

Particule quantique : dualité onde – corpuscule

I. Dualité onde–corpuscule

1. Un peu d'histoire pour commencer
2. Existence des ondes de matière
3. Quand a-t-on besoin de la mécanique quantique ?

II. Fonction d'onde

1. Interprétation probabiliste
2. Principes : description de l'état quantique et évolution
3. Impulsion d'une particule quantique

III. Equation de Schrödinger

1. Énoncé
2. Relations de Heisenberg et conséquences

I. Dualité onde-corpuscule

1. Un peu d'histoire pour commencer



Albert Michelson

“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
mais 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?

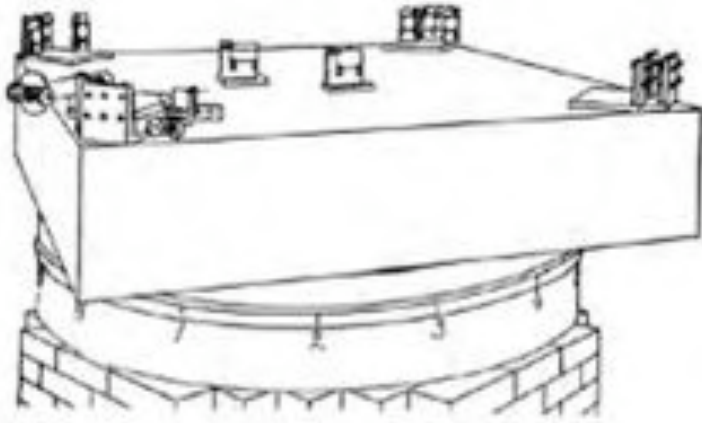
II – The second is the Maxwell–Boltzmann doctrine regarding the partition of energy”.

Conférence à la Royal Institution - 17 avril 1900

Les deux nuages de Lord Kelvin

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

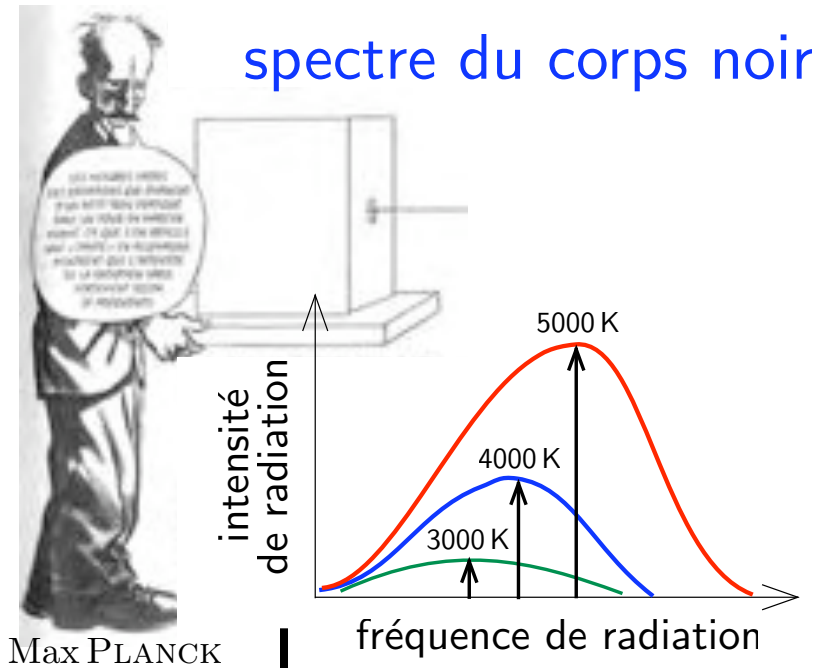
ART. XXXVI.—*On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether*; by ALBERT A. MICHELSON and EDWARD W. MORLEY.*



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

Max Planck et les quanta – 1900



Max PLANCK
(1858–1947)

parvient à expliquer le spectre du rayonnement du corps noir en faisant l'hypothèse que des oscillateurs mécaniques chargés, de fréquence ν , peuvent émettre ou absorber l'énergie lumineuse uniquement par quantités discrètes

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

→ quantum d'énergie $h\nu$ (ou $\hbar\omega$)

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

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



- Constante fondamentale avec une incertitude relative de 5×10^{-8}
- Origine de h : “hilfe Grösse”

Einstein et le photon – 1905

Une boutade : ce n'est pas parce que la bière est vendue en bouteille d'une pinte que la bière est constituée de parties indivisibles d'une pinte chacune.

C'est pourtant la conclusion à laquelle Einstein va aboutir pour la lumière afin d'expliquer ses propriétés quantiques !



Albert EINSTEIN
(1879–1955)

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

– énergie $E = \hbar\omega$

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

Ces quanta seront baptisés “photons” en 1926

Quantification du rayonnement

- La nature granulaire du rayonnement est-elle en contradiction avec une équation d'onde qui est continue (équations de Maxwell)
- Comment réconcilier la description en terme de particule avec les phénomènes ondulatoires de diffraction et d'interférence observés en optique ?

Fluctuations
d'énergie du
corps noir
(1909)



énergie E dans la bande de fréquence $(\nu, \nu + d\nu)$

$$E = V u(\nu) d\nu \quad \text{avec} \quad u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$
$$\rightarrow \left(\frac{\Delta E}{E}\right)^2 = \frac{h\nu}{E} + \frac{c^3}{8\pi\nu^2 V d\nu}$$

fluctuations en $1/\sqrt{N}$
bruit de grenaille
de particules

superposition aléatoire

La lumière est composée à la fois d'ondes
(capable d'interférer) et de particules

Les ondes de matière - 1924

Les **particules** (comme les électrons) se comportent comme des **ondes de matière** :
dualité onde-particule



Prince Louis
DE BROGLIE
(1892–1987)

À une particule de masse m et d'impulsion $\vec{p} = m\vec{v}$
est associée une onde de vecteur d'onde $\vec{k} = \frac{\vec{p}}{\hbar}$

soit une longueur d'onde $\lambda_{\text{DB}} = \frac{2\pi}{k} = \frac{h}{p}$

Les ondes de matière : une idée révolutionnaire



Einstein à Paul Langevin :
“Le travail de Louis de Broglie m’a grandement impressionné. Il a soulevé un coin du grand voile [...] Si vous le voyez, veuillez lui témoigner toute mon estime et ma sympathie.”

I. Dualité onde-corpuscule

1. Un peu d'histoire pour commencer

2. Existence des ondes de matière

1927 : Diffraction d'électrons par un cristal

1929 : prix Nobel attribué à Louis de Broglie

1937 : prix Nobel à C. P. Davisson et G. P. Thomson



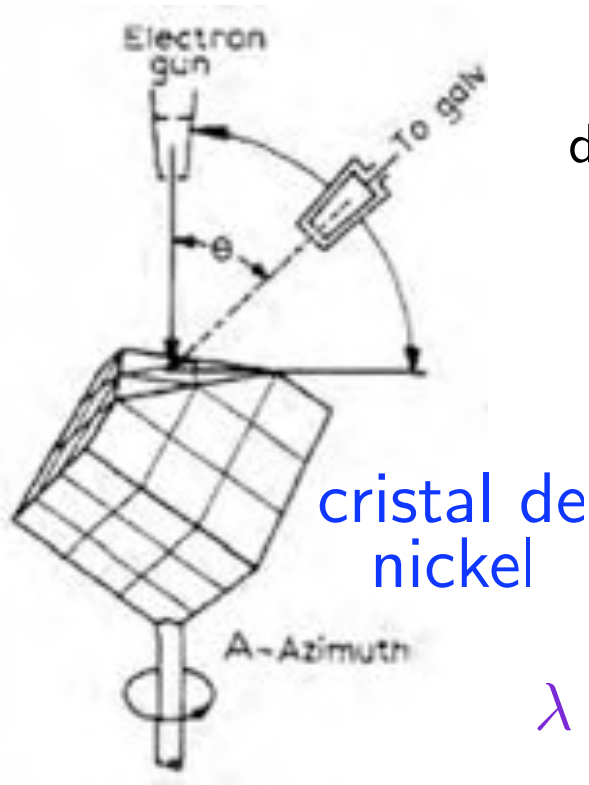
Clinton P. DAVISSON & Lester H. GERMER



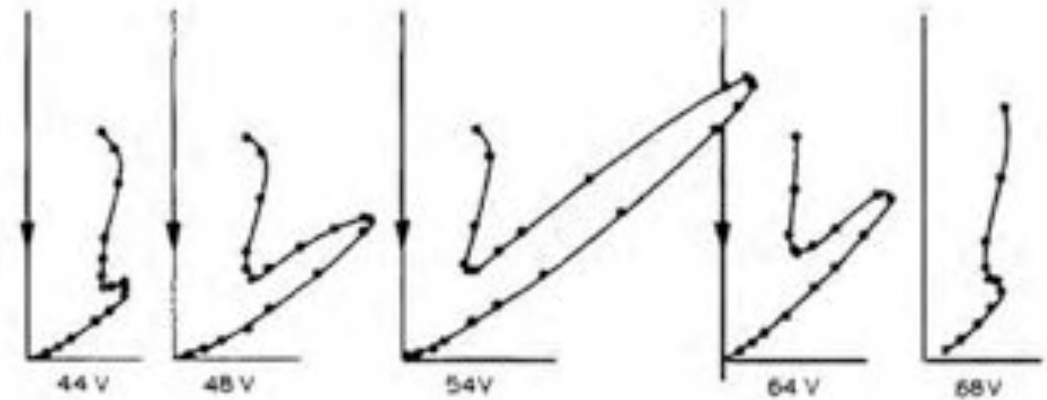
George P. THOMSON

Expérience de Davisson & Germer

- Travaux aux Bell Labs, afin d'améliorer les amplificateurs triodes à tube d'électrons, alors éléments clés dans les systèmes de communication trans-continentale



représentation polaire du signal de diffraction des électrons pour différentes tensions d'accélération

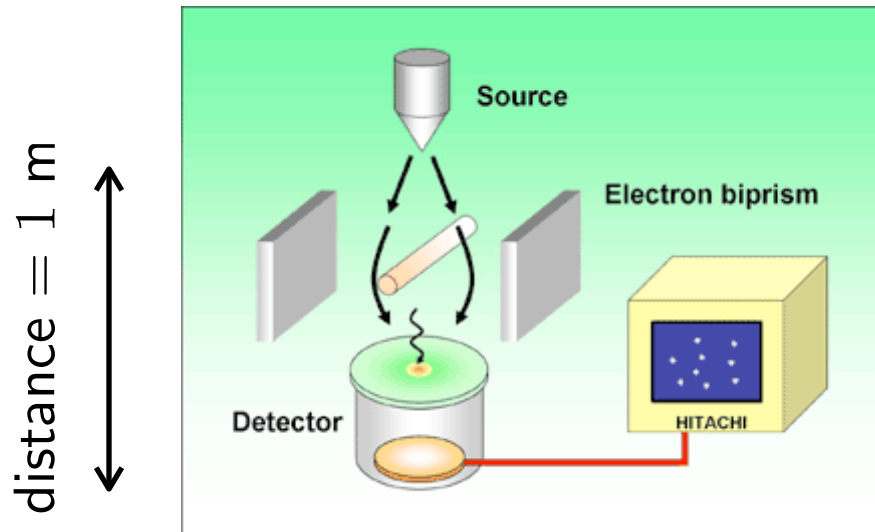


$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2meV}} \longrightarrow \lambda(\text{en nm}) = \frac{1}{0.815 \times \sqrt{V(\text{en V})}}$$

Interférences avec des électrons

- Travaux de A. Tonomura et al. – Hitachi Research Labs.
<http://www.hqrd.hitachi.co.jp/em/doubleslit.cfm>

“biprisme de Fresnel”

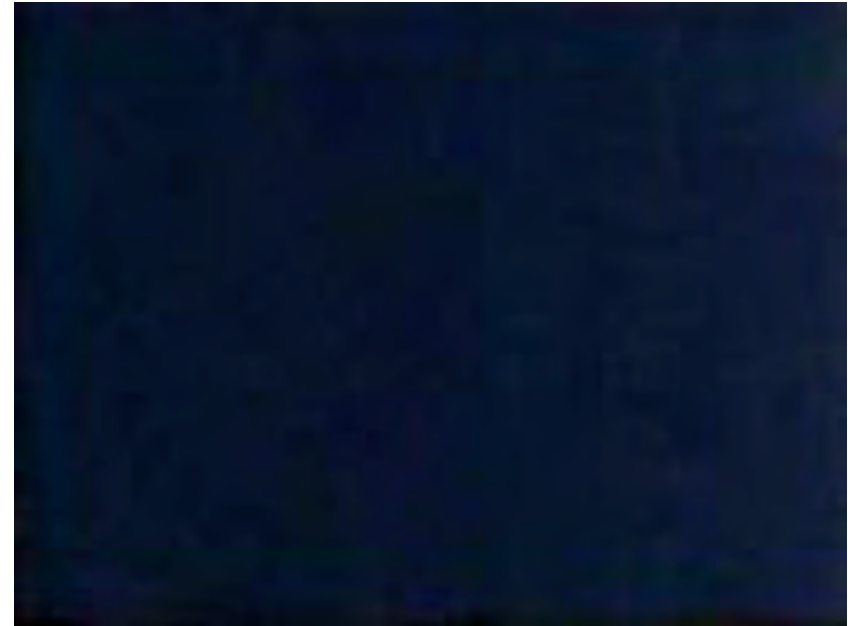


énergie d'accélération 50 keV

→ vitesse $\simeq 0.41 \times c$

filament de diamètre $\simeq 1 \mu\text{m}$

flux $\simeq 10$ électrons par seconde



Un seul “click” ne nous apporte pas d'information.

