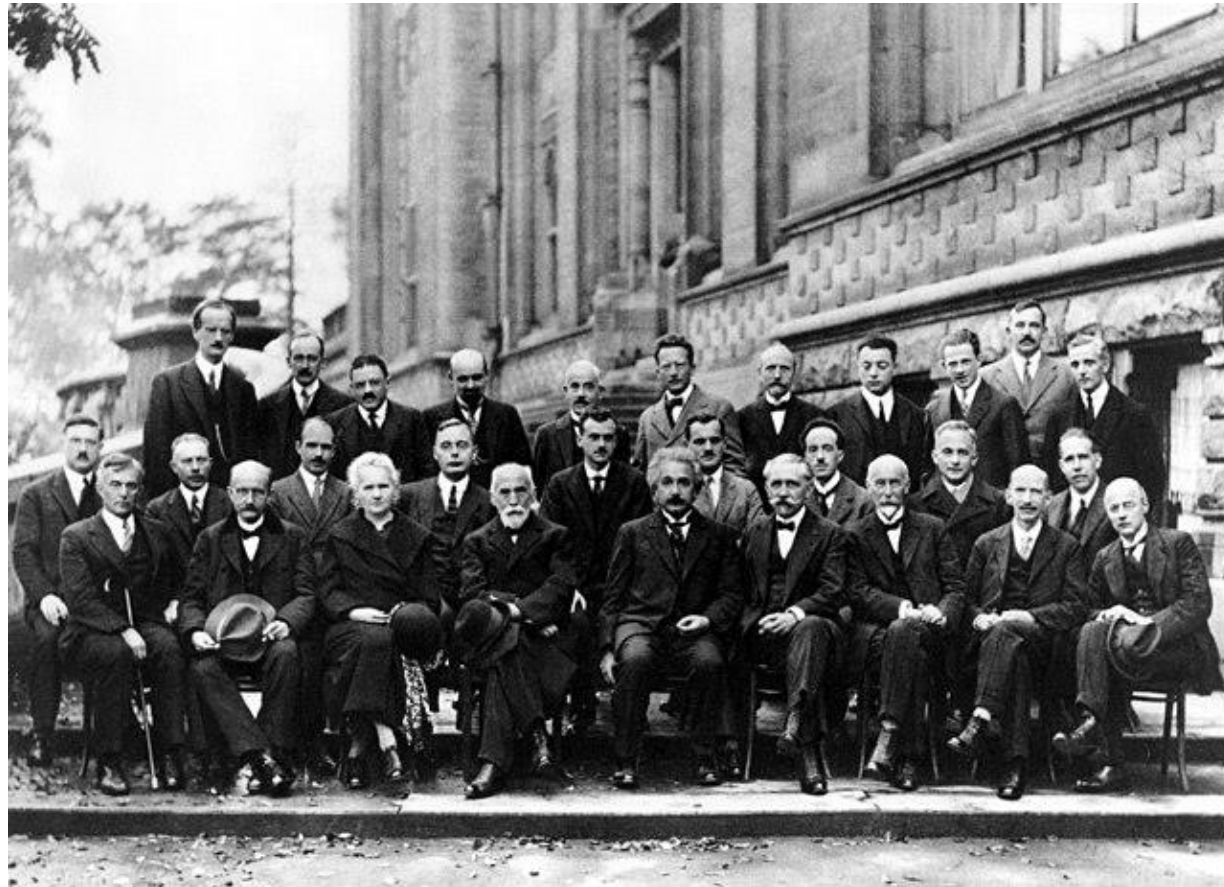


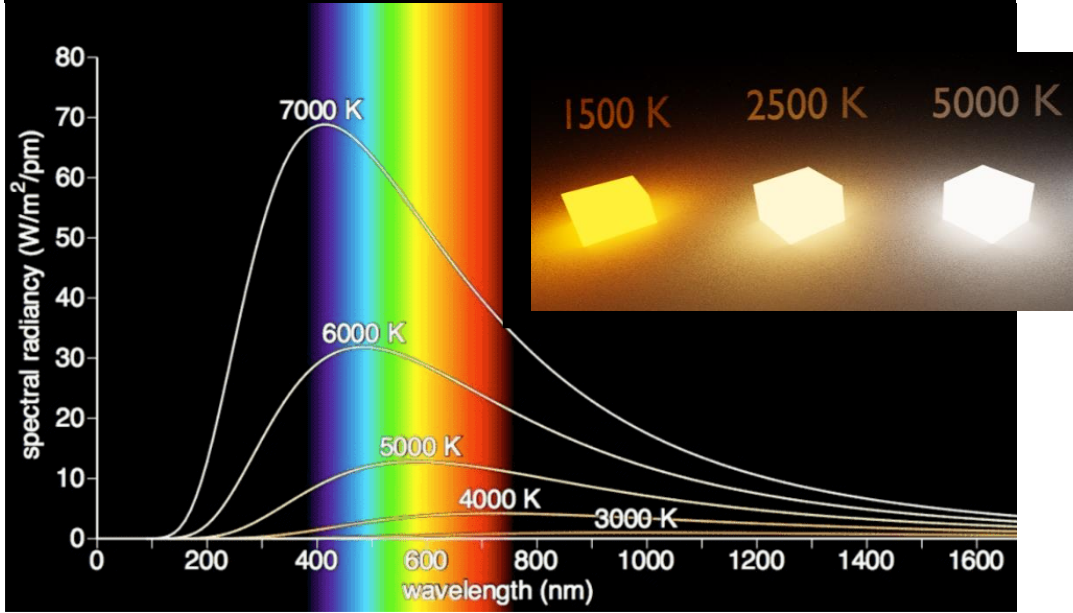
Chapitre III

La révolution du quanta

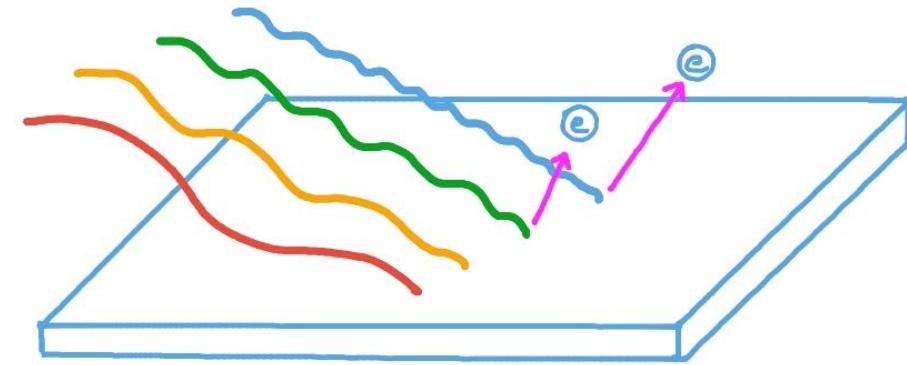


Congrès de Solvay (1927)

BLACK BODY RADIATION



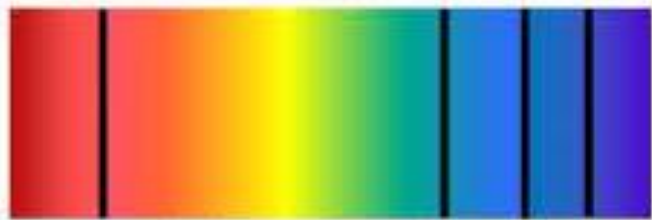
THE KINETIC ENERGY OF PHOTOELECTRONS



Dans l'épisode précédent...

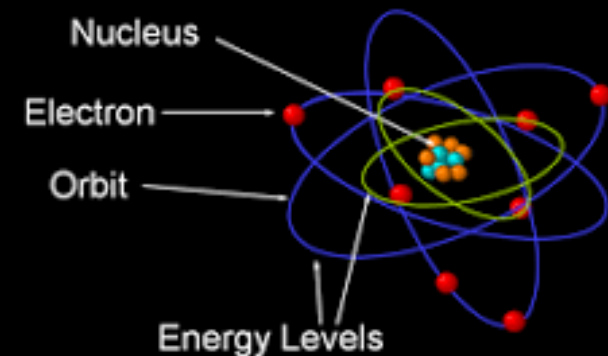


Spectre d'émission de l'hydrogène

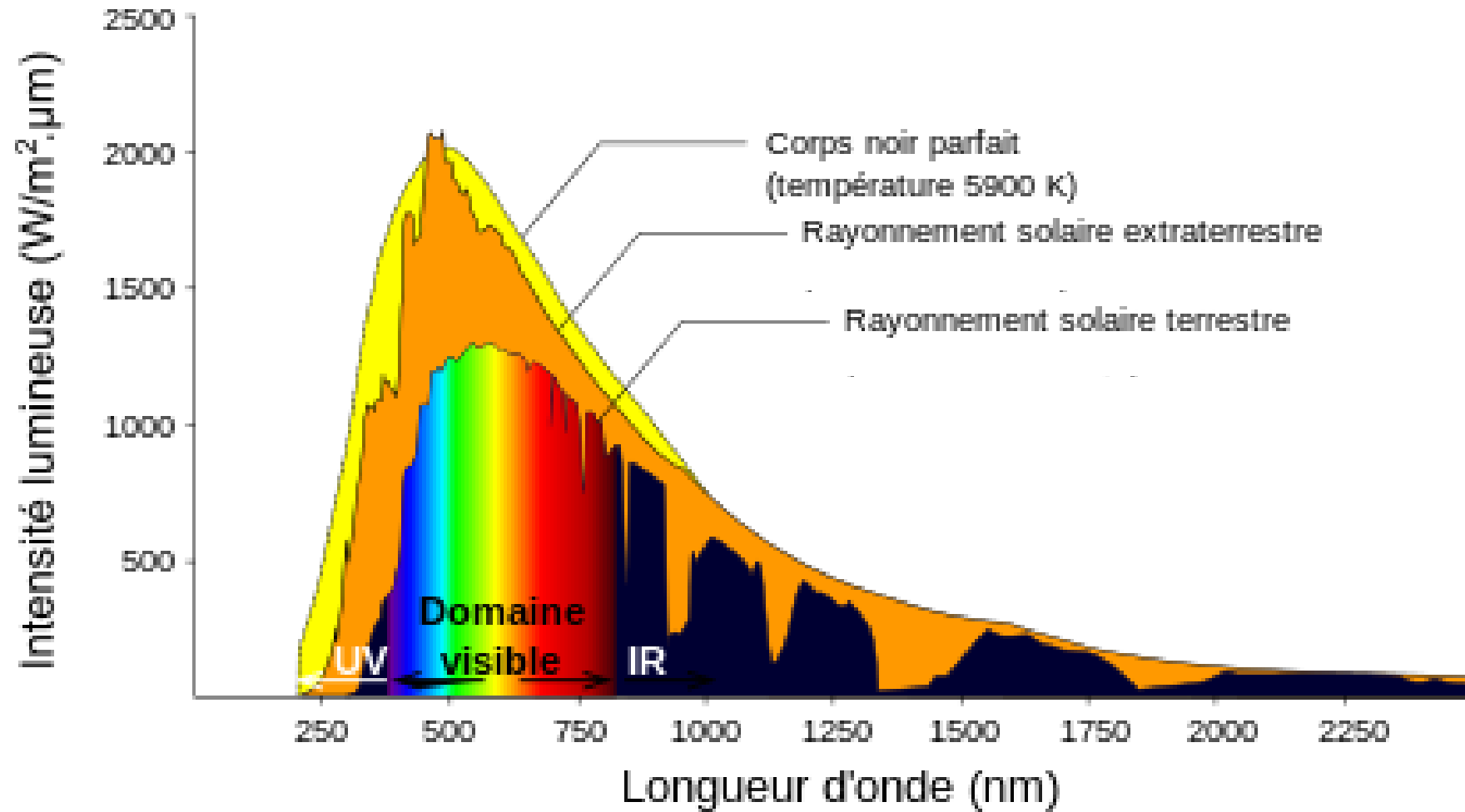


Spectre d'absorption de l'hydrogène

STABILITY OF BOHR'S ATOMIC MODEL



Comment trouver une courbe théorique qui colle à ces observations ?