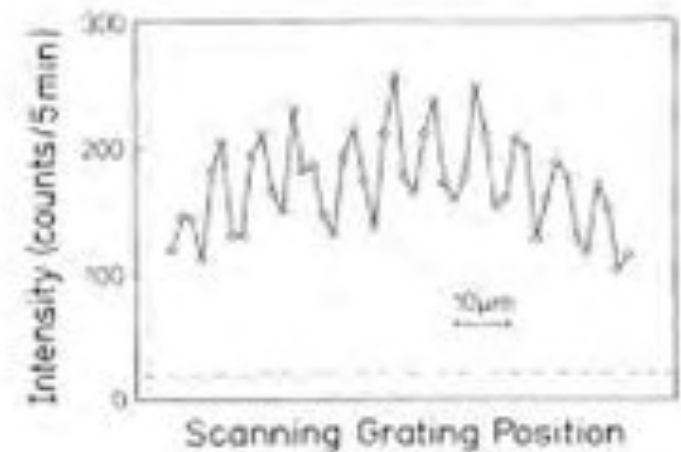
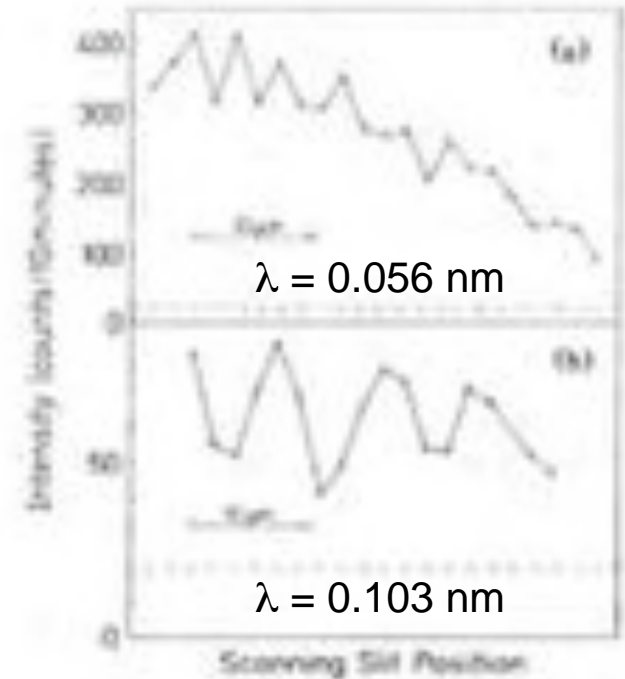
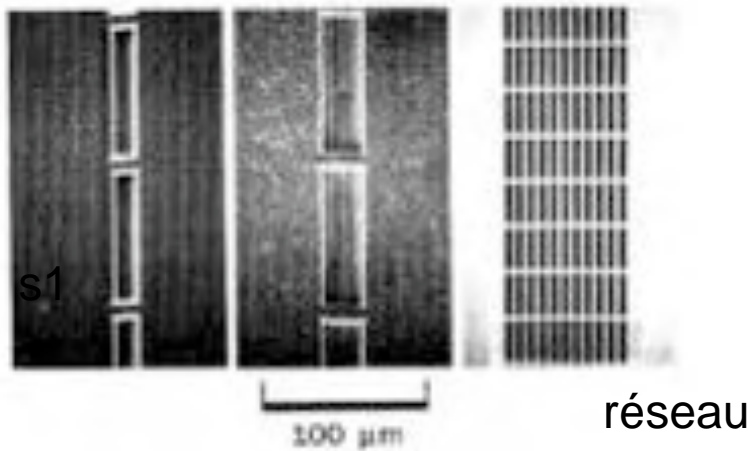
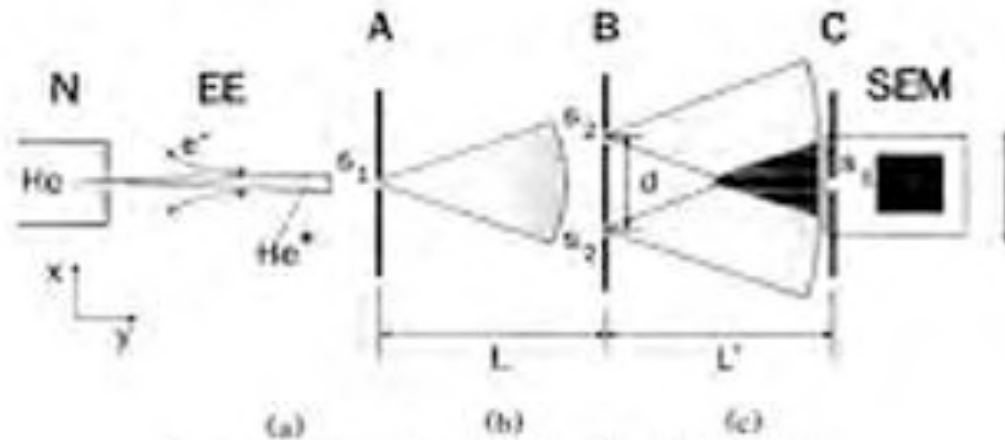
La figure d'interférence n'apparaît qu'une fois un grand nombre de “clicks” enregistrés sur le détecteur.¹²

Interférences avec des atomes (1)

Séparation du front d'onde

→ O. Carnal et J. Mlynek – 1991

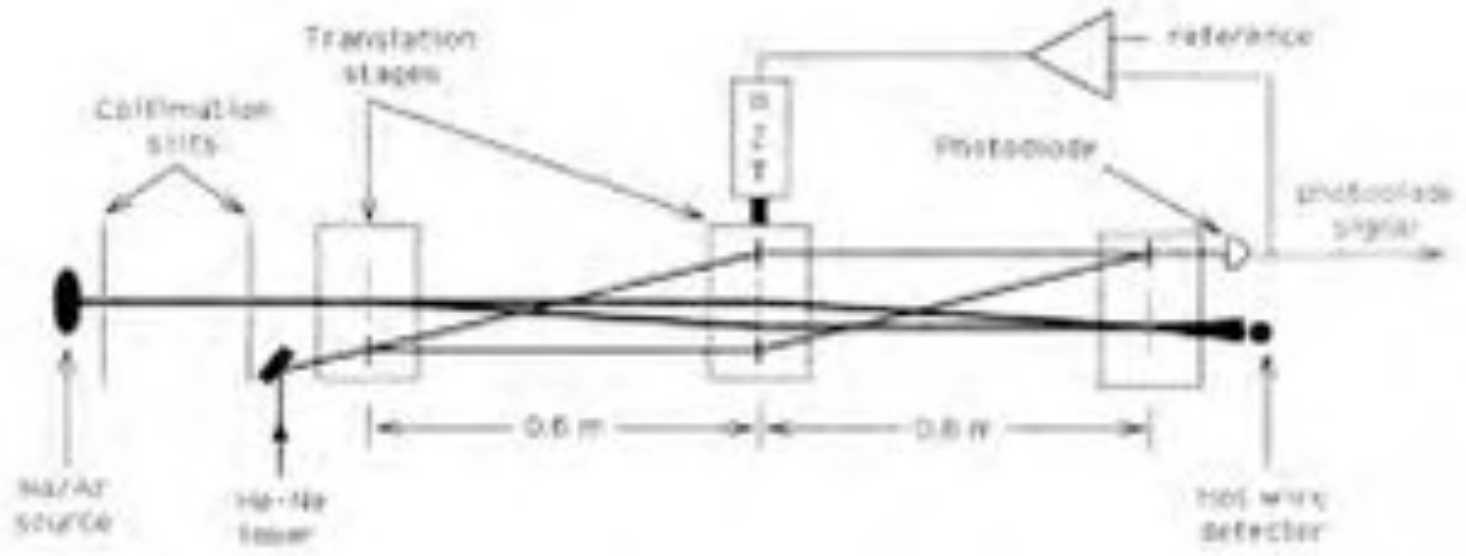
Fentes d'Young réalisées par lithographie



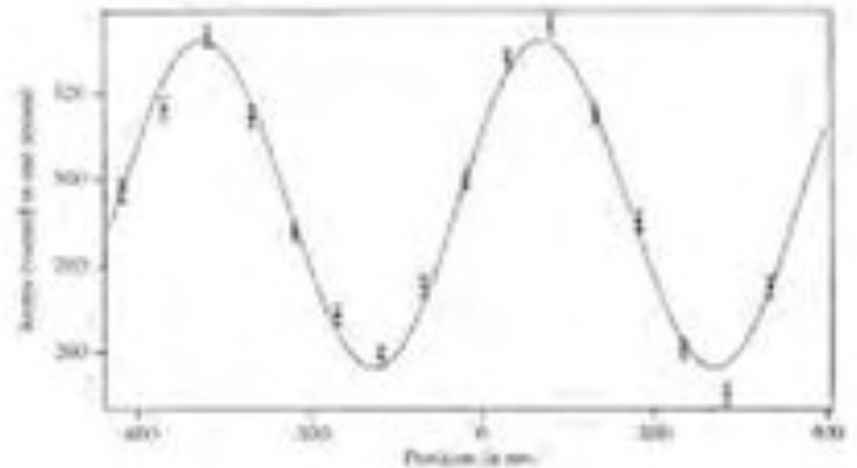
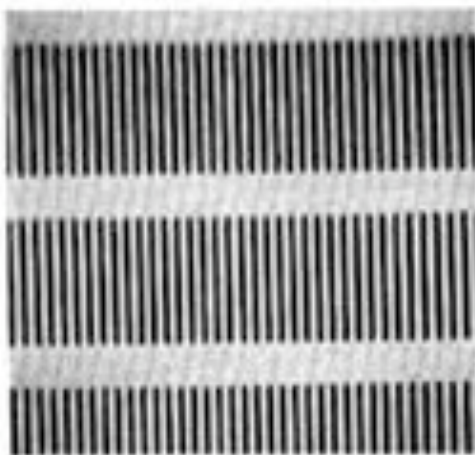
Interférences avec des atomes (2)

Interféromètre à division d'amplitude

→ D. Pritchard – 1991

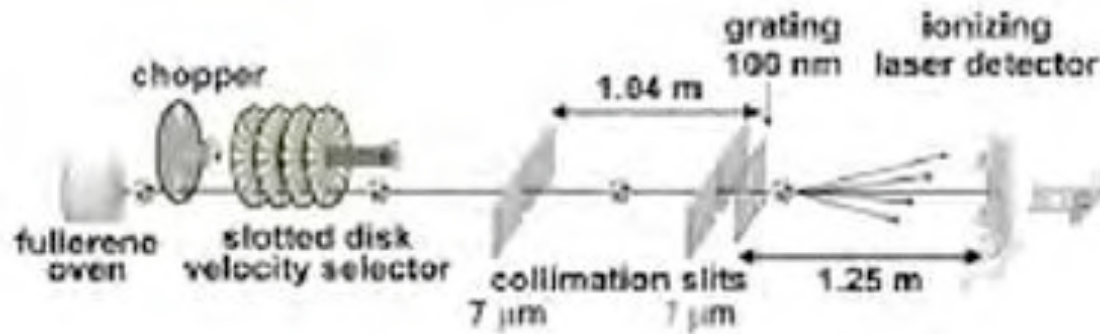


Période
200 nm

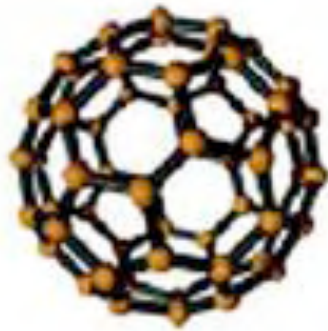
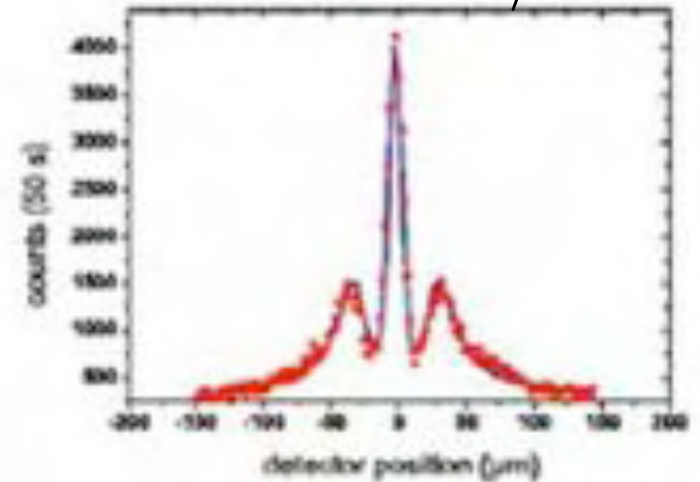


Interférences avec des “gros” objets

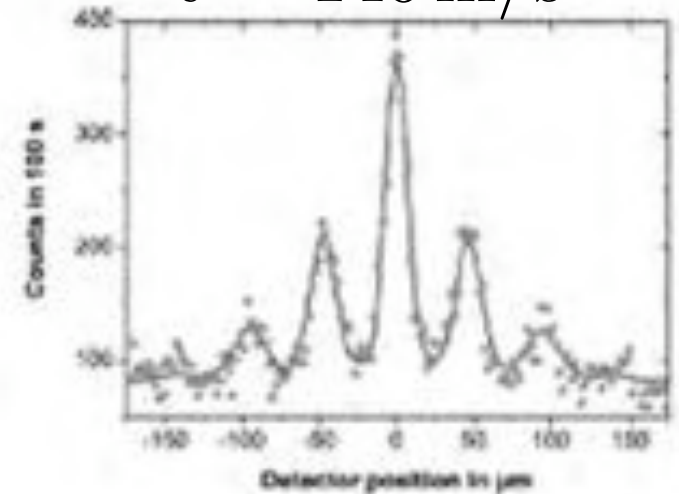
→ Anton Zeilinger & M. Arndt – 1991



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

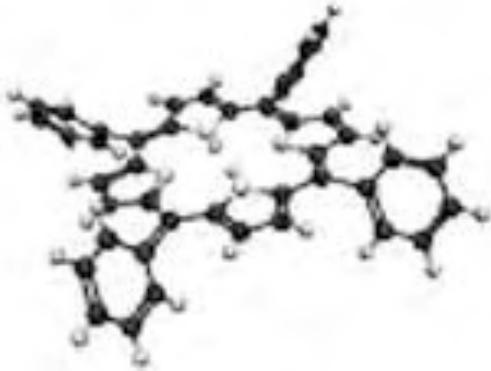


$$v = 140 \text{ m/s}$$



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

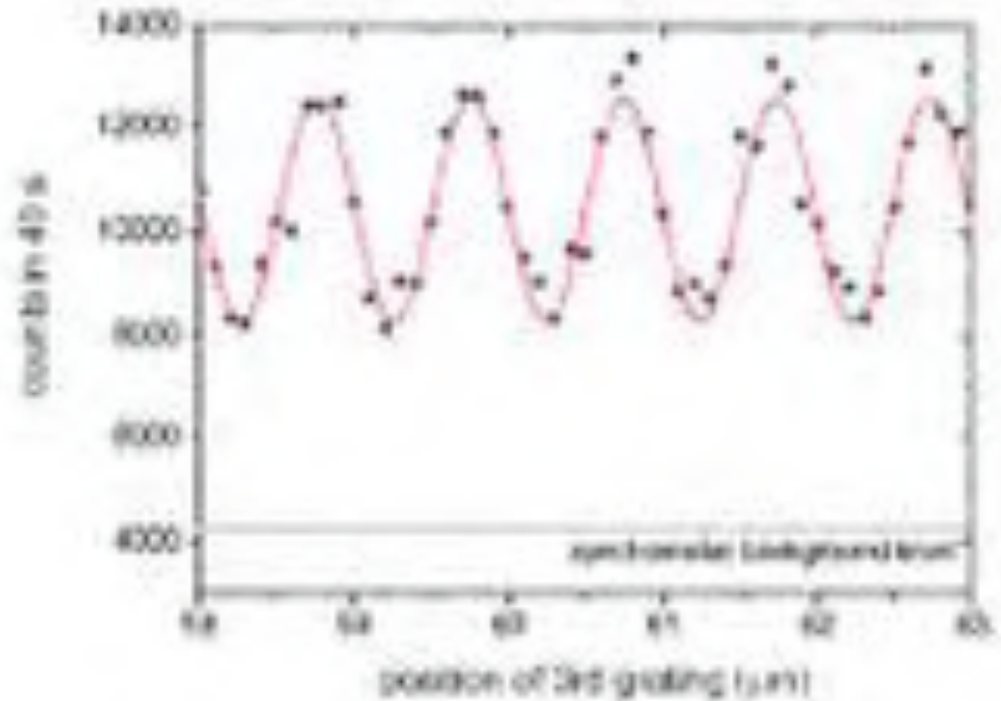
→ Anton Zeilinger – 2003



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



Fluorofullérène $C_{60}F_{48}$



I. Dualité onde-corpuscule

1. Un peu d'histoire pour commencer
2. Existence des ondes de matière
3. Quand a-t-on besoin de la quantique ?

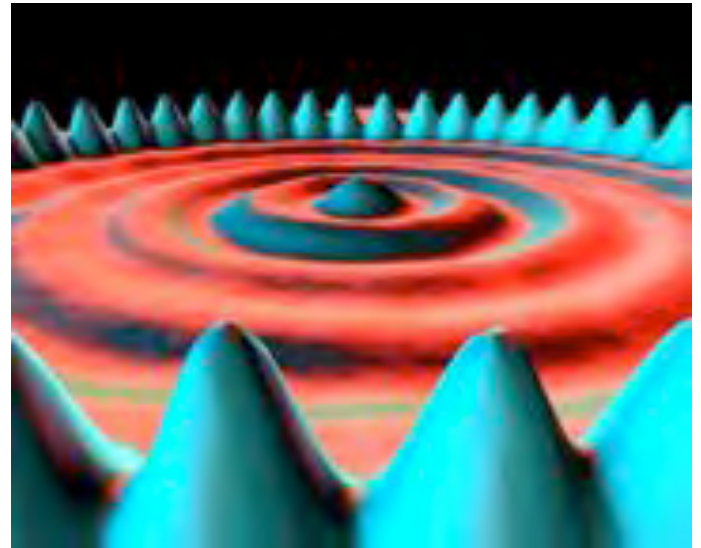
billes de billard en collision
concepts classiques

$$\{\vec{r}(t), \vec{p}(t)\}$$



confinement des électrons
dans un billard "quantique"

48 atomes de Fe sur une surface de Cu



Conduction d'électrons par un nano-fil

→ Groupe Quantronique – CEA Saclay

électron



fil d'argent
diamètre
 $a = 50 \text{ nm}$

impulsion de l'électron : p

description ondulatoire de l'électron

longueur d'onde $\lambda = h/p$

diffraction si $\lambda \sim a$

soit $h \sim a \times p$

Les concepts classiques cessent de s'appliquer quand :
action caractéristique $\mathcal{S} < \text{constante de Planck } \hbar$

$[\mathcal{S}] = \text{longueur} \times \text{impulsion} = \text{énergie} \times \text{temps}$

$[\mathcal{S}] = \text{masse} \times \text{énergie} \times \text{longueur}^2$

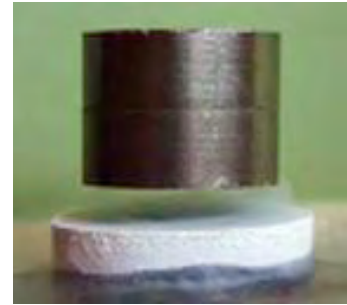
Ordres de grandeur



Systeme considéré	Masse (kg)	Vitesse (m/s)	Ouverture (m)	$\frac{p \times a}{h}$
Homme à travers une porte	70 kg	1 m/s	1 m	10^{34}
Globule rouge dans un capillaire	10^{-16} kg	10^{-1} m/s	10^{-4} m	10^{11}
Electron dans un nano-fil	9×10^{-31} kg	10^6 m/s	50×10^{-9} m	50

Physique quantique macroscopique

- **Supraconductivité** : disparition de la résistivité électrique de certains conducteurs à très basse température)
- **Superfluidité de l'hélium** : disparition de sa viscosité à une température de 2 K
- **Etoiles à neutrons** : fin d'une étoile massive par effondrement gravitationnel



caractère quantique si distance entre voisins $< \lambda_{DB}$

condensat atomique de Bose-Einstein $n \times \lambda_{DB}^3 \simeq 1$
 10^6 atomes dont la fonction d'onde se recouvre

What is Bose-Einstein condensation (BEC)?



High
Temperature T :
thermal velocity \propto
density $n^{1/3}$
"billiard balls"



Low
Temperature T :
de Broglie wavelength
comparable $\propto T^{-1/2}$
"wave packets"

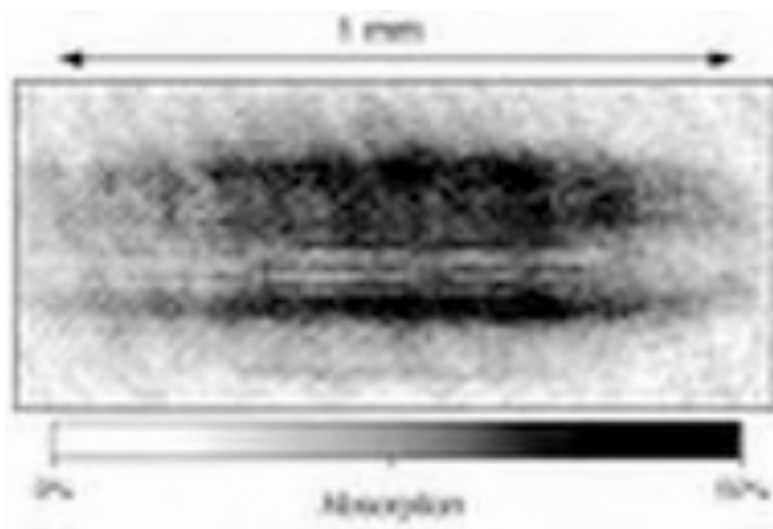
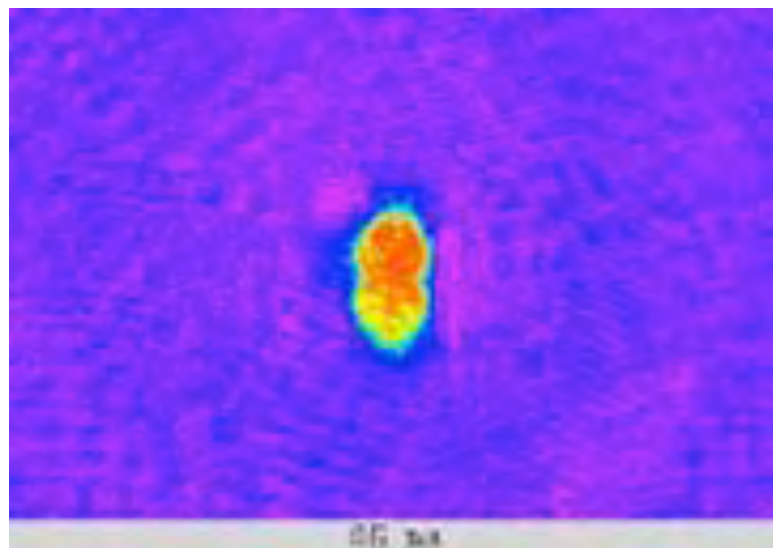
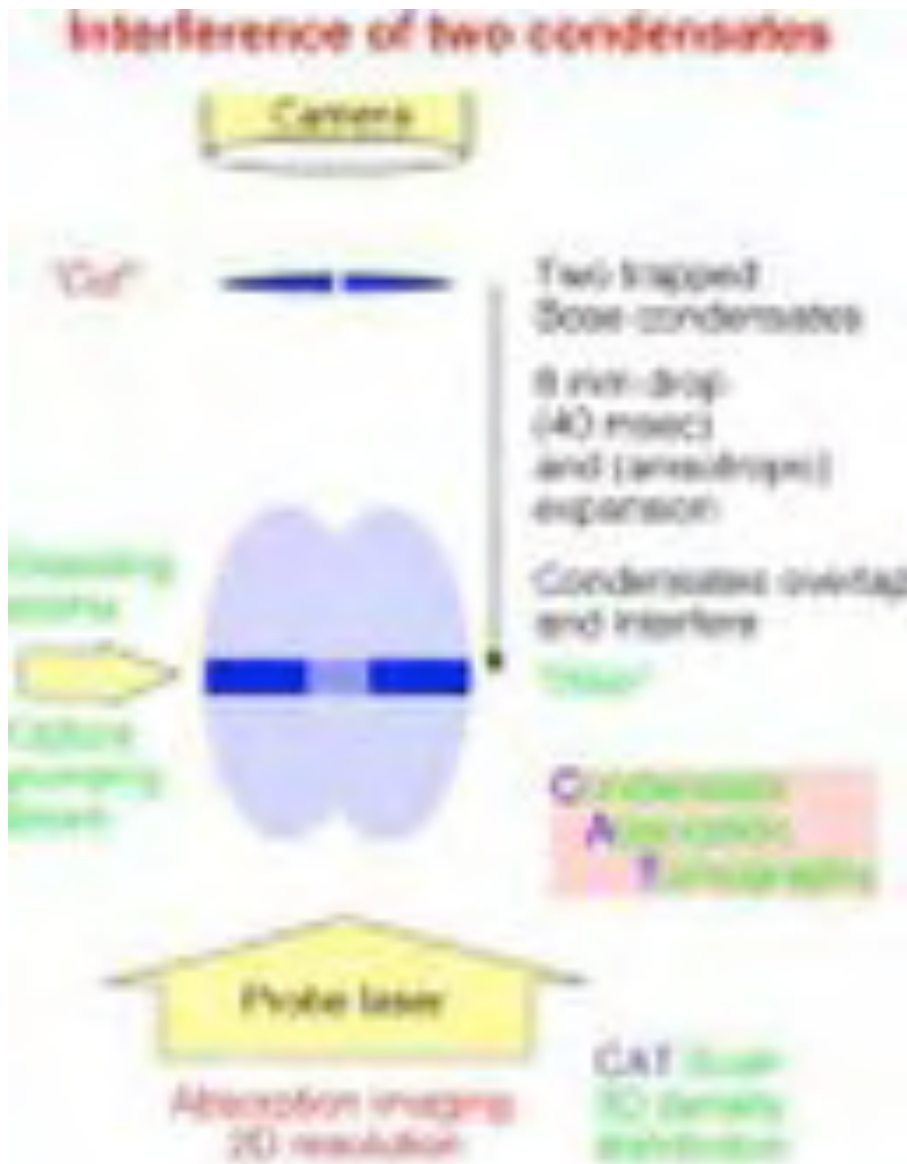


$T = T_{crit}$:
Bose-Einstein
Condensation
 $\lambda_{dB} \sim d$
"matter wave overlap"



$T = 0$:
Pure Bose
condensate
"Giant matter wave"

Interférences entre deux condensats



Dualité onde-corpuscule : fructueux !