III.1 La révolution quantique

A - Le quanta

Max Planck:

Before
quantum physics:

After
quantum physics:



1887

1901

Prix Nobel en 1918

- En 1900, Max Planck introduit que l'énergie lumineuse est absorbée (ou émise) sous forme d'une succession de **quanta d'énergie**.
- Ces quanta sont représentés par des **paquets d'ondes** transportant une énergie proportionnelle à la fréquence ν de l'onde qui lui est associée.

$$E = h\nu$$

L'énergie est quantifiée par paquet de $h\nu$

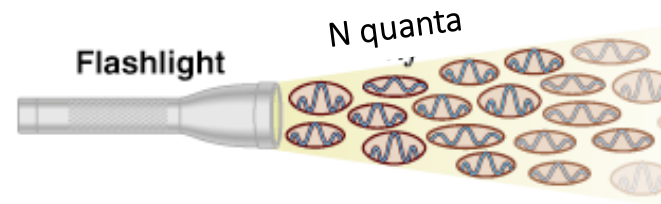
On note aussi $E = \hbar\omega$

où $\hbar = h/2\pi$ (constante de Planck réduite)

et $\omega = 2\pi\nu$ (pulsation de la lumière).

- Il introduit le quantum d'action « h » : **constante de Planck**

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{Js}$$



$$E_{tot} = N h \nu$$

Exemple un pointeur laser rouge (632 nm) de 1 mW émet environ $3 \cdot 10^{15}$ photons par seconde !

Attention à ne pas confondre
 ν ([nu]) qui symbolise ici la fréquence en s⁻¹ et
 v ([vé]) qui représente généralement la vitesse en m/s.

III.1 La révolution quantique

A - Le quanta

Max Planck:

Before
quantum physics:

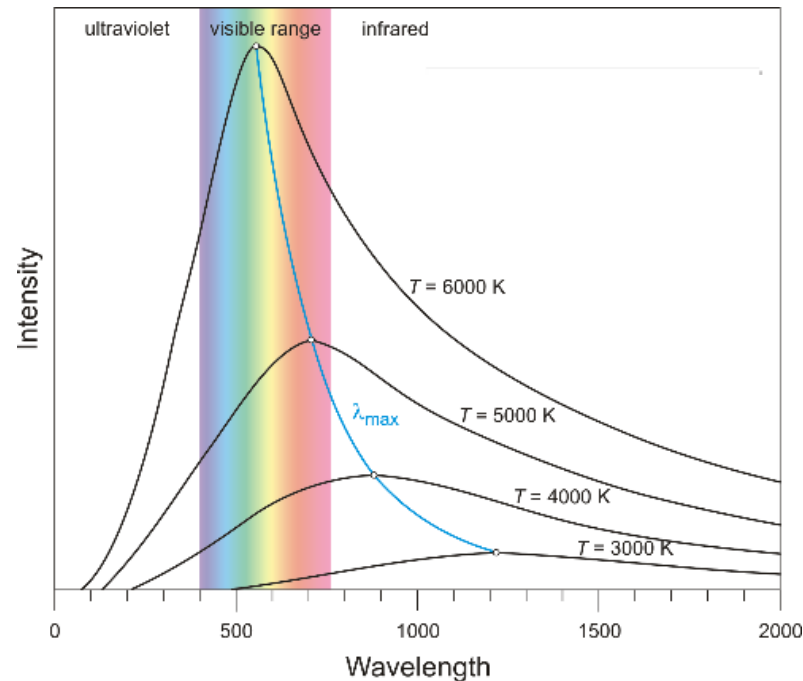
After
quantum physics:



Prix Nobel en 1918

- Pour Planck ce n'est qu'une **astuce de calcul** qui lui permet de trouver la **forme théorique de la courbe du corps noir** et la loi de Wien.

$$E(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1}$$



La couleur rayonnée ne dépend pas du matériau chauffé mais juste de sa température

III.1 La révolution quantique

B - Le photon



Prix Nobel en 1921

- En 1905, Einstein reprend l'idée du quanta de Planck (que l'on appellera **photon** en 1926) et l'utilise dans l'interaction lumière-matière pour expliquer **l'effet photoélectrique**.
- Si le photon est une **particule**, il entre en collision avec les électrons dans le métal. Si son énergie est suffisamment forte pour surpasser l'énergie de liaison de l'électron (**effet de seuil**), celui-ci sera arraché avec une certaine énergie cinétique.

$$E_{\text{cinétique de l'e}^-} = E_{\text{photon}} - E_{\text{extraction}}$$

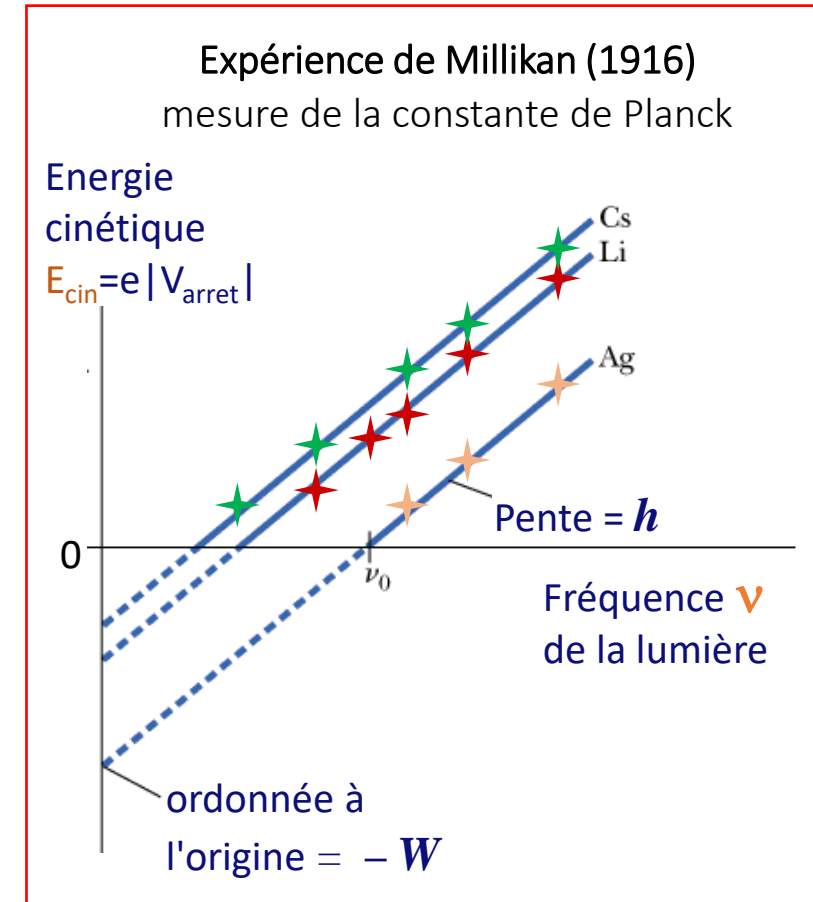
- Mais ce photon possède aussi une énergie qui d'après la formule de Planck augmente avec la fréquence de son paquet d'**onde**.

$$E_{\text{cin}} = h\nu - W$$

si $\nu > \nu_0$

W : travail d'extraction
(caractéristique du matériau)

- **Dualité onde-corpuscule** du photon



L'énergie de l'électron ne dépend que de la fréquence de la lumière et du matériau (pas de l'intensité)!

Voir TD 1

III.1 La révolution quantique

B - Le photon

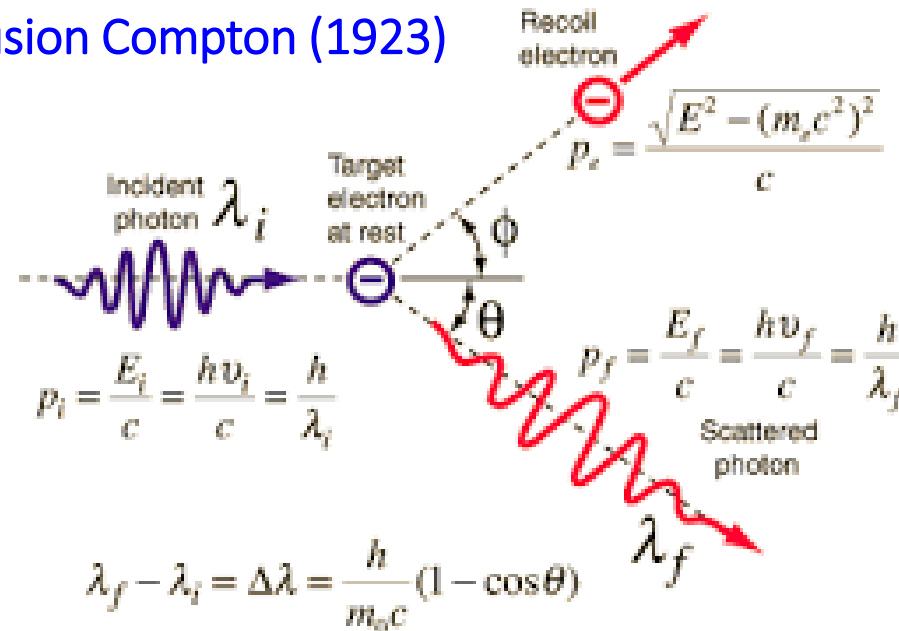


- En plus d'une énergie $E = h\nu$, ces photons sont dotés d'une **impulsion (ou quantité de mouvement)** qui est grandeur vectorielle de norme:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

En mécanique classique la quantité de mouvement est donnée par $p = mv$ mais en mécanique quantique, une particule sans masse peut également avoir une impulsion.

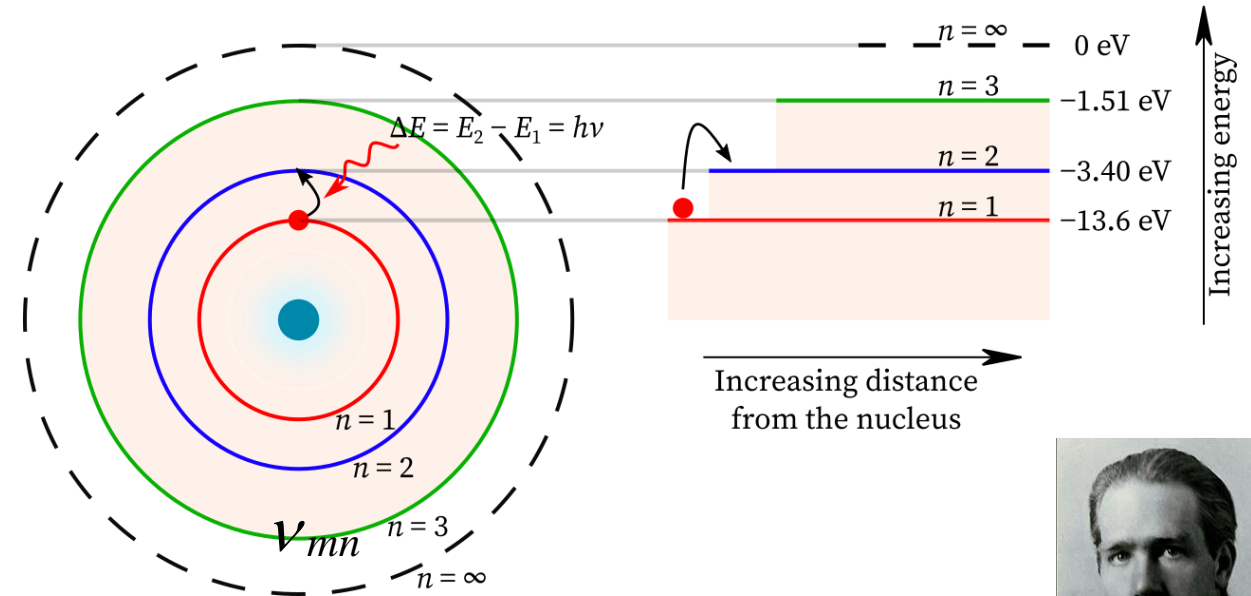
Diffusion Compton (1923)