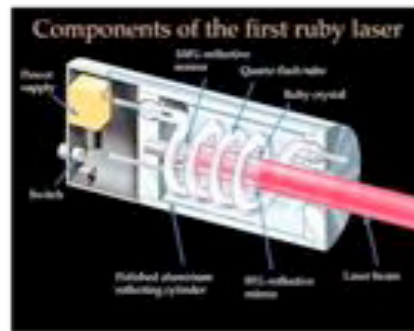
Concept qui fonde la révolution quantique

- Explique la structure de la matière et sa stabilité, ses propriétés, les interactions entre lumière et matière (spectroscopie)
- Explique les propriétés “exotiques” : superfluidité, supraconductivité, BEC
- Permet d’inventer de nouveaux dispositifs :

transistor



laser

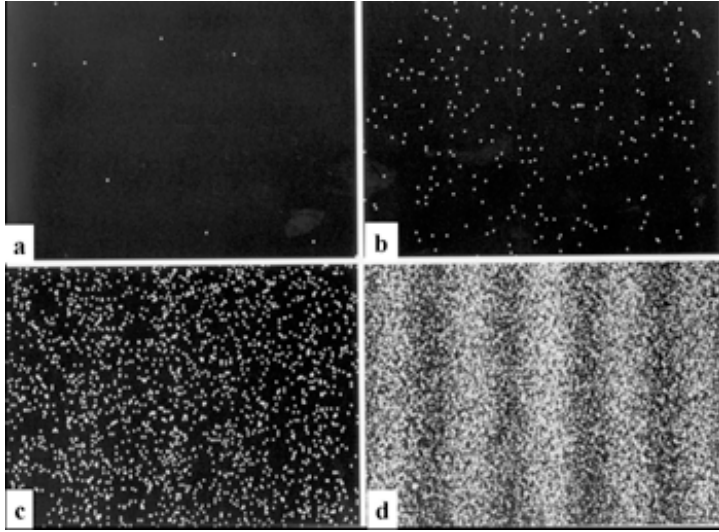


la physique
quantique
s'applique aux
systèmes
macroscopiques

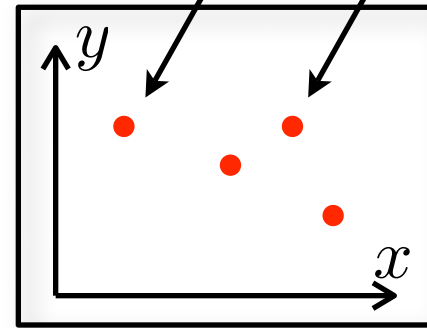
Traduction formelle de ce concept ?

II. Fonction d'onde

1. Interprétation probabiliste



Détection des électrons
 (x_1, y_1) (x_2, y_2)

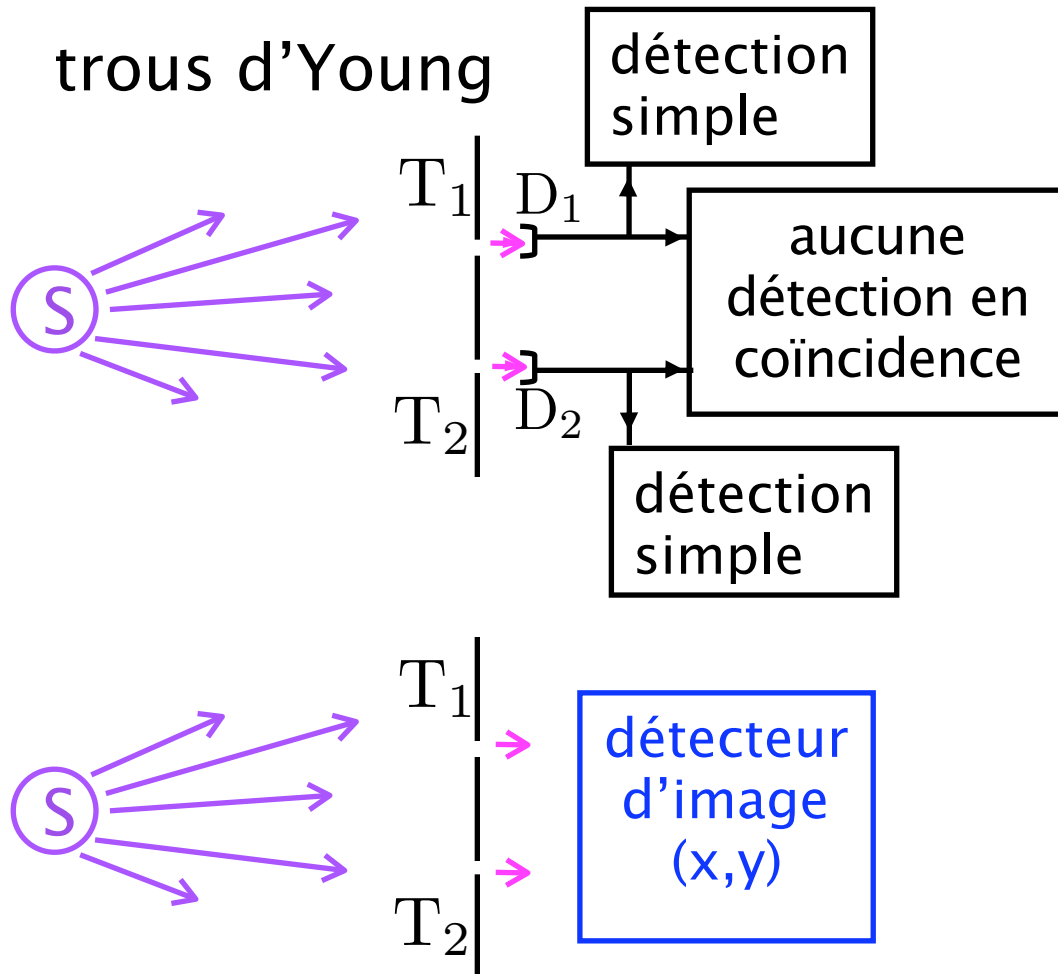


- Chaque électron est détecté en un point de l'écran, et non sur une tâche étendue: **particule ponctuelle**
- Son point d'impact (x, y) semble **aléatoire**
- Deux électrons préparés dans le **même état initial** (même direction, même vitesse) sont détectés en des **points d'impact différents sur l'écran**
- **L'ensemble se distribue avec une loi de probabilité semblable à la figure d'interférence classique**

Phénomène probabiliste non-classique

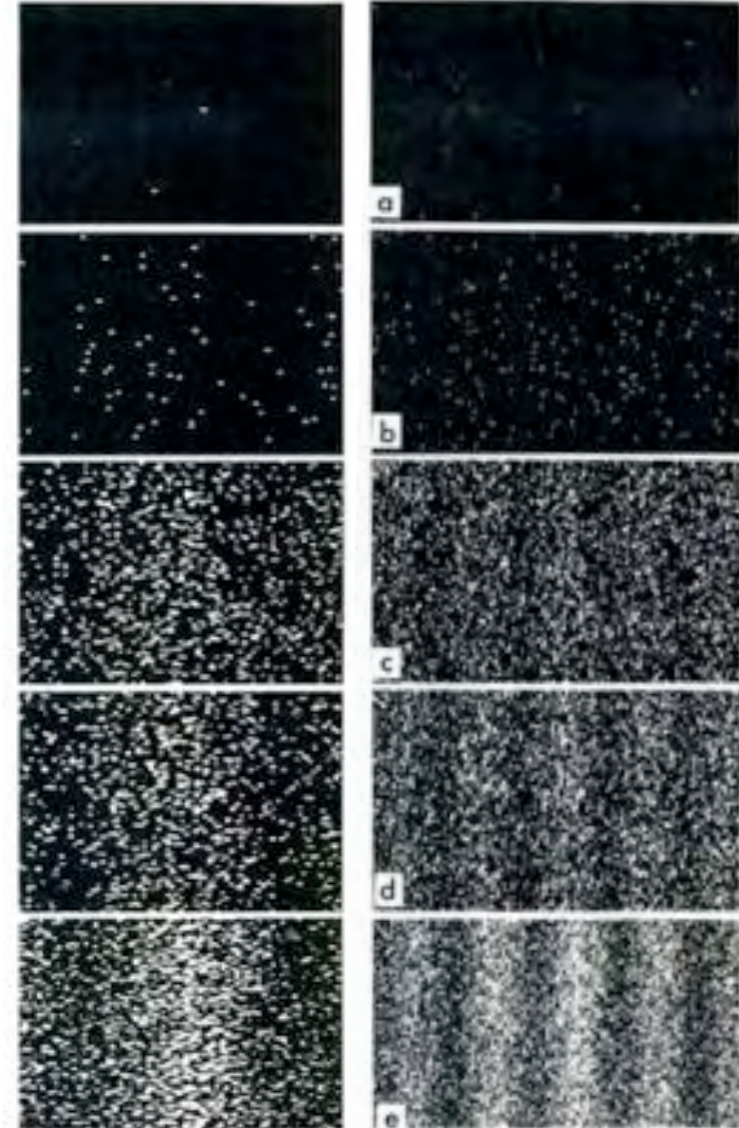
Particules émises une à une, toutes “dans le même état” : émission à partir d’un même point source, direction aléatoire, énergie déterminée et passant par un trou ou l’autre (caractère corpusculaire)

trous d’Young



T_1 ou T_2
ouvert

T_1 et T_2
ouverts



II. Fonction d'onde

1. Interprétation probabiliste
2. Principes: description de l'état quantique de la particule et évolution



Erwin SCHÖDINGER (1887–1961)



Max BORN (1882–1970)

Fonction d'onde : deux principes

→ Principe 1 :

- La description complète de l'état d'une particule quantique de masse m dans l'espace à l'instant t se fait au moyen d'une fonction d'onde complexe scalaire :

$\psi(\vec{r}, t)$: fonction continue des variables d'espace $\vec{r}(x, y, z)$

- La probabilité de trouver la particule à l'instant t dans un volume élémentaire en un point donné est :

$$d^3P = |\psi(\vec{r}, t)|^2 d^3r$$

ψ : amplitude de probabilité
normalisation : $\int |\psi(\vec{r}, t)|^2 d^3r = 1$

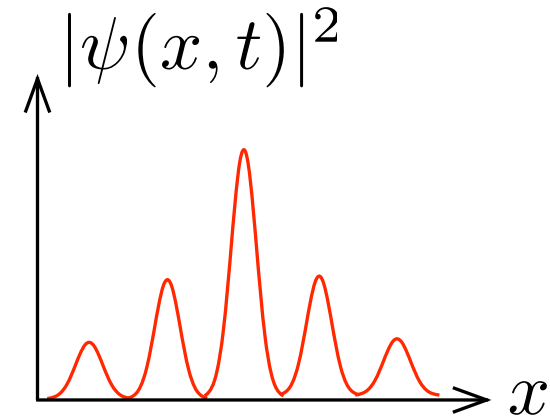
→ Principe 2 :

- Si la particule est **dans le vide sans interaction**, sa fonction d'onde évolue selon l'équation aux dérivées partielles :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi$$

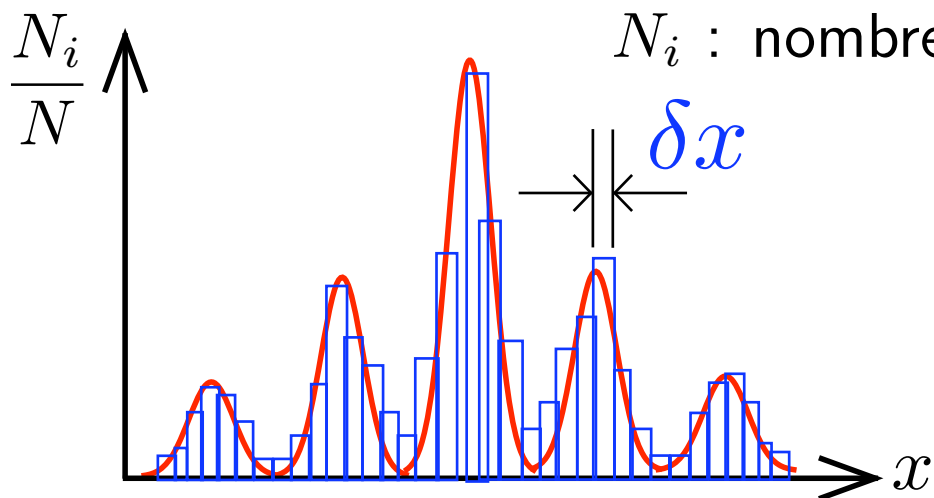
Fonction d'onde et densité de probabilité

On prépare successivement N particules ayant chacune la même fonction d'onde $\psi(x, t)$



Pour chaque particule, on fait **une mesure de position** avec un détecteur de résolution spatiale δx

Les N résultats de mesure ne seront pas identiques et peuvent être représentés sous la forme d'un **histogramme**

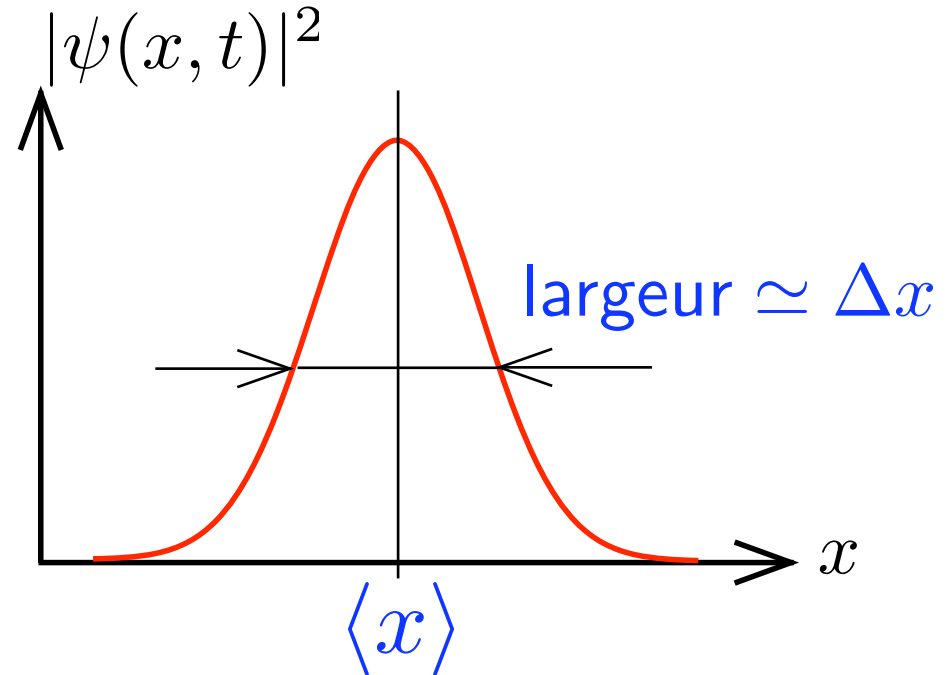


on reconstruit $|\psi(x, t)|^2$
avec une bonne précision
si $N \gg 1$

Mesure : valeur moyenne et écart-type

- Position moyenne :

$$\langle x \rangle = \int x |\psi(x, t)|^2 dx$$



- Variance : $\Delta x^2 = \langle x^2 \rangle - \langle x \rangle^2$

$$\text{avec } \langle x^2 \rangle = \int x^2 |\psi(x, t)|^2 dx$$

- Ecart-type : $\Delta x = \sqrt{\Delta x^2}$

Commentaire sur la fonction d'onde (1)

La description **complète** de l'état d'une particule quantique de masse m dans l'espace à l'instant t se fait au moyen d'une fonction d'onde complexe scalaire

- La fonction d'onde correspond à une description complète de l'état de la particule à un instant donné. Il n'y a pas d'autre élément dans le formalisme quantique qui puisse permettre de savoir, avant d'effectuer la mesure, où la particule va être détectée.
- Le caractère probabiliste et aléatoire ne résulte pas d'une mauvaise connaissance des conditions initiales, comme cela est le cas pour la théorie cinétique des gaz. Il fait partie intégrante du formalisme quantique.

→ **Rôle central de l'aléatoire dans la théorie quantique**

Deux géants s'affrontent sur le rôle de l'aléatoire dans la théorie quantique



EINSTEIN : “Dieu ne joue pas aux dés...”

BOHR : “Arrêtez de dire à Dieu ce qu’il doit faire !”

Commentaire sur la fonction d'onde (2)

La fonction d'onde est une **amplitude de probabilité**

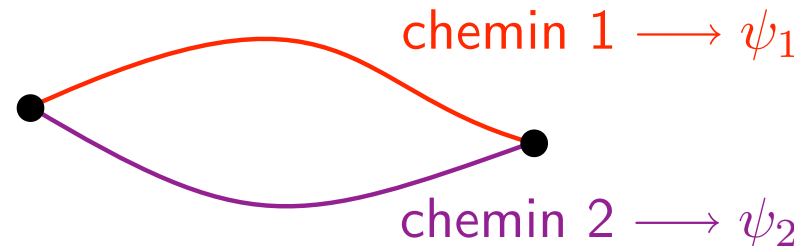
- Si ψ_1 et ψ_2 sont deux fonctions d'onde possibles correspondant aux lois de probabilité

$$P_1 = |\psi_1|^2 \text{ et } P_2 = |\psi_2|^2$$

alors $\psi \propto \psi_1 + \psi_2$ est aussi une fonction d'onde possible correspondant à la loi de probabilité :

$$P = |\psi|^2 \propto P_1 + P_2 + \psi_1^* \psi_2 + \psi_1 \psi_2^*$$

principe de superposition
à la base des interférences



Mathématiquement, la famille des fonctions d'onde d'un système donné forme un espace vectoriel.

Evolution de la fonction d'onde

Si la particule est **dans le vide sans interaction**, sa fonction d'onde satisfait l'équation aux dérivées partielles :

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi$$

- Conservation de la norme

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\int |\psi(\vec{r}, t)|^2 d^3 r \right) &= \int \psi^* \frac{\partial \psi}{\partial t} d^3 r + \int \frac{\partial \psi^*}{\partial t} \psi d^3 r \\ &= \frac{i\hbar}{2m} \left(\int \psi^* \Delta \psi d^3 r - \int \Delta \psi^* \psi d^3 r \right) = 0 \end{aligned}$$

- Ondes planes de de Broglie

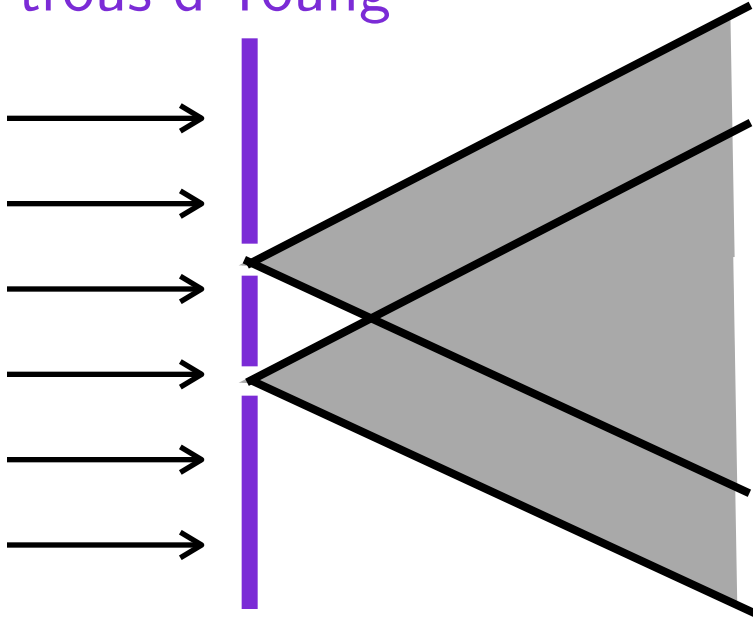
$$\psi(\vec{r}, t) = \psi_0 \exp i \left(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t \right) \text{ est solution}$$

sachant que le lien onde-corpuscule se fait $E = \hbar\omega$ et $\vec{p} = \hbar\vec{k}$

$$E = \frac{p^2}{2m} \longrightarrow \text{relation de dispersion } \omega = \frac{\hbar k^2}{2m}$$

Traitement quantitatif des interférences

trous d'Young



- Résolution de l'équation de propagation aux dérivées partielles

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = i \frac{\hbar}{2m} \Delta \psi$$

- avec conditions aux limites appropriées (en particulier fonction d'onde nulle sur l'écran sauf sur les deux trous)

- ➡ problème mathématique ayant une solution et une seule, mais résolution complexe (numérique)
- ➡ on montre analytiquement qu'à grande distance des deux trous, on retrouve la formule habituelle des interférences.

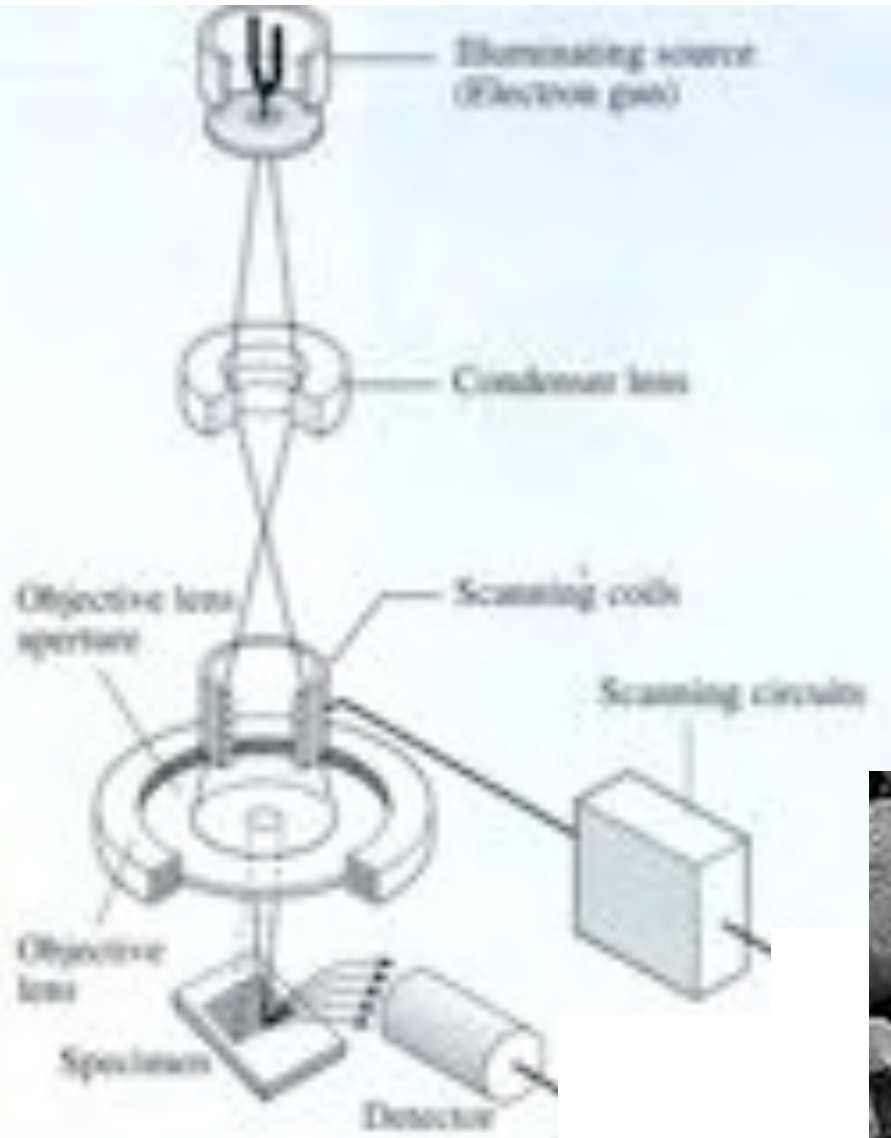
Utilisation de l'onde de de Broglie : microscopie électronique