III.1 La révolution quantique

C – L'atome de Bohr

- En 1913, Bohr reprend le modèle planétaire de Rutherford et place les électrons sur des orbites aux niveaux d'énergie discrets, **quantifiés**, pour expliquer la stabilité et l'existence des raies d'émission et d'absorption des atomes.
- Les atomes absorbent ou émettent de l'énergie en passant d'un niveau d'énergie à l'autre. Les raies spectrales proviennent de ces transitions entre niveaux d'énergie spécifiques.
- L'énergie libérée au passage d'un état excité vers un état de moindre énergie correspond à l'émission d'un photon.
- Ce modèle reste encore incomplet et sera une fois de plus perfectionné grâce à l'approche probabiliste de Schrödinger (voir chapitre IV)



Prix Nobel en 1922



Raies spectrales

=

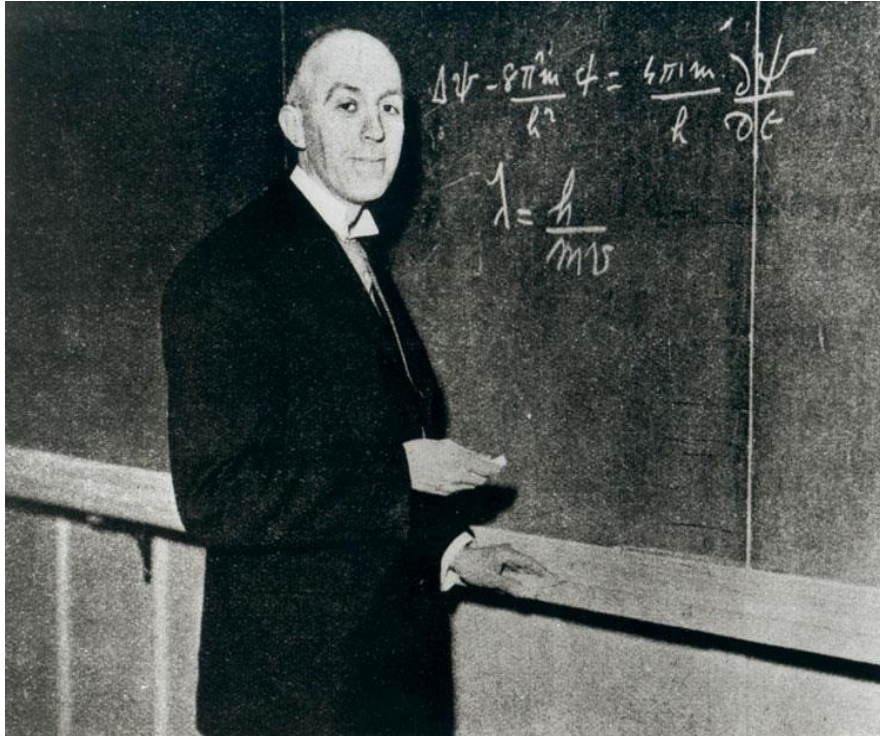
photons de fréquences ν_{mn} d'énergie $h\nu_{mn}$

$$h\nu_{mn} = |E_m - E_n|$$

où E_m et E_n sont des énergies possibles pour un électron dans l'atome.

III.1 La révolution quantique

D – Dualité onde-corpuscule



Prix Nobel en 1929

- Puisque la lumière que l'on prenait pour une onde est aussi une particule, pourquoi les particules connues n'auraient-elles pas des comportements d'onde ?
- En 1923 **Louis de Broglie** généralise cette dualité onde-corpuscule qui **associe une onde à toute particule**.
- Toute particule « matérielle » de masse m ayant une vitesse v , on associe une onde dont le vecteur d'onde k est défini par:

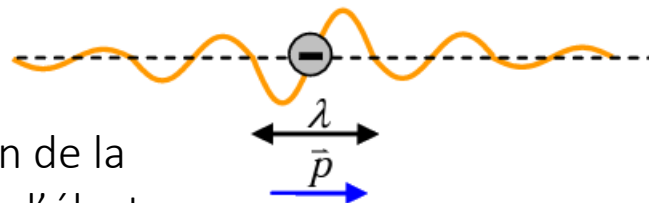
$$\vec{k} = \frac{\vec{p}}{h}$$

- Soit une longueur d'onde

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

Relation de De Broglie

Tentative de représentation de la dualité onde corpuscule de l'électron



III.1 La révolution quantique

D – Dualité onde-corpuscule

Quelques exemples

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{Js}$$

- Un étudiant pressé !

$$m = 70 \text{ kg}$$

$$v = 30 \text{ km/h} = 8 \text{ m/s}$$

$$\lambda = 1,2 \cdot 10^{-36} \text{ m} \rightarrow \text{pas de diffraction au passage de porte}$$

- Un atome « froid »

$$m = 1,7 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

$$v = 2 \text{ m/s}$$

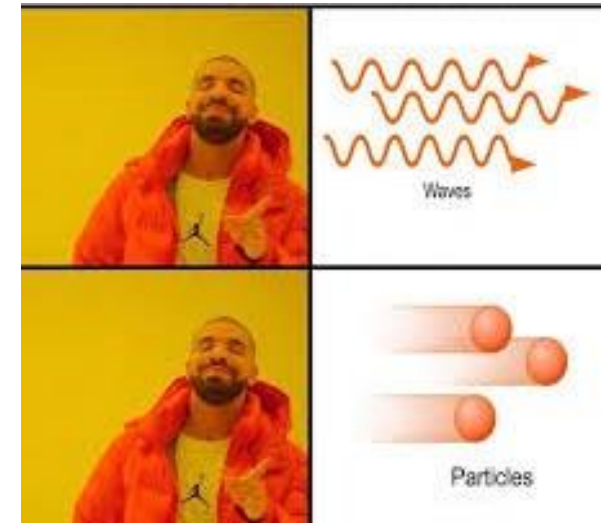
$$\lambda = 20 \text{ nm} \rightarrow \text{expérience des fentes d'Young (1992)}$$

- Un électron

$$m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$v = 6 \cdot 10^6 \text{ m/s} \text{ (accéléré sous un potentiel de 100V)}$$

$$\lambda = 0,12 \text{ nm} \rightarrow \text{Microscope électronique (1932) !}$$

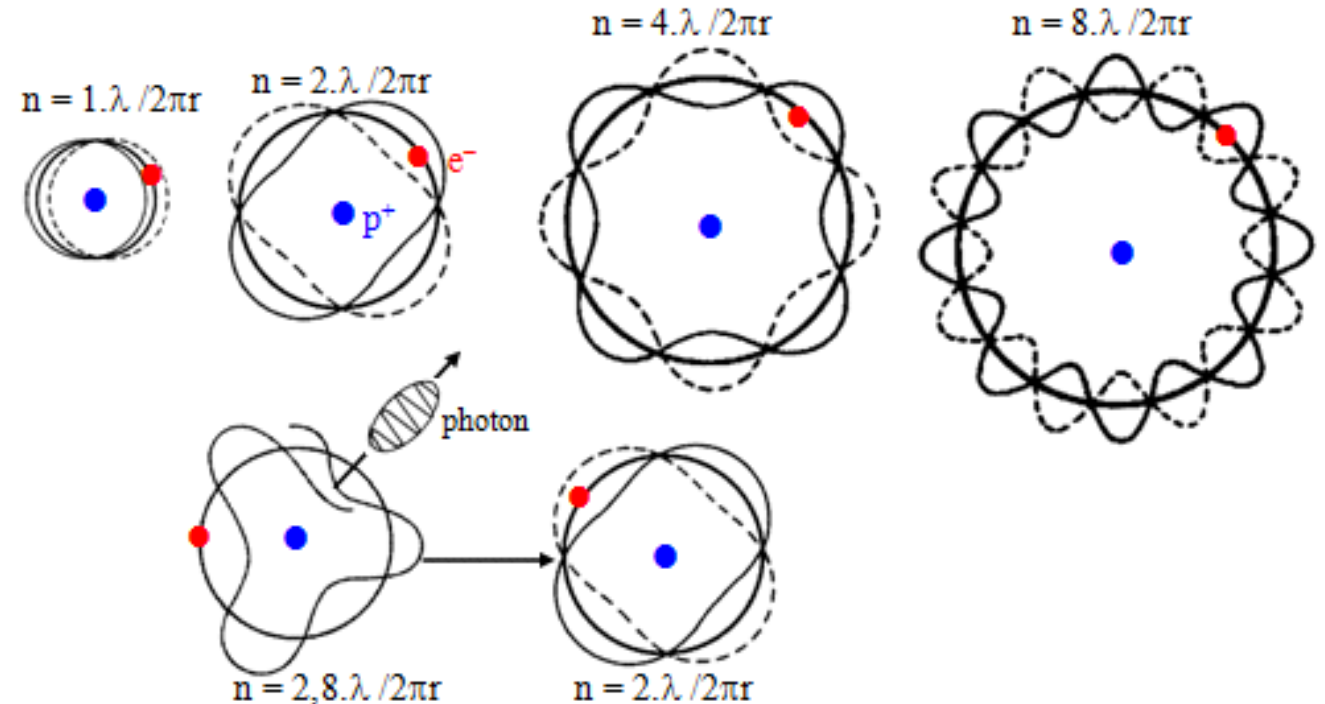


III.1 La révolution quantique

D – Dualité onde-corpuscule

Modèle atomique de De Broglie

- Il est possible de parfaire le modèle atomique de Bohr en y ajoutant le caractère ondulatoire de l'électron.
- Dans ce modèle, l'électron doit justifier d'un **nombre entier de longueur d'onde pour être sur une orbite stable**, sinon il émet un photon.
- Mais ce modèle sera très rapidement remplacé par le modèle de Schrödinger



III.2 Le paquet d'onde

A – Superposition d'ondes planes

On l'a vu, une onde plane s'exprime sous la forme:

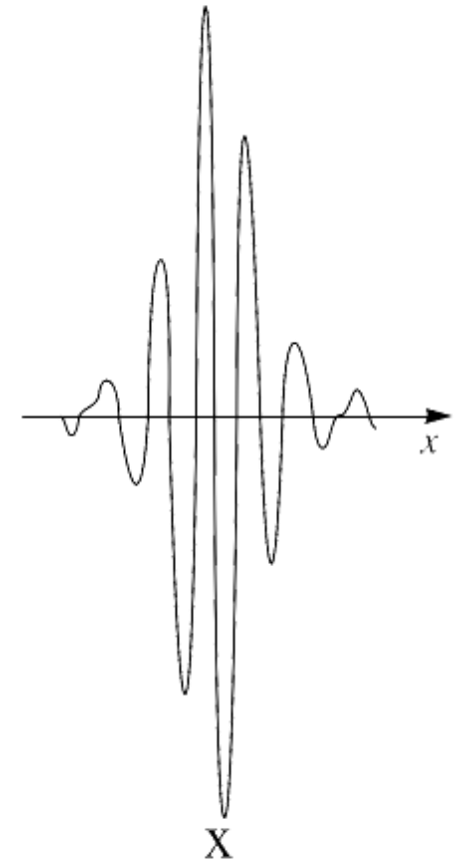
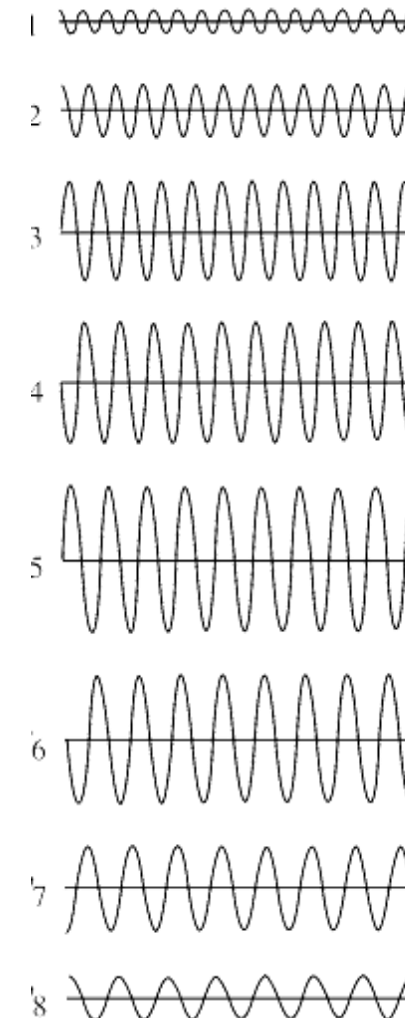
$$u(\vec{r}, t) = U_0 \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)]$$

Un paquet d'onde est donc une superposition linéaire d'ondes planes de la forme (synthèse de Fourier)

$$u(\vec{r}, t) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^3 \int f(\vec{k}) \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)] d\vec{k}$$

Un paquet d'onde a une distribution spatiale étroite et a donc les caractéristiques à la fois d'une onde et d'une particule.

$$f(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} A(k) e^{i(kx - \omega(k)t)} dk.$$



III.2 Le paquet d'onde

B – Relation d'incertitude d'Heisenberg

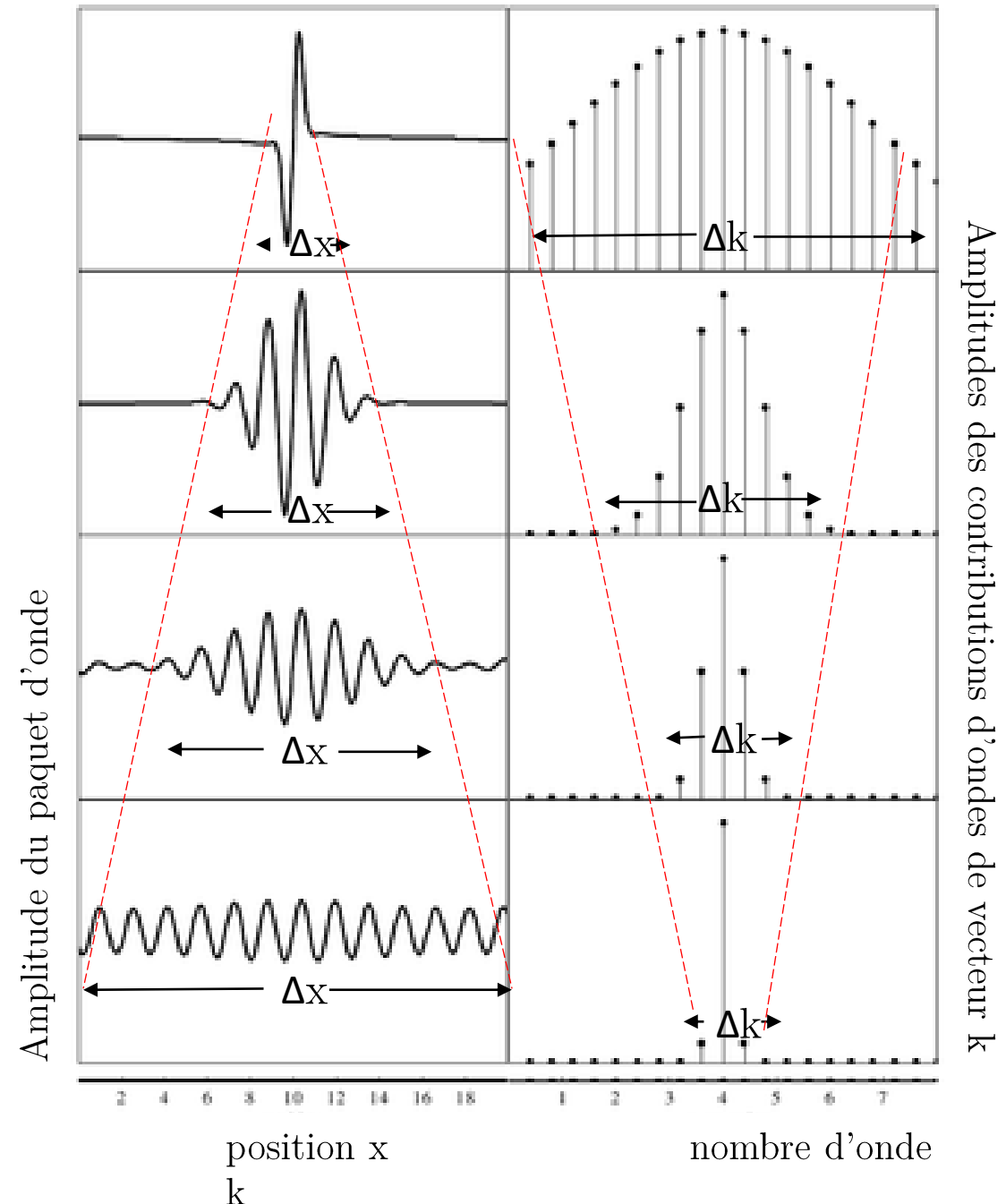
Plus on rajoute d'onde de vecteurs d'onde k plus la distribution Δk est grande mais plus la distribution spatiale Δx est petite.

Et moins on superpose d'onde, plus le paquet d'onde est grand.

→ on retrouve la relation d'incertitude d'Heisenberg

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$\text{avec } \mathbf{p} = \frac{\hbar \mathbf{k}}{2\pi}$$

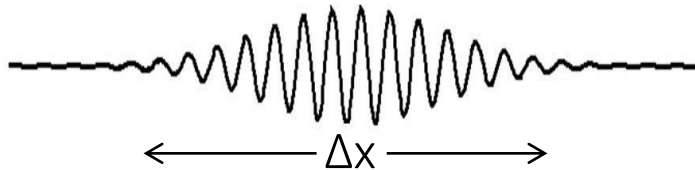


III.2 Le paquet d'onde

B – Relation d'incertitude d'Heisenberg

Les relations d'Heisenberg montrent que :

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar$$



De même il existe une relation entre temps et énergie

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar$$

ce temps n'est pas la durée de vie de la particule, mais la durée de vie du niveau excité.

- Il est impossible de connaître avec précision la position et la vitesse d'une particule quantique.
- Si vous mesurez la position d'une particule vous perturbez son impulsion

Il ne s'agit pas d'un problème de mesure expérimentale !

Cette inégalité montre qu'un état quantique ne donne pas une connaissance parfaite de cet état du point de vue classique.

La notion de trajectoire disparaît en mécanique quantique.

Désintégration nucléaire

Particules virtuelles

Fluctuations quantique du vide

Effet Casimir

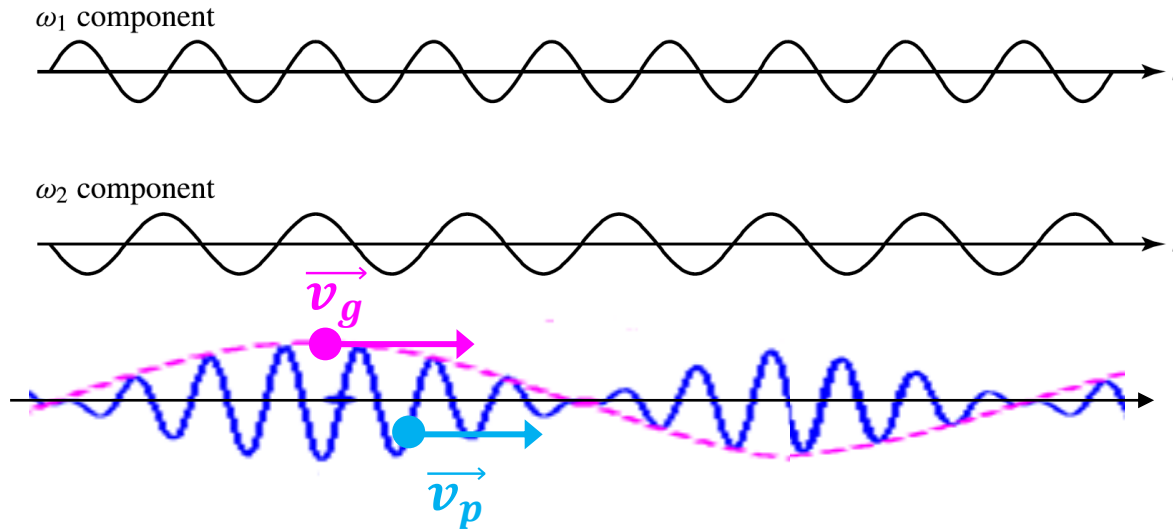
Problème de compatibilité avec la relativité générale...

Prix Nobel en 1932



III.2 Le paquet d'onde

C – Vitesse de groupe/vitesse de phase



Si l'on additionne 2 ondes de pulsations voisines ω_1 et ω_2
leur somme :

$$A \cos(k_1 x - \omega_1 t) + A \cos(k_2 x - \omega_2 t)$$

s'écrit sous la forme :

$$\underbrace{2A \cos(k_{env} x - \omega_{env} t)}_{\text{enveloppe}} \underbrace{\cos(\bar{k} x - \bar{\omega} t)}_{\text{Oscillations moyennes}}$$

$$k_{env} = \frac{k_1 - k_2}{2}$$

$$\bar{k} = \frac{k_1 + k_2}{2}$$

$$\omega_{env} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2}$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