- Le pouvoir de résolution d'un microscope est fixé par la longueur d'onde du rayonnement utilisé
En optique : la limite est une fraction du micromètre.
- **Microscopie électronique** : avec des ondes de matière d'électrons dont la longueur d'onde est beaucoup plus courte, on peut voir des détails beaucoup plus fins.

$$E_{\text{cin}} = 150 \text{ eV} \quad \text{vitesse} = 7 \times 10^6 \text{ m/s} \quad \lambda_{\text{DB}} = 1 \text{ \AA}$$

- Le pouvoir de résolution d'un microscope électronique est cependant limité en pratique à quelques Å, compte tenu des **aberrations** (sphérique et chromatique) des lentilles magnétiques utilisées pour la focalisation.
- **Deux fonctionnements** : à balayage ou à transmission

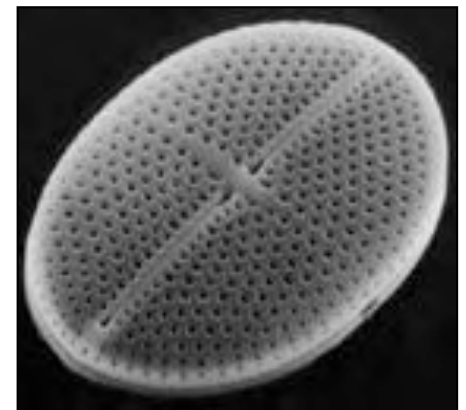
Microscope électronique à balayage



- Le faisceau d'électrons primaires balaie la surface de l'échantillon.
- Ejection d'électrons secondaires avec un rendement dépend fortement de l'angle entre le faisceau incident et la surface analysée : impression de relief.
- Electrons rétrodiffusés, avec une distribution en orientation dépendant de la diffraction sur le cristal.
- Rayons X caractéristiques permettant une analyse de structure (microsonde).
- Résolution : nanomètre pour 200 k€



tête de fourmi

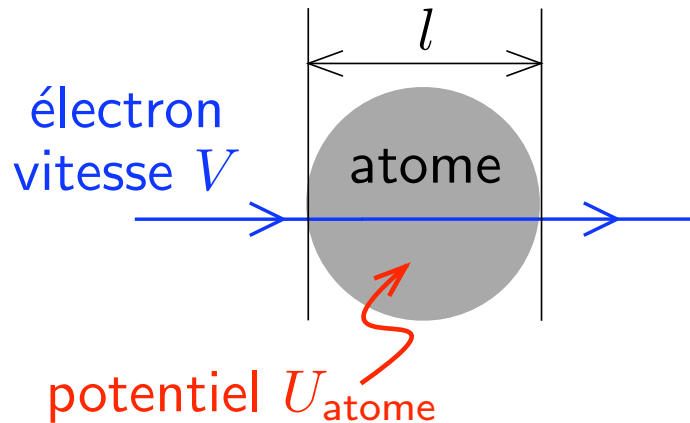


diatomée

Microscope électronique à transmission

- L'absorption des électrons à travers l'échantillon se traduit dans l'image formée : utilisation en biologie.
- **Permet de visualiser la structure atomique avec une résolution de l'angström**

$E \simeq 100 \text{ keV} \longrightarrow \lambda_{\text{DB}} \simeq 3.7 \times 10^{-3} \text{ pm} \ll \text{taille de l'atome}$



L'électron subit à la traversée de l'atome un déphasage

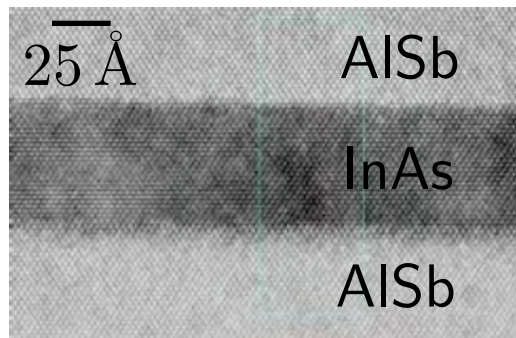
$$\delta\varphi = \frac{q_e U_{\text{atome}} l}{\hbar V}$$

déteçté par interférence avec un faisceau de référence :

$$\psi_{\text{out}} - \psi_{\text{ref}} = (e^{i\delta\varphi} - 1)\psi_{\text{ref}}$$

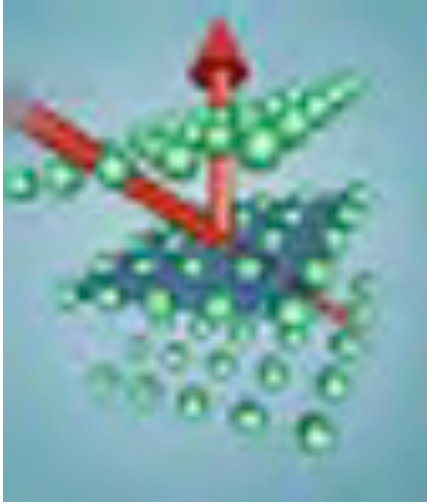
$$\psi_{\text{out}} - \psi_{\text{ref}} \simeq i(\delta\varphi)\psi_{\text{ref}}$$

$$|\psi_{\text{out}} - \psi_{\text{ref}}|^2 \simeq (\delta\varphi)^2 |\psi_{\text{ref}}|^2$$



Hétérostructure par épitaxie

Diffraction de particules



- Utilisation de particules (électrons, neutrons) diffractées par un réseau cristallin, comme pour les rayons X :

interférences constructives

$$2d \cos \theta = p \lambda_{DB} \text{ avec } p \text{ entier}$$

angle de diffraction de Bragg θ_B

$$2d \sin \frac{\theta_B}{2} = p \lambda_{DB}$$

➔ Structure cristalline et symétries

longueur d'onde de Broglie $\simeq 1 \text{ \AA}$

électron : $V = 7.3 \times 10^6 \text{ m/s}$ et $E = 150 \text{ eV}$

neutron : $V = 4000 \text{ m/s}$ et $E = 0.01 \text{ eV}$

II. Fonction d'onde

1. Interprétation probabiliste
2. Principes: description de l'état quantique de la particule et évolution
3. Impulsion d'une particule quantique

Que trouve-t-on quand on mesure la vitesse \vec{v} ou l'impulsion $\vec{p} = m\vec{v}$ d'une particule quantique ?

→ résultat probabiliste

→ la densité de probabilité $\mathcal{P}(\vec{p})$ pour l'impulsion est donnée par :

$$\mathcal{P}(\vec{p}) = |\varphi(\vec{p})|^2 \quad \text{où} \quad \varphi(\vec{p}) = \text{TF} [\psi(\vec{r})]$$

III. Equation de Schrödinger

1. Enoncé

2. Relations de Heisenberg et conséquences

- Relation taille-énergie pour un système quantique
- Stabilité de la matière



Werner HEISENBERG (1901–1976)



Bohr, Heisenberg et Pauli

III. Complémentarité de Bohr

1. Trous d'Young : peut-on savoir par quel trou est passée la particule ?



Niels BOHR (1885–1962)

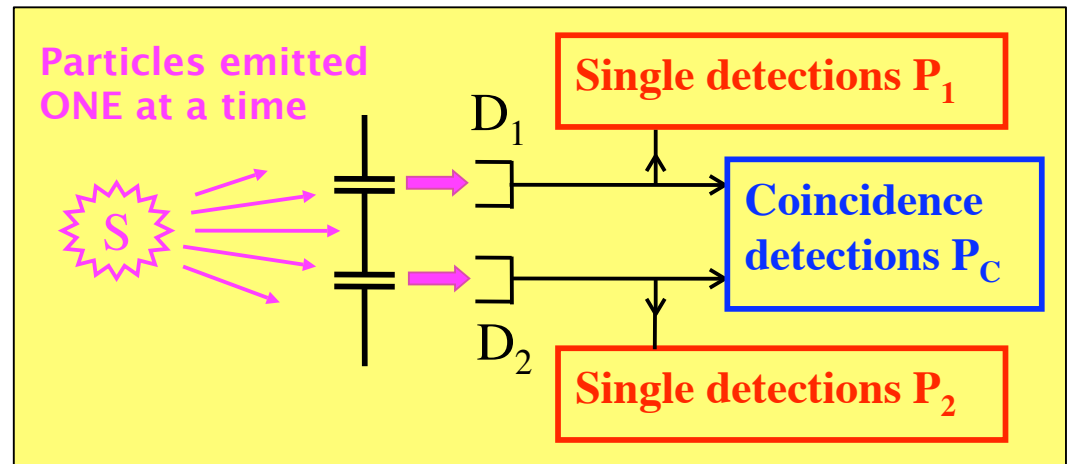


EINSTEIN et BOHR
Congrès Solvay – 1927

Dualité onde-corpuscule : bizarre !

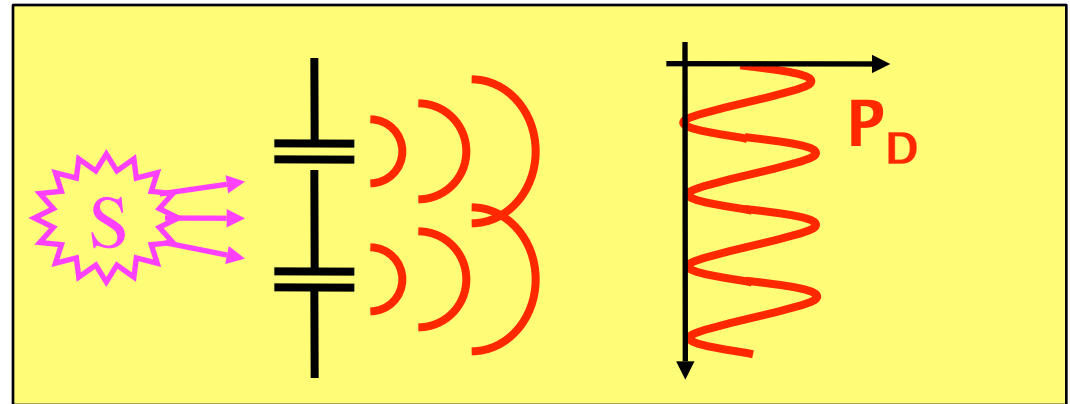
Première expérience

Comportement **corpusculaire**:
particule unique
passe soit par T_1
soit par T_2 .



Deuxième expérience

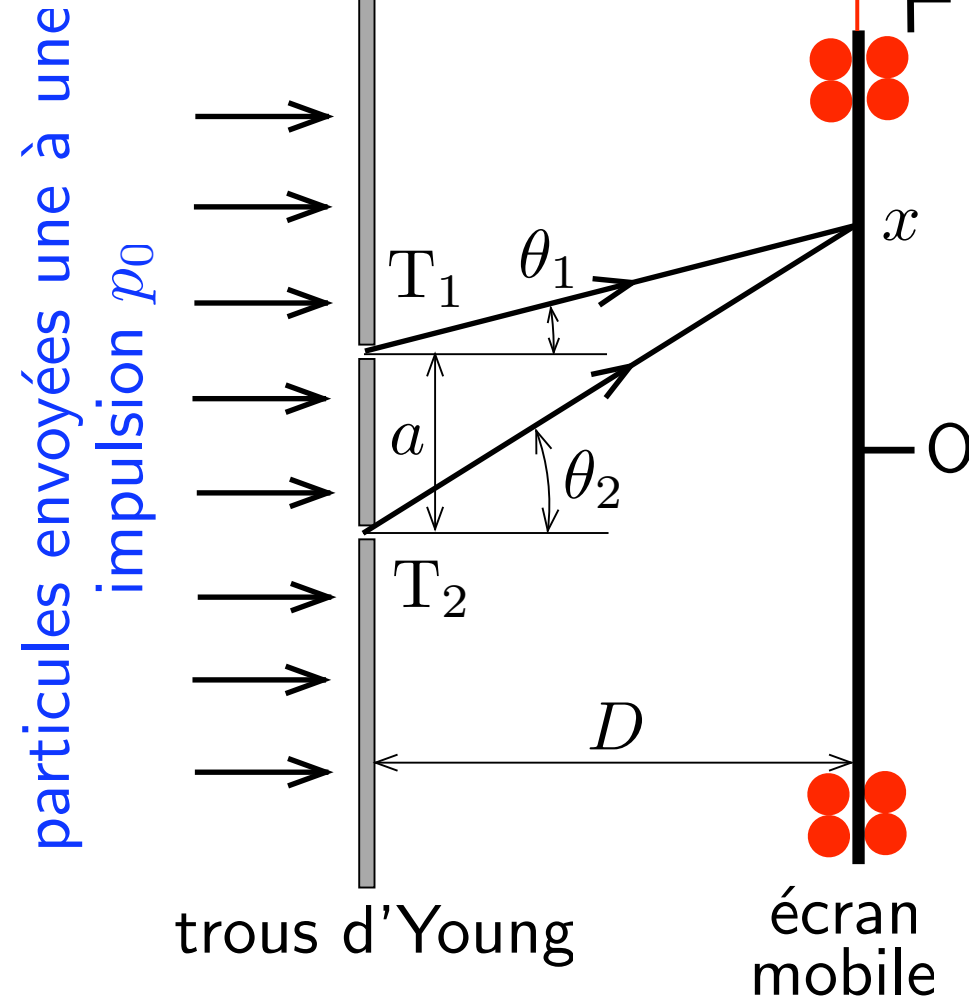
Comportement **ondulatoire**:
particule unique
passe par les deux
trous simultanément.