$$v_g = \frac{\omega_{env}}{k_{env}} = \frac{d\omega}{dk}$$

Vitesse de
groupe
=
Vitesse du
paquet d'onde

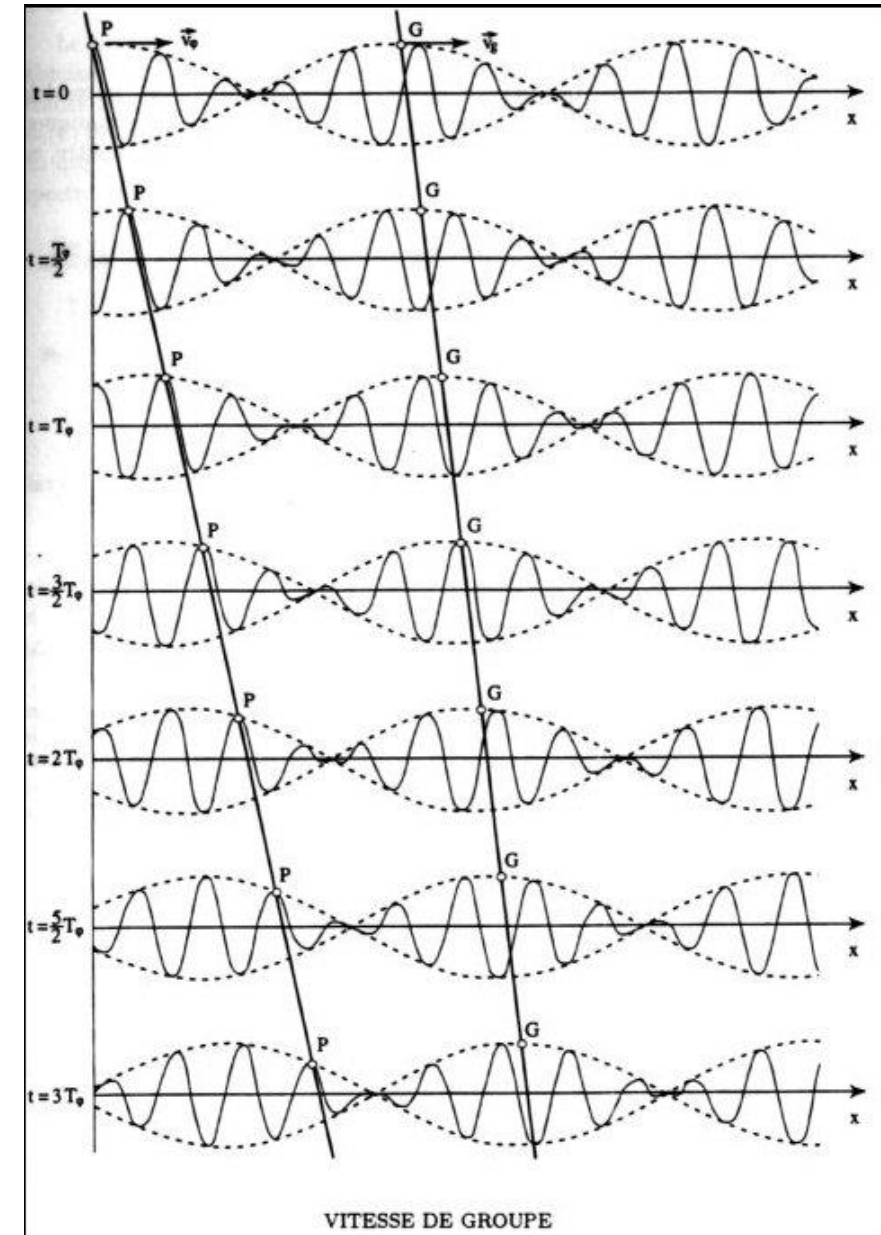
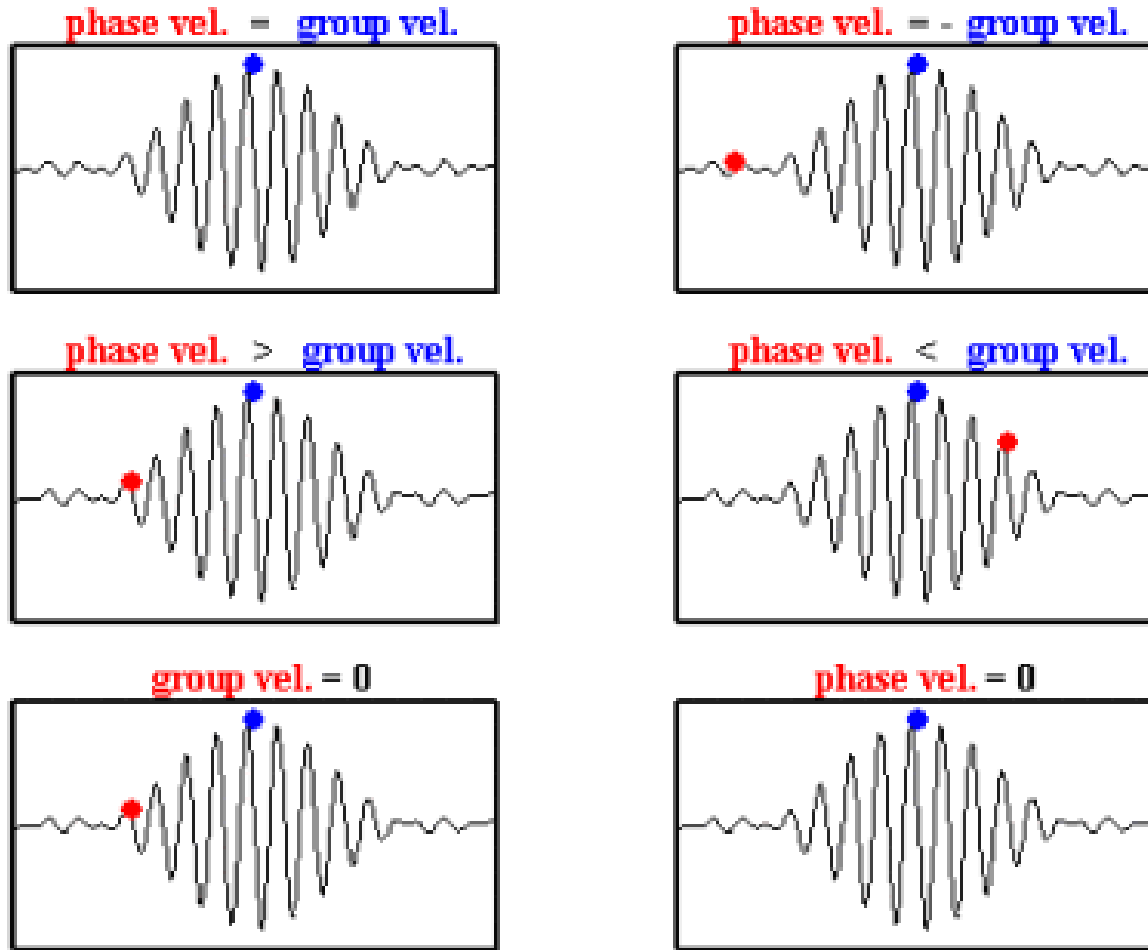
$$v_p = \frac{\bar{\omega}}{\bar{k}}$$

Vitesse de
phase

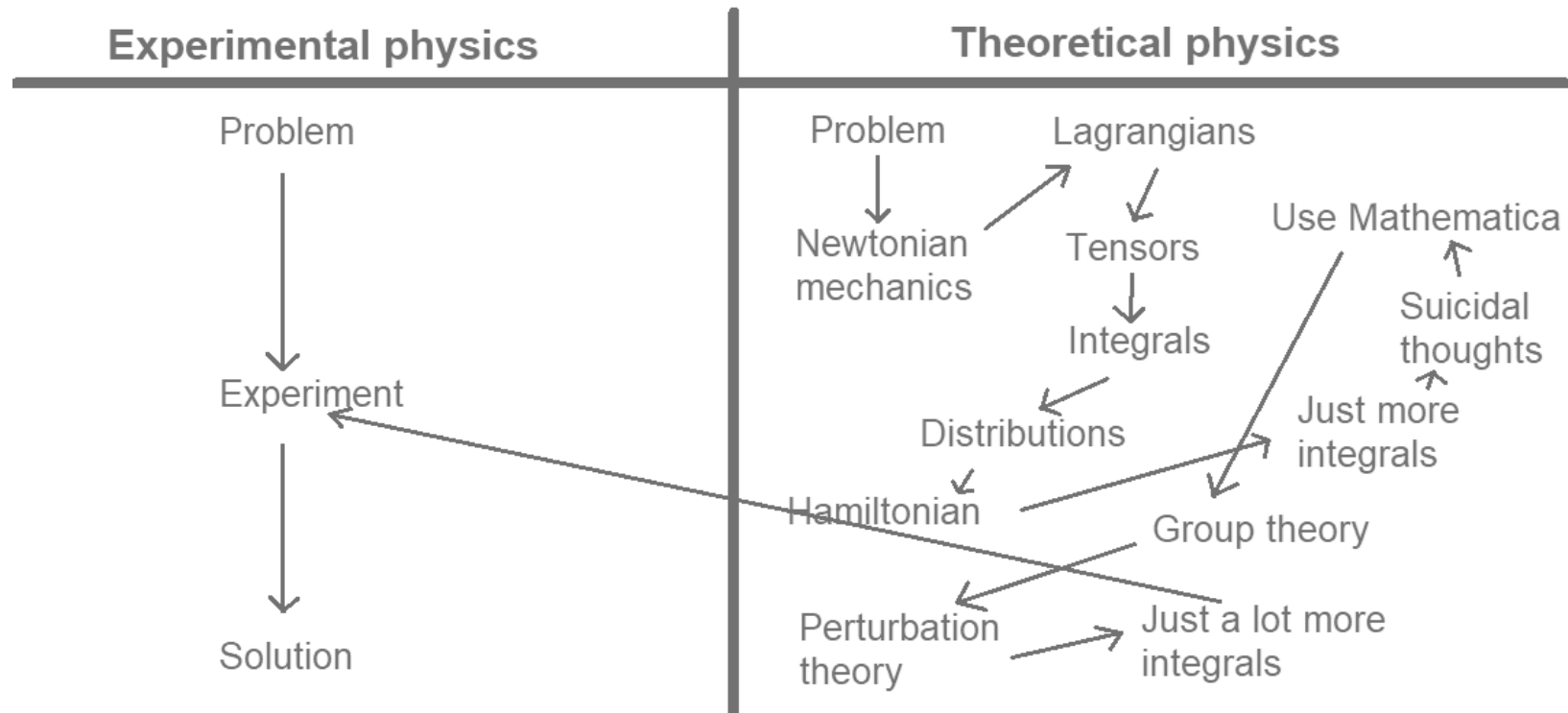
III.2 Le paquet d'onde

Illustration de la différence entre la vitesse de phase et la vitesse de groupe

C – Vitesse de groupe/vitesse de phase



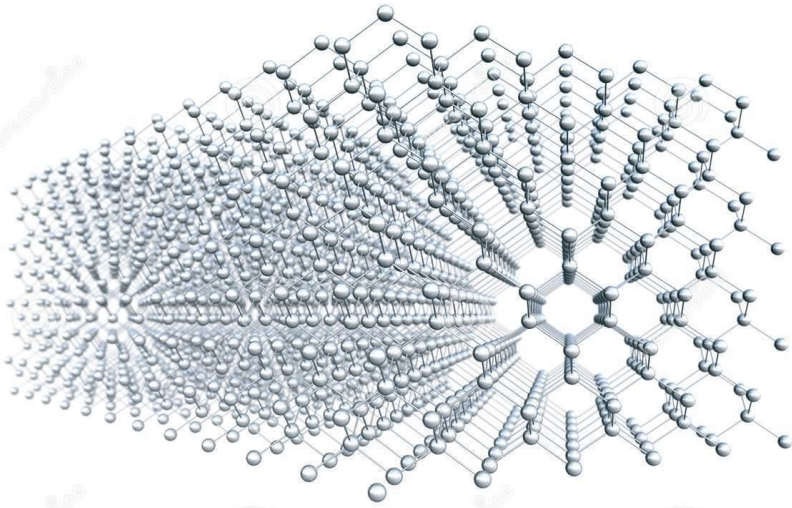
Quelles preuves expérimentales de cette dualité?



III.2 Premières preuves expérimentales

A – Rappel - Diffraction de la lumière

Rappelez-vous quand une onde arrive sur un obstacle, une fente ou une série fente (réseaux), elle diffracte, crée plein d'ondelettes qui peuvent interférer constructivement ou destructivement .



Un cristal est un arrangement régulier d'atomes, séparés de manière périodique par du vide.

Que se passe-t-il si on envoie de la lumière sur un cristal ?

Cristallographie et réseau réciproque

III.2 Premières preuves expérimentales

B - Diffraction des électrons (Davisson et Germer 1927)

- Les ondes associées à des électrons doivent pouvoir interférer, mais il faut des fentes très rapprochées (quelques angströms) !
- Davisson et Germer utilisent les structures cristallines pour leurs expériences de diffraction électronique



Prix Nobel en 1937

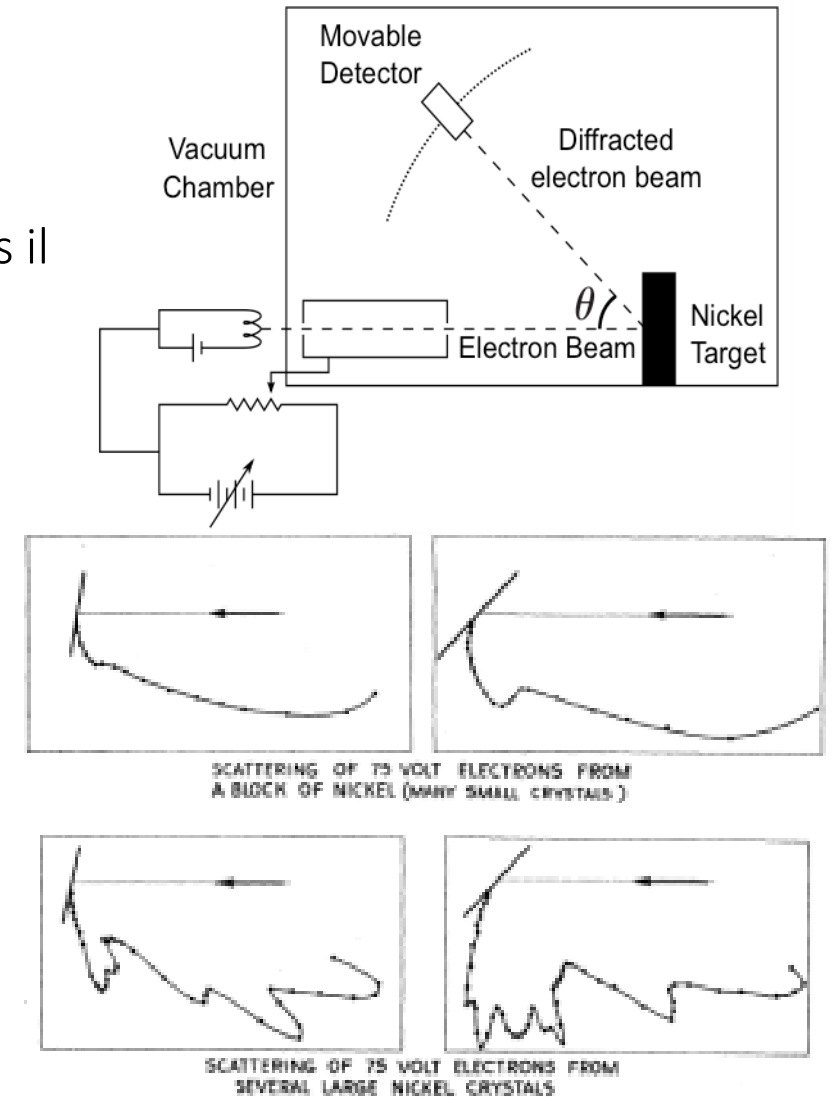
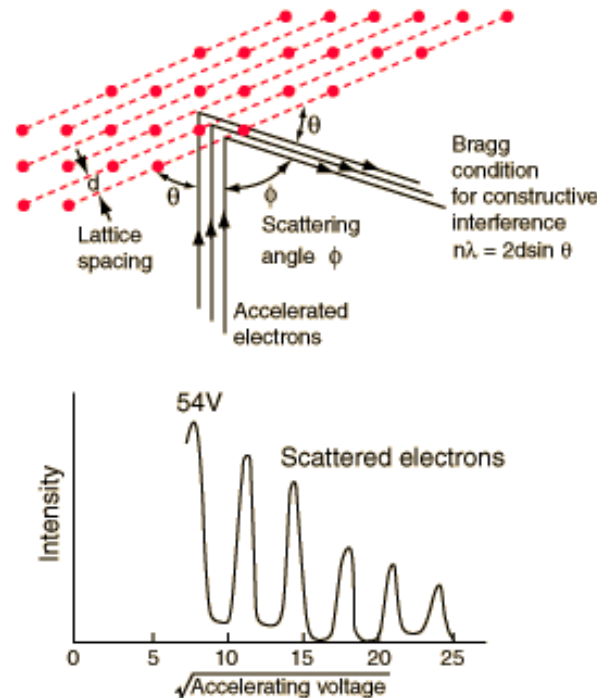
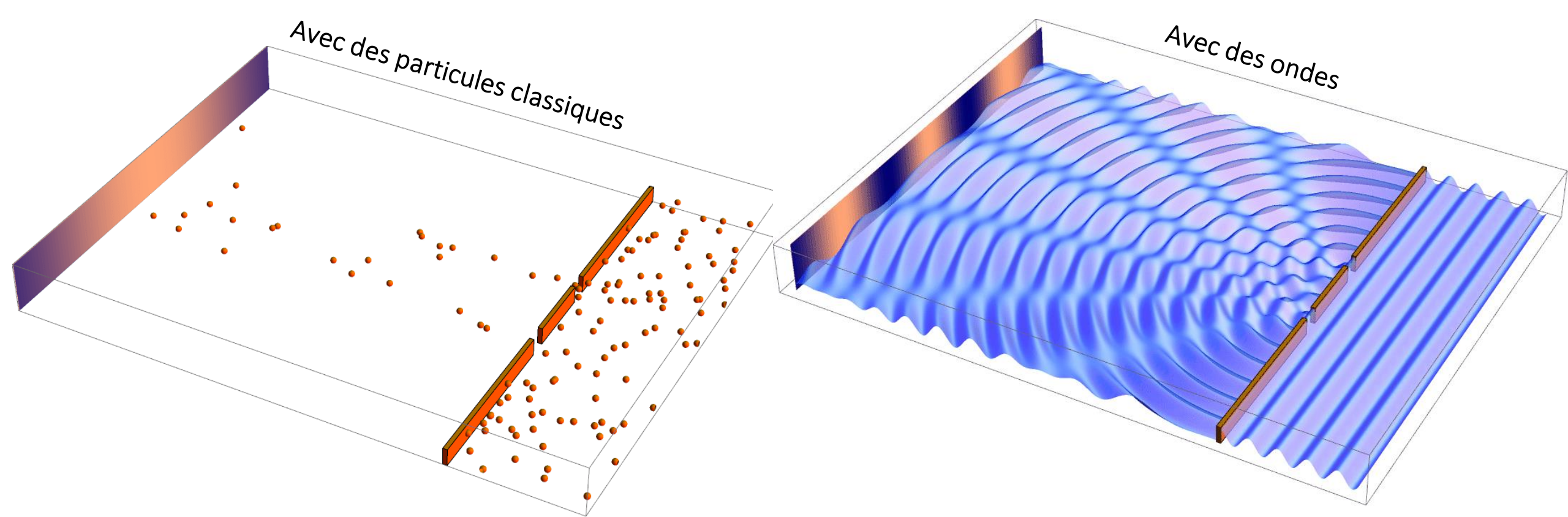


Fig. 1. Scattering curves from nickel before and after crystal growth had occurred.

III.2 Preuves expérimentales

C - Expérience des fentes d'Young



<https://www.youtube.com/watch?v=zPolTpOddRg>

www.youtube.com/watch?v=JlsPC2BW_UI&t=110s&ab_channel=vulgarisation

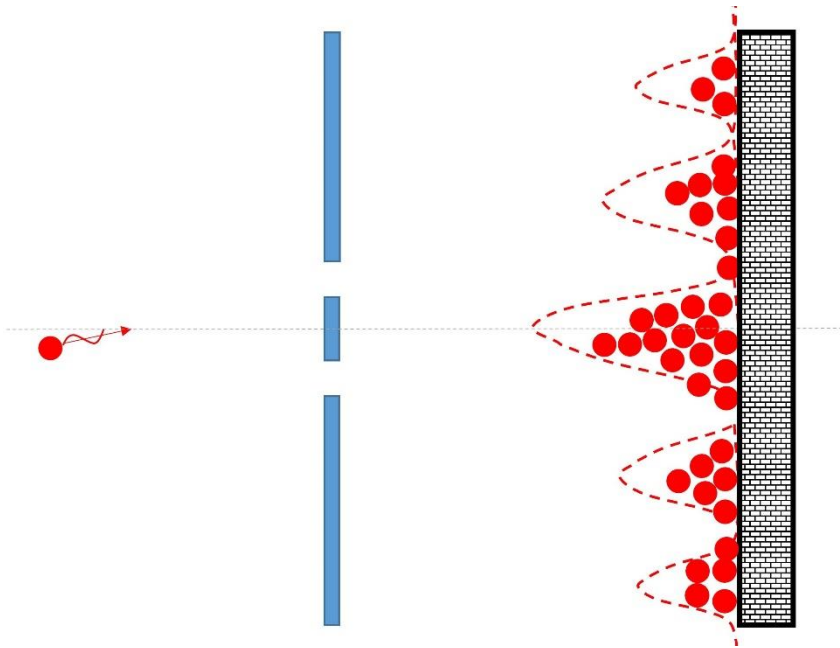
www.youtube.com/watch?v=p-MNSLsjjdo&ab_channel=PBSSpaceTime



III.2 Preuves expérimentales

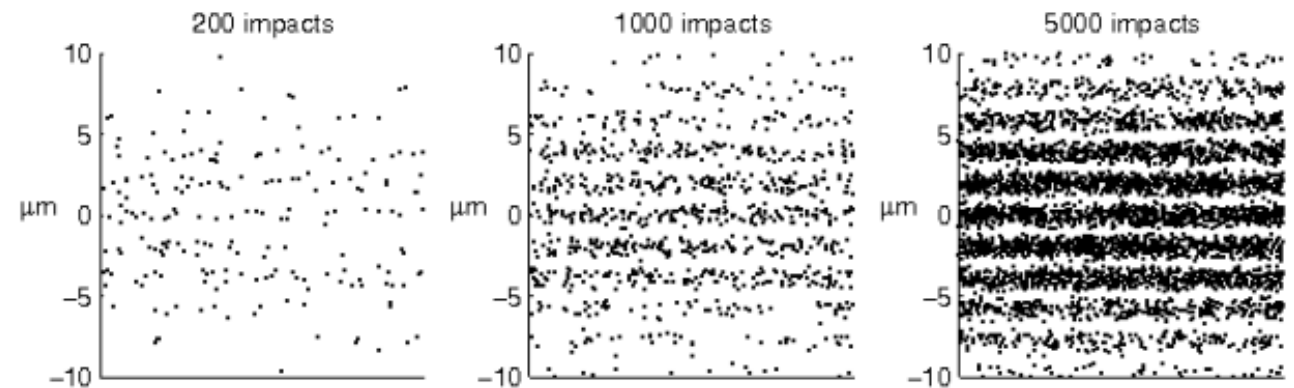
C - Expérience des fentes d'Young

Avec des particules quantiques



- Un flux de particules (photons, électrons, atomes...) peut être envoyé **un par un** sur double fente ($d \approx \lambda$).

→ schéma d'interférence !!