Même source, mêmes trous : incompréhensible avec nos images classiques d'onde et de corpuscule.

Que se passe-t-il dans une expérience où nous pouvons connaître le chemin suivi par la particule ?

Détection du chemin suivi par la particule



Mesures simultanées

Point d'impact x sur l'écran
Direction du recul de l'écran le long de l'axe Ox

chemin 1

impulsion transférée à l'écran

$$p_x^{(1)} = p_0 \sin \theta_1 \simeq p_0 \frac{x - a/2}{D}$$

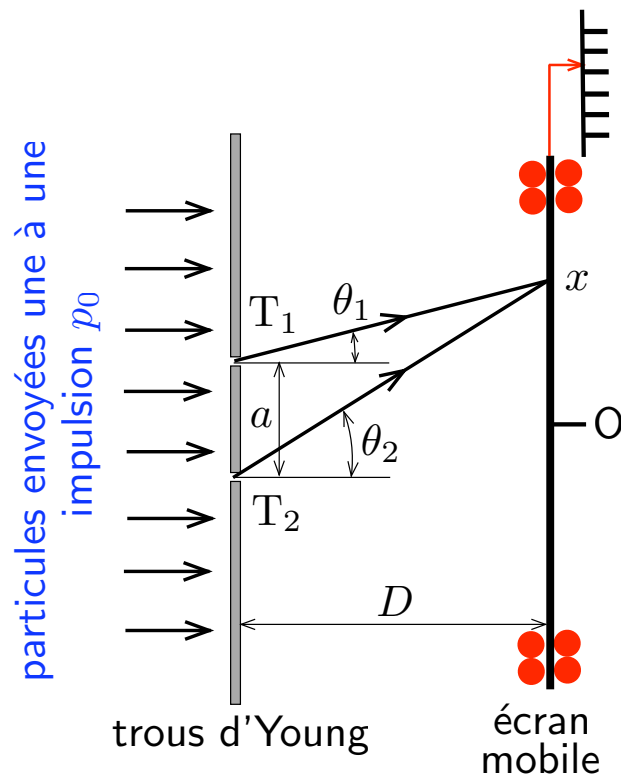
chemin 2

impulsion transférée à l'écran

$$p_x^{(2)} = p_0 \sin \theta_2 \simeq p_0 \frac{x + a/2}{D}$$

$$\rightarrow \Delta p_x = \frac{ap_0}{D}$$

Interférences et information "chemin suivi"



Pour pouvoir déterminer le chemin suivi par la particule par le recul de l'écran, il faut connaître l'impulsion de l'écran avant chaque détection avec une précision :

$$\Delta p_x^{(\text{écran})} \ll \frac{a p_0}{D}$$

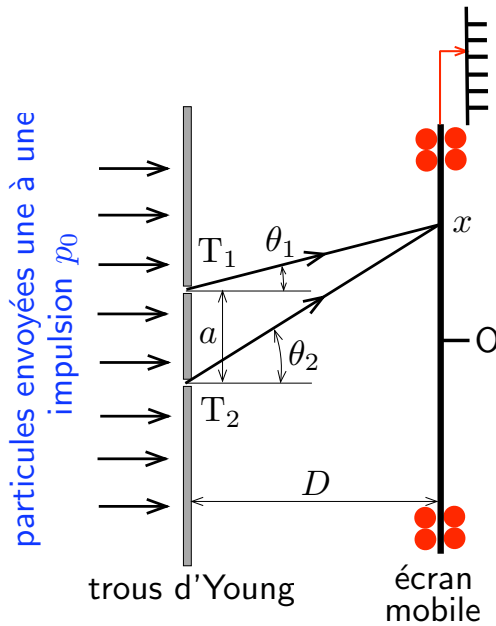
Pour observer les franges d'interférences, il faut que l'écran soit positionner avant chaque détection avec une précision :

$$\Delta x^{(\text{écran})} \ll \text{interfrange} = \frac{\lambda D}{a}$$

particule $\lambda = \frac{h}{p_0}$

$$\longrightarrow \Delta x^{(\text{écran})} \times \Delta p_x^{(\text{écran})} \ll h$$

L'inégalité de Heisenberg nous sauve !



Nous avons vu qu'il est impossible de préparer un système (particule - écran) dans un état pour lequel les précisions de notre connaissance de sa position et de son impulsion sont simultanément arbitrairement bonnes :

$$\Delta x \times \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Il importe de préciser le protocole expérimental :

- on peut réaliser une expérience où on détermine le chemin suivi par la particule (par quel trou elle est passée)
- on peut mesurer les interférences (qui sous-entendent que la particule est passée par les deux trous à la fois)

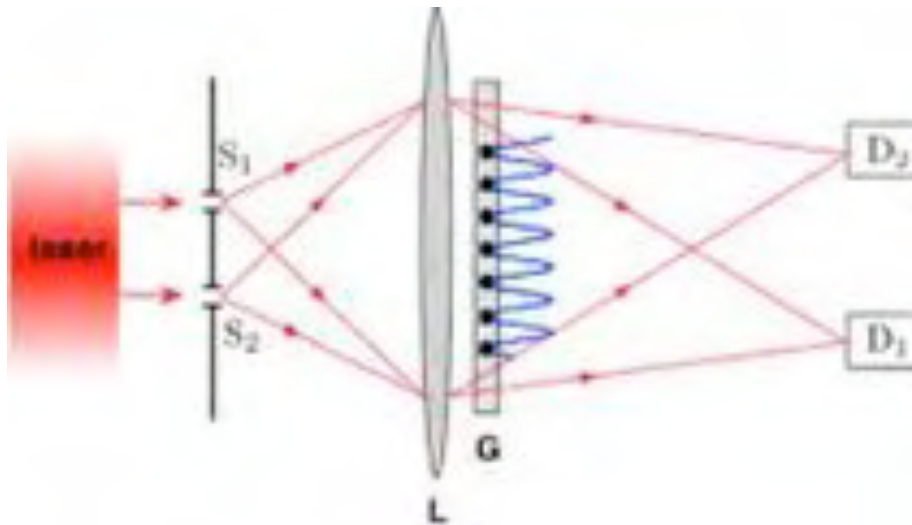
mais on ne peut pas faire les deux à la fois !

Complémentarité de Bohr - 1927

III. Complémentarité de Bohr

1. Trous d'Young : peut-on savoir par quel trou est passée la particule ?
2. Exemple à discuter...

S. S. Afshar, E. Flores, K. F. McDonald, and E. Knoesel,
“Paradox in Wave-Particle Duality”, *Found. Phys* **37**, 295 (2007)

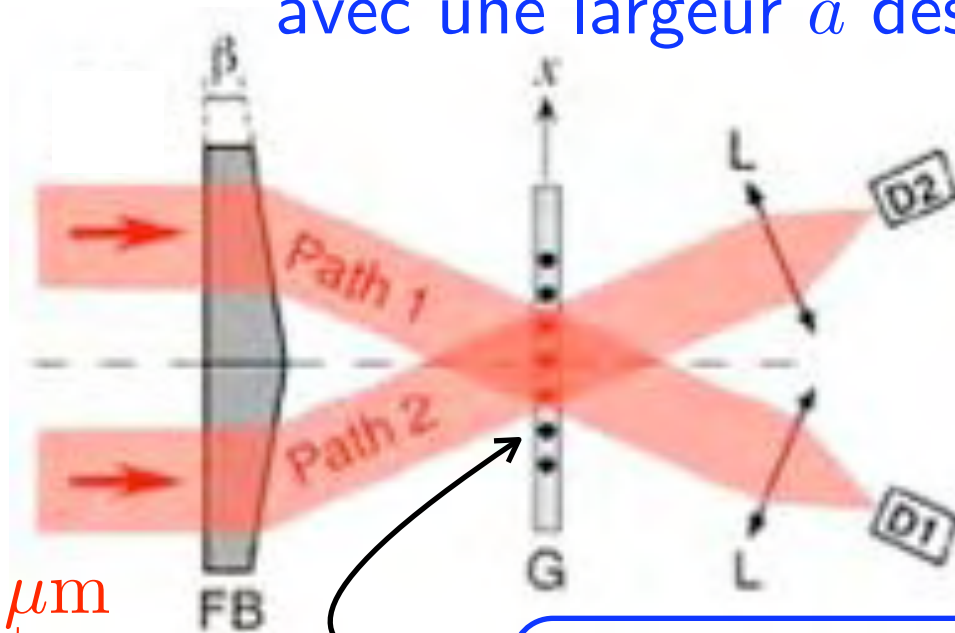


AFSHAR prétend : $D = 1$ (click sur les détecteurs) et $V=1$ (réseau)

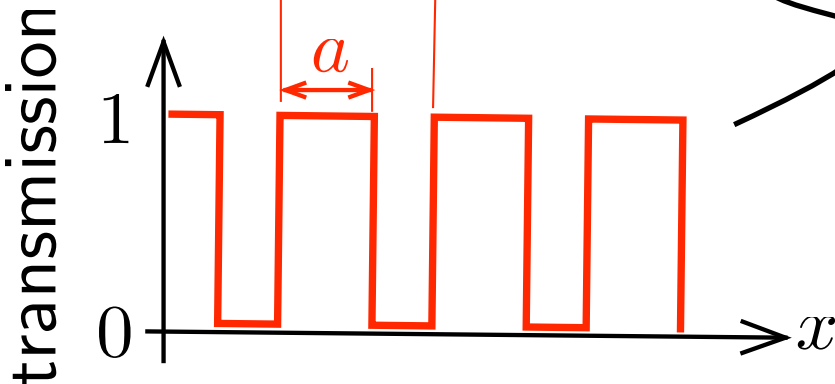
Expérience d'Afshar avec un biprisme

insertion d'un réseau dans le champ d'interférence

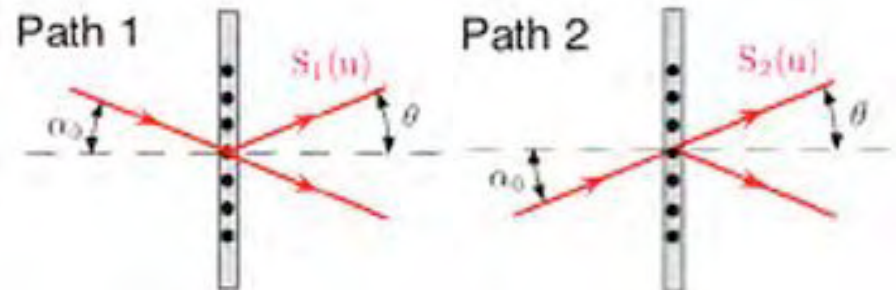
→ période du réseau Λ égale à l'interfrange ($87 \mu\text{m}$)
avec une largeur a des fentes variable



$\Lambda = 87 \mu\text{m}$



influence de la diffraction



Expérience proposée par Afshar

comportement “onde”

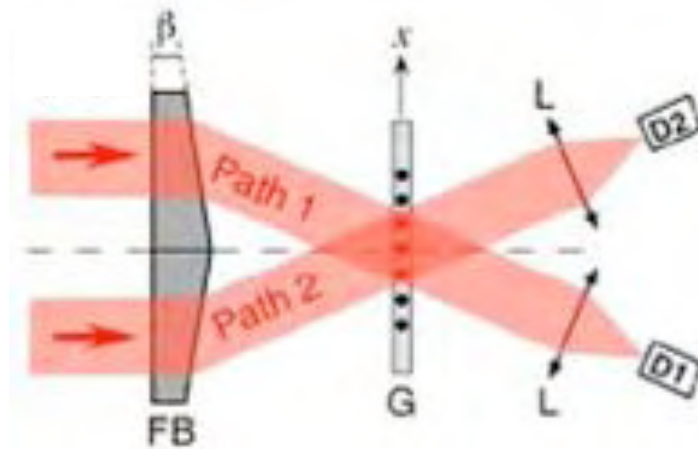
contraste V

comportement “particule”

information “chemin-suivi” D

$$V^2 + D^2 \leq 1$$

inégalité de complémentarité – B. G. Englert, PRL **77**, 215 (1996)