<https://www.youtube.com/watch?v=zPolTpOddRg>

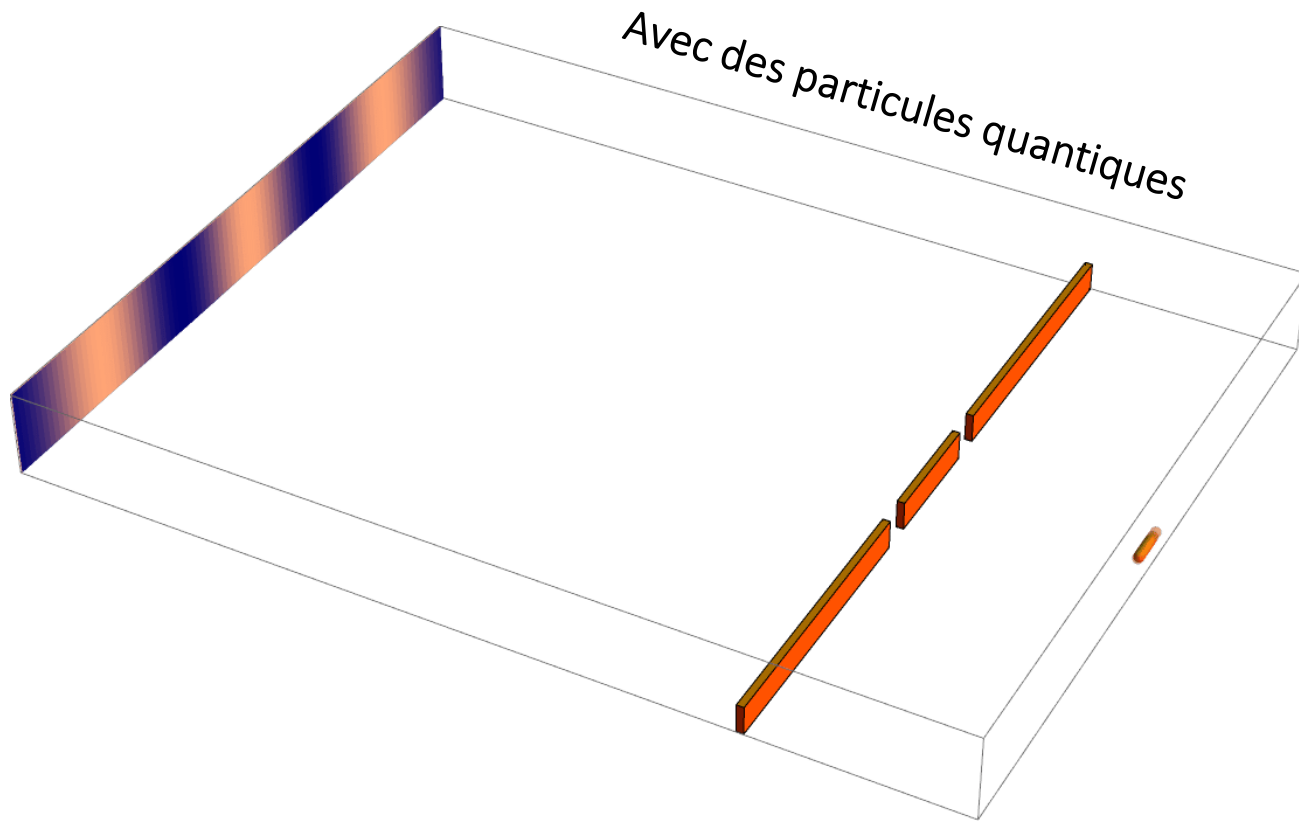
www.youtube.com/watch?v=JlsPC2BW_UI&t=110s&ab_channel=vulgarisation

www.youtube.com/watch?v=p-MNSLsjdo&ab_channel=PBSSpaceTime



III.2 Preuves expérimentales

C - Expérience des fentes d'Young



- Comme si la particule interférait avec elle-même... en passant par les deux fentes simultanément!

« ... a phenomenon which is impossible, absolutely impossible, to explain in any classical law, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality it contains the only mystery. »

R.P. Feynman

<https://www.youtube.com/watch?v=zPolTpOddRg>

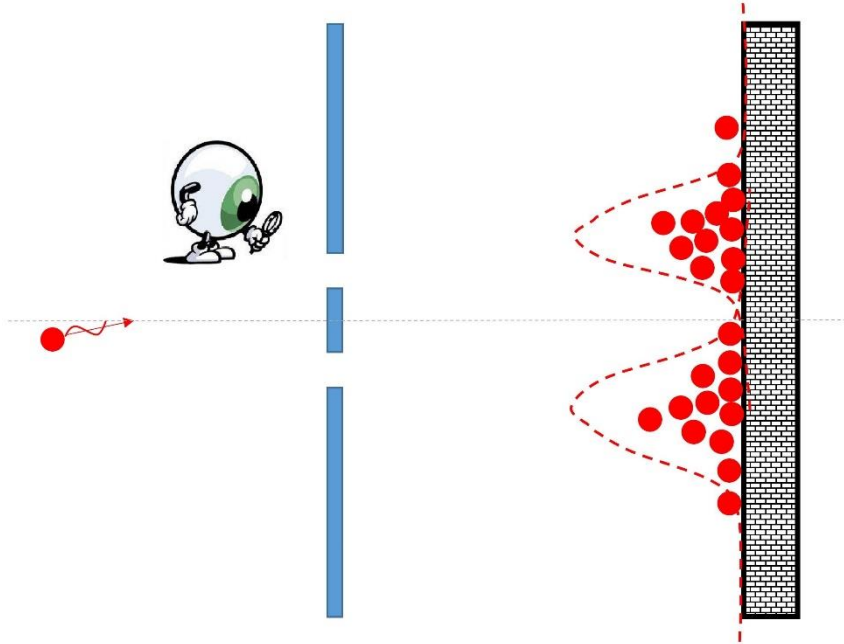
www.youtube.com/watch?v=JlsPC2BW_UI&t=110s&ab_channel=vulgarisation

www.youtube.com/watch?v=p-MNSLsjjdo&ab_channel=PBSSpaceTime

Mais il y a encore plus bizarre...

III.2 Preuves expérimentales

C - Expérience des fentes d'Young

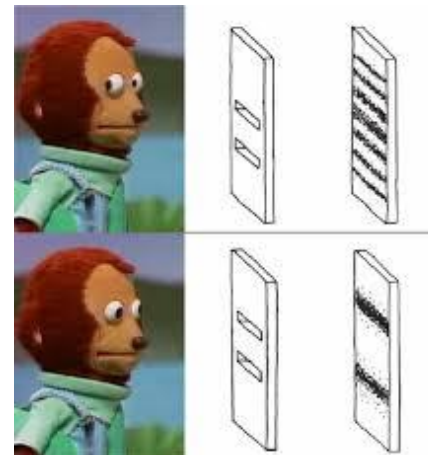


- Si on place un appareil de mesure pour savoir par quelle fente passe réellement l'électron:

→ L'interférence disparaît !!

- La particule se comporte comme une particule ponctuelle en passant par une seule fente à la fois.
- Le caractère quantique est détruit par l'acte de mesure.

→ C'est ce qu'on appelle la décohérence



Principe de complémentarité
(Bohr, 1924):

Les aspects ondulatoires et
particulaires d'une entité
quantique ne se manifestent
jamais simultanément

DUALITÉ ONDE-PARTICULE

Toutes les animations et explications sur
www.toutestquantique.fr

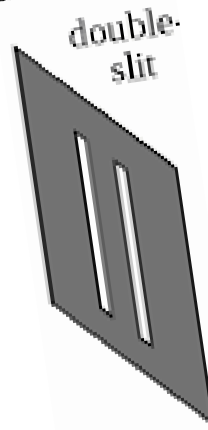
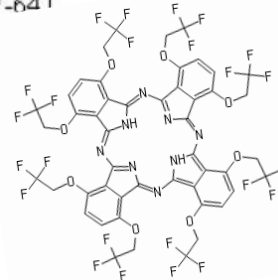
<https://toutestquantique.fr/dualite/>

III.2 Preuves expérimentales

C - Expérience des fentes d'Young

- Performed with a light source so faint that only one photon exists in the apparatus at any one time
G I Taylor 1909 *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society* **15** 114-115
- Performed with electrons
C Jönsson 1961 *Zeitschrift für Physik* **161** 454-474,
(translated 1974 *American Journal of Physics* **42** 4-11)
- Performed with single electrons
A Tonomura *et al.* 1989 *American Journal of Physics* **57** 117-120
- Performed with neutrons
A Zeilinger *et al.* 1988 *Reviews of Modern Physics* **60** 1067-1073
- Performed with He atoms
O Carnal and J Mlynek 1991 *Physical Review Letters* **66** 2689-2692
- Performed with C₆₀ molecules
M Arndt *et al.* 1999 *Nature* **401** 680-682
- Performed with C₇₀ molecules showing reduction in fringe visibility as temperature rises and the molecules "give away" their position by emitting photons
L. Hackermüller *et al.* 2004 *Nature* **427** 711-714
- Performed with Na Bose-Einstein Condensates
M R Andrews *et al.* 1997 *Science* **275** 637-641

- Performed with C₄₈H₂₆F₂₄N₈O₈



T. Juffmann *et al.*, Real-time single-molecule imaging of quantum interference, *Nat. Nanotechnology* **7**, 297-300, (2012).



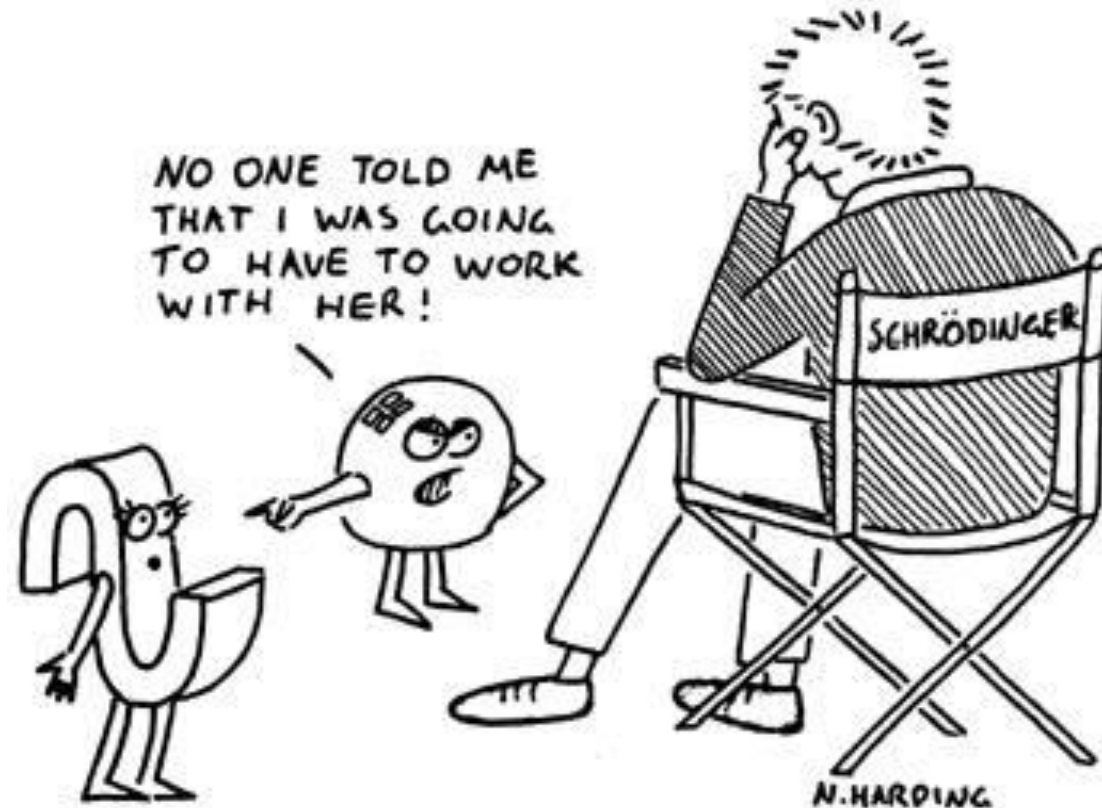
Preuve que tous les objets sont aussi des ondes, qu'ils peuvent occuper tout l'espace et passer au travers de deux fentes simultanément !

« Ces cinquante ans de rumination consciente ne m'ont pas rapproché de la réponse à la question 'que sont les quanta lumineux?' Aujourd'hui le premier fripon venu croit qu'il sait ce qu'ils sont, mais il se leurre. »

Lettre d'Einstein à Michele Besso du 12 décembre 1951

Une onde...

Mais une onde de quoi?

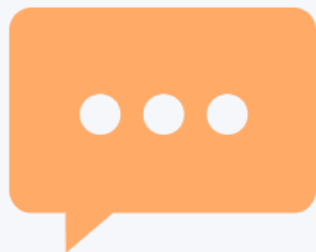




WEB

Comment participer ?

- 1 Connectez-vous sur www.wooclap.com/GPOBYE
- 2 Vous pouvez participer



SMS

- 1 Pas encore connecté ? Envoyez **@GPOBYE** au **06 44 60 96 62**
- 2 Vous pouvez participer

Testez vos
connaissances

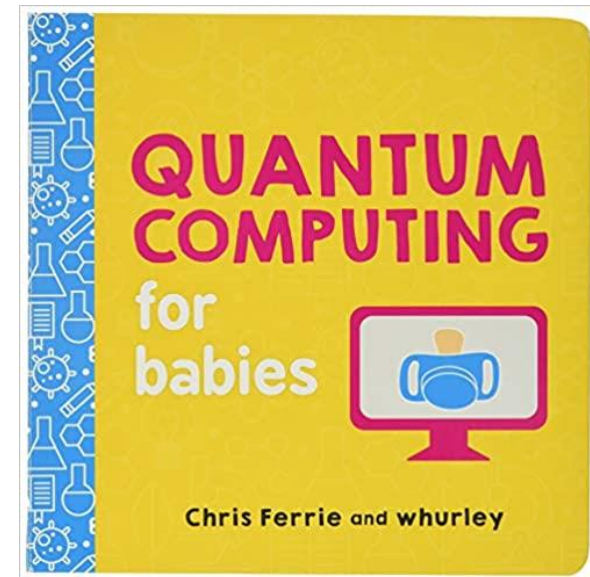
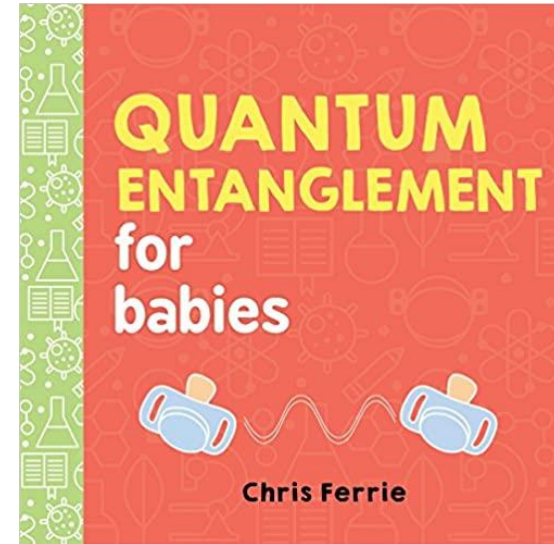


<https://bit.ly/38EQaNS>

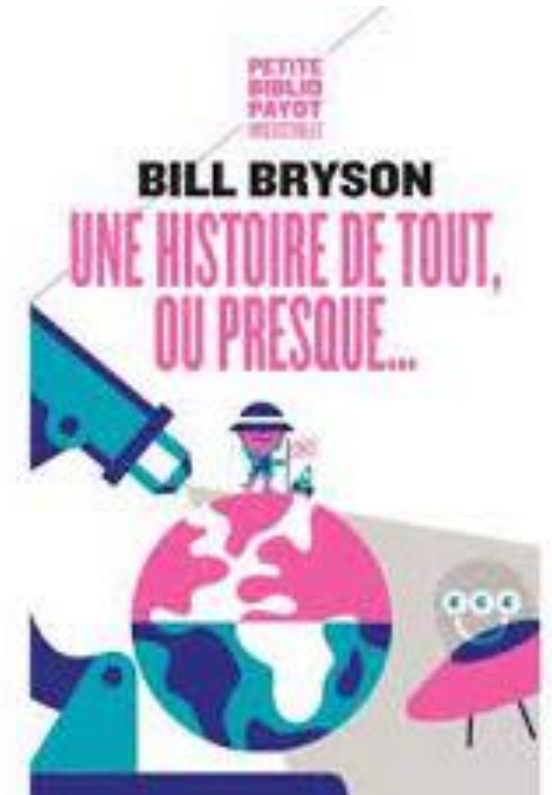
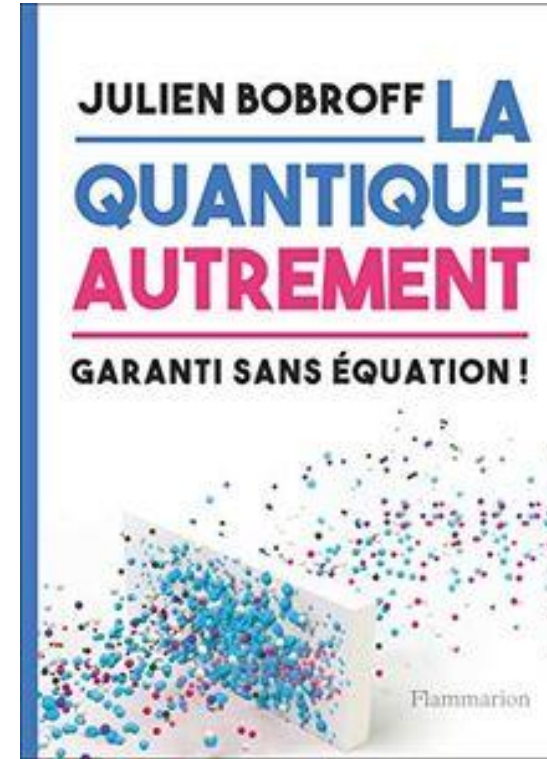
Niveau -100



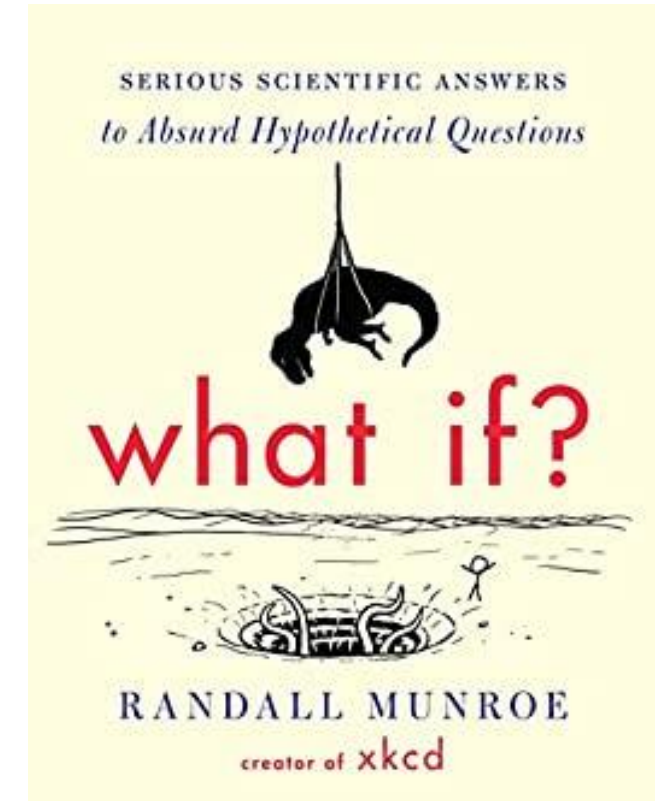
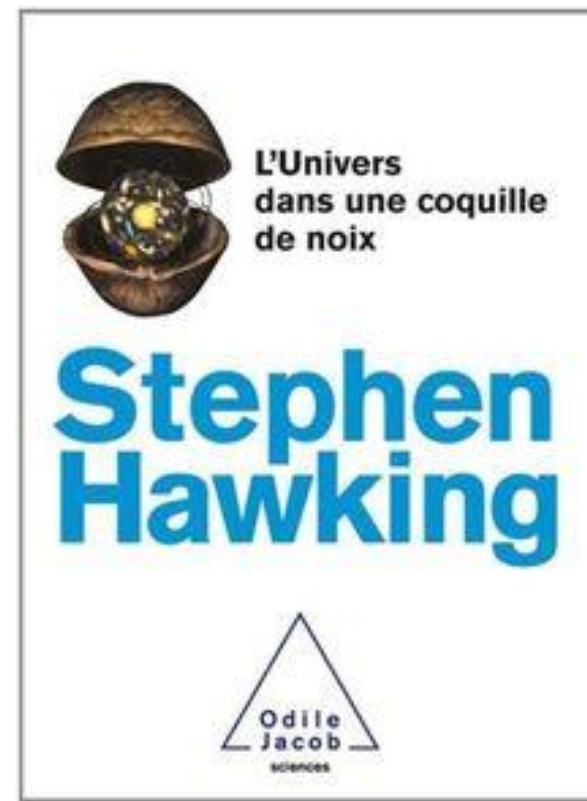
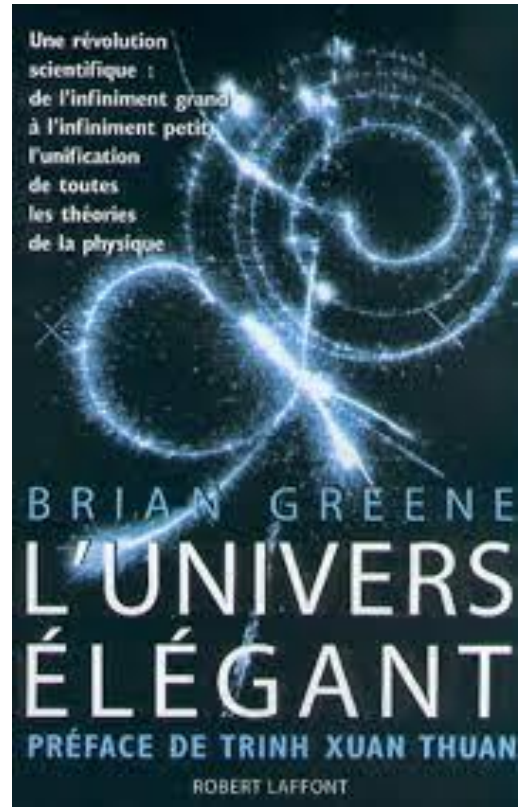
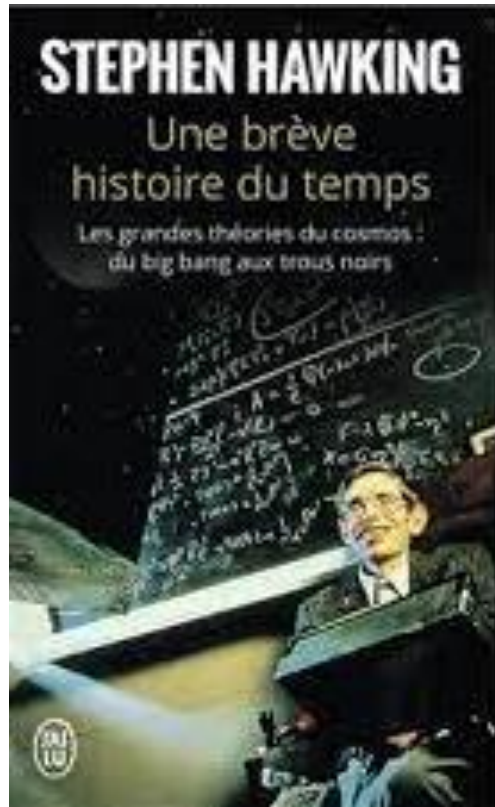
Niveau 0



Niveau 1



Niveau 2



Niveau 3

Pour le fun...

Et en prenant énormément de recul sur la rigueur scientifique

Documentaires

Cosmos: A Space-Time Odyssey (2014) de Niel deGrass Tyson

The Fabric of the Cosmos (2011) de Brian Green

Films

Coherence (2015)

AntMan and the Wasp (2018)

Primer (2005)

Interstellar (2014)

Tenet (2020)

Series

Devs

Big Bang Theory