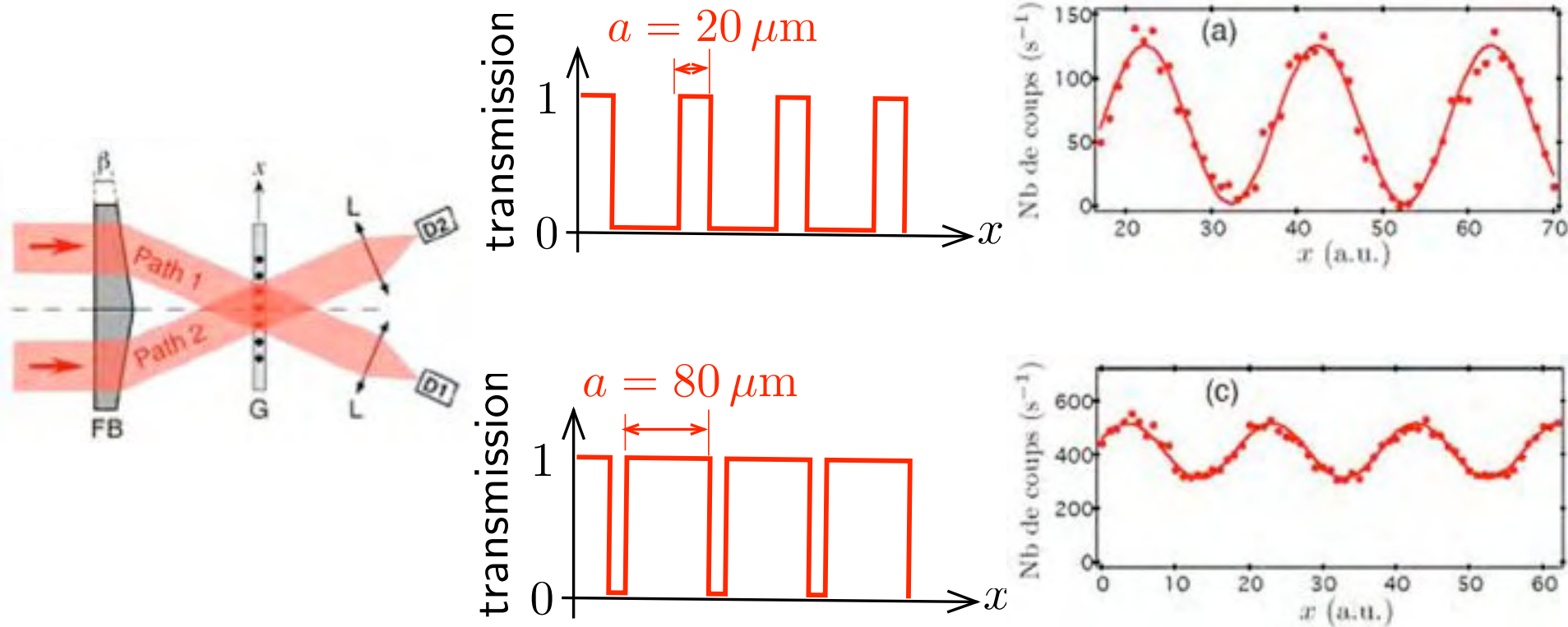


une voie bloquée : accès au paramètre chemin-suivi D
chemin 2 bloqué $\rightarrow N_1$ coups sur D1 et N_2 coups sur D2

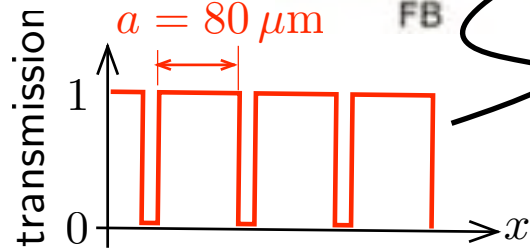
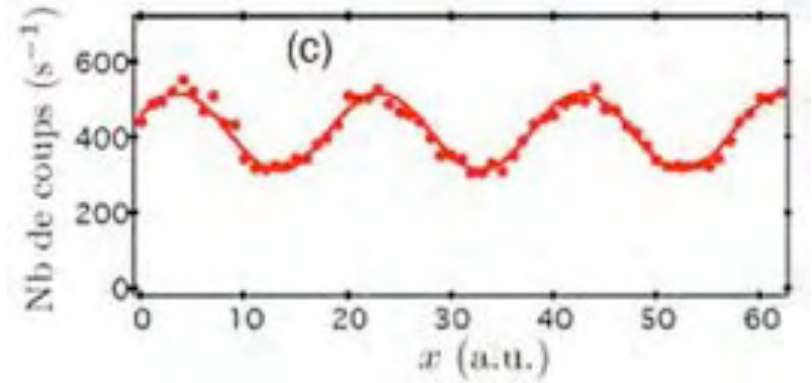
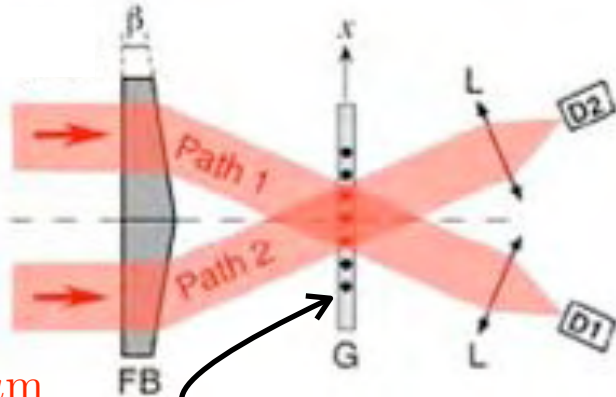
paramètre chemin-suivi $D = \frac{N_1 - N_2}{N_1 + N_2}$

Resultats: interférence et chemin suivi

translation du réseau selon l'axe x des franges :
modulation du taux de détection sur D1 et D2

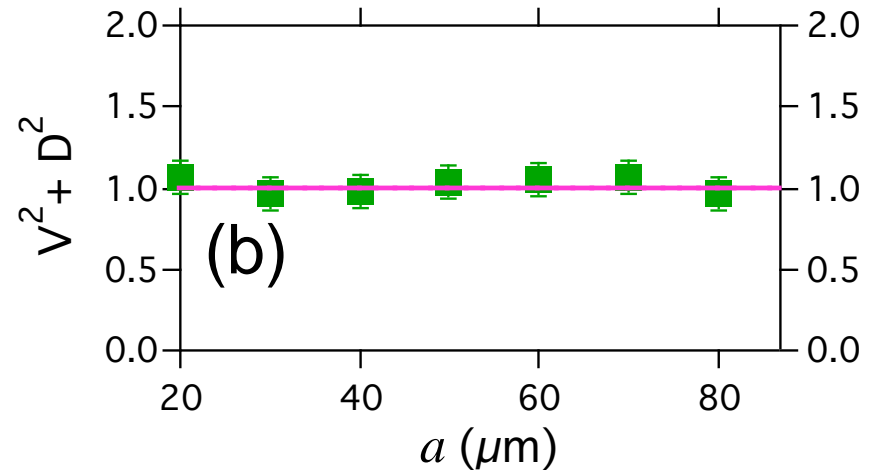
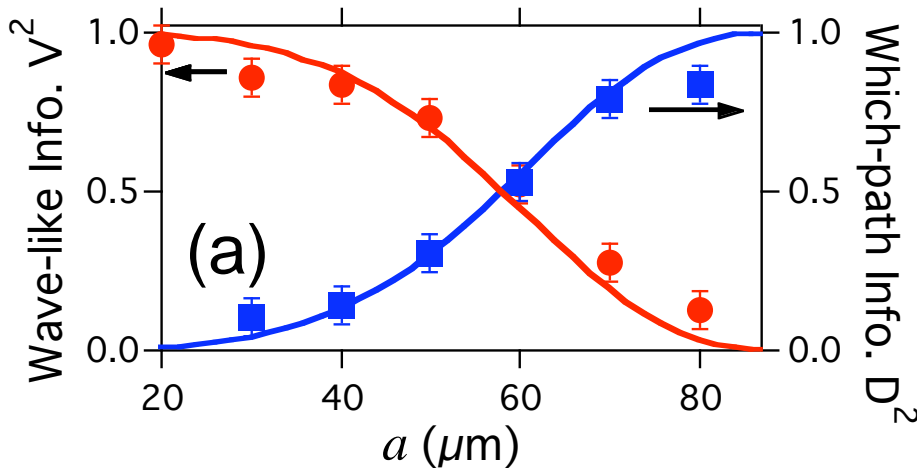


Photon : chemin-suivi vs. interférence



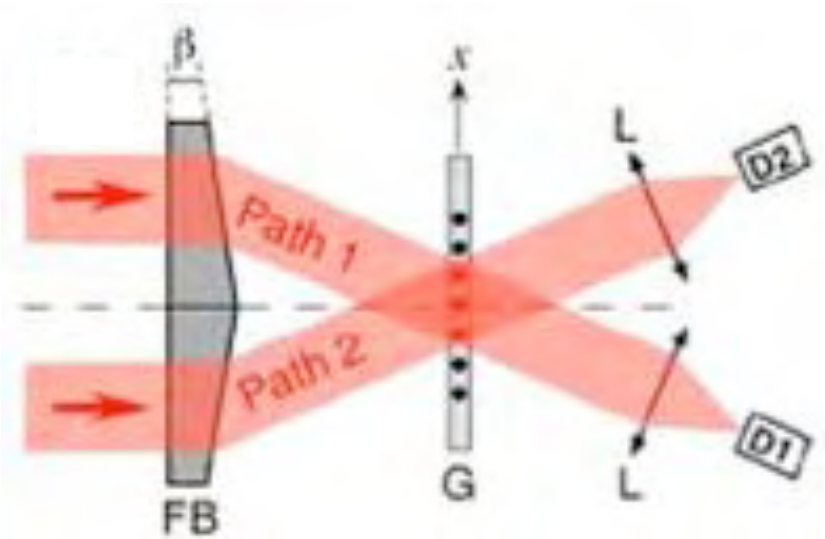
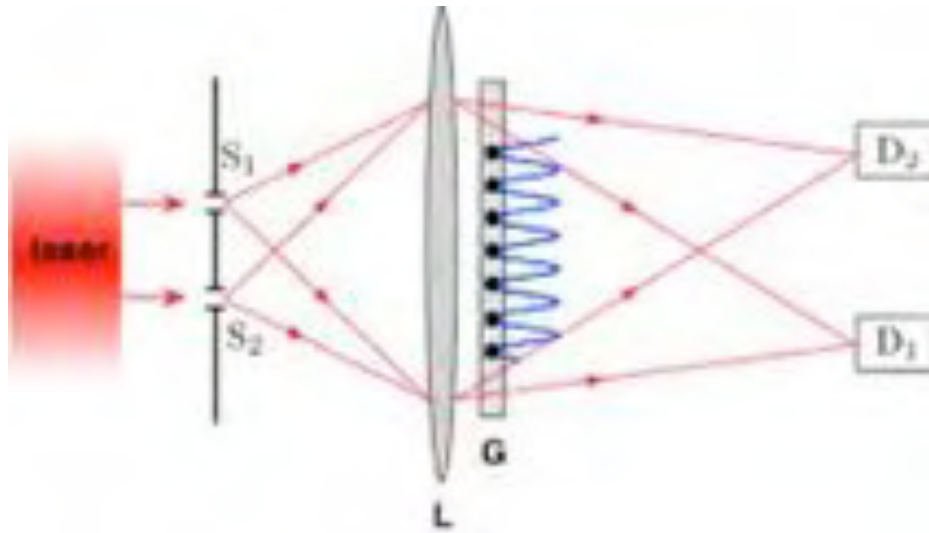
$$V^2 = 0.13 \pm 0.05$$

$$D^2 = 0.83 \pm 0.05$$



en accord avec l'inégalité de complémentarité

Où est l'erreur d'Afshar ?



Le dispositif de mesure est constitué par le réseau de fils, qu'il faut prendre en compte pour évaluer de façon complémentaire le contraste des interférences et l'information sur le "chemin-suivi" par le photon

Manip erronée devenant controverse !

Editorial: Keep science fair, and keep it clean

17 February 2007

From New Scientist Print Edition. [Subscribe](#) and get 4 free issues.

CONFLICT and science are inseparable partners. Having thought up a bold idea and a way to test it, researchers must convince other scientists that their idea is better than the prevailing one. This is an exacting, time-consuming and often painful business - and sometimes it goes awry.

This week a paper is published by a young researcher named Shahriar Afshar describing an experiment that he believes explodes an 80-year-old orthodoxy in quantum theory (see "Quantum rebel wins over doubters"). It has been a long road. Afshar failed to post his paper on the Arxiv database apparently because of a mix-up over his affiliation. Journals rejected it out of hand. *New Scientist* covered his work after quantum physicists advised us that, right or wrong, it raised important issues. Regrettably, Afshar was then chastised for talking to the press.

Aspiring scientists should expect to run the gauntlet of their peers, but they should not have to put up with the abuse to which Afshar was subjected, including attacks on his honesty and his religion. Why the extreme reaction? Perhaps people thought an experiment as simple as his must be wrong. Perhaps those who interpret quantum theory are unused to seeing their pronouncements put to the test. Whatever the reason, there can be no excuse for this kind of treatment.

Today's technology lets us test the thought experiments that led Niels Bohr to his strange interpretation of the quantum world, and young researchers should be encouraged to use it to the full to question such ideas and delve deeper into reality. Personal insults will do nothing for them or for scientific progress. It is entirely the wrong kind of conflict.

From issue 2591 of *New Scientist* magazine, 17 February 2007, page 3

