

Mécanique Quantique

L3 - Physique 2021-2022

*Paul-Antoine Hervieux
Unistra/IPCMS
hervieux@unistra.fr*

2) Dualité Onde-Corpuscule

Dualité Onde-Corpuscule

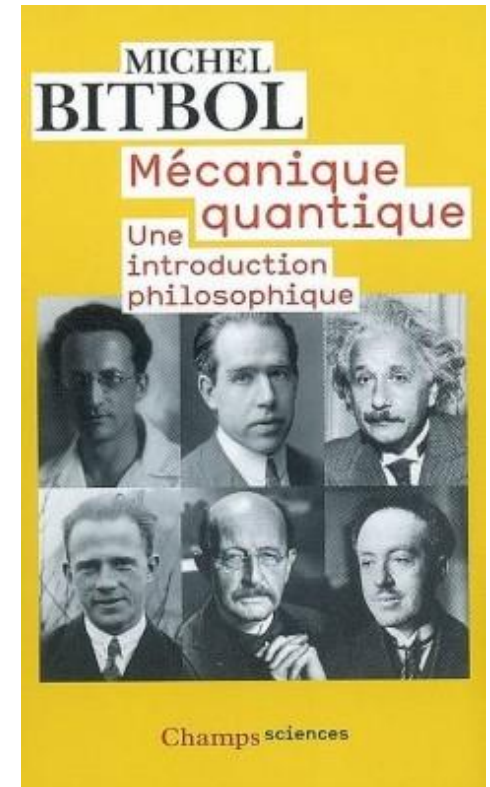
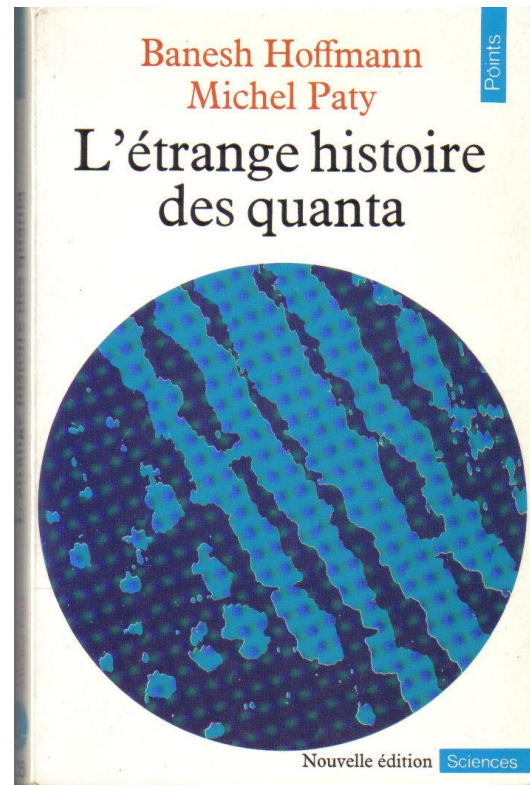
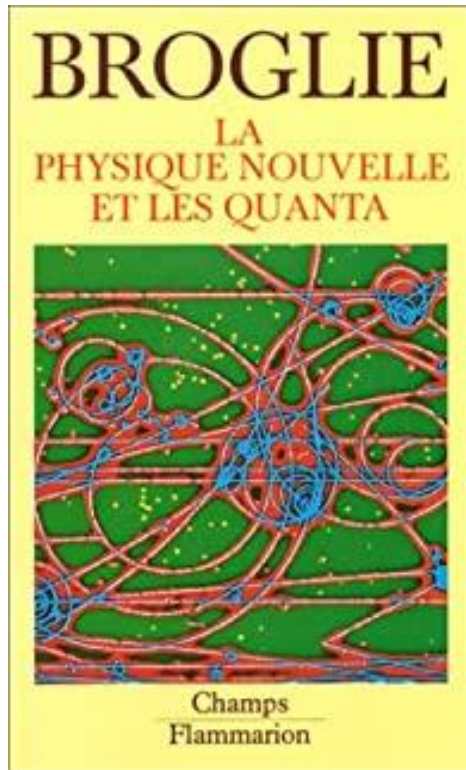
Deuxième phase de la mécanique quantique
- **dualité onde-corpuscule** -

1914-1924

Première Guerre mondiale

Thèse Louis de Broglie

Dualité Onde-Corpuscule



Dualité Onde-Corpuscule

Isaac Newton



(1642-1727)

Christiaan Huygens



(1629-1695)

Dualité Onde-Corpuscule

Question centrale de l'Optique au milieu du XVII^{ème}:

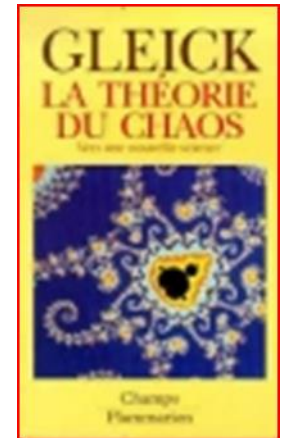
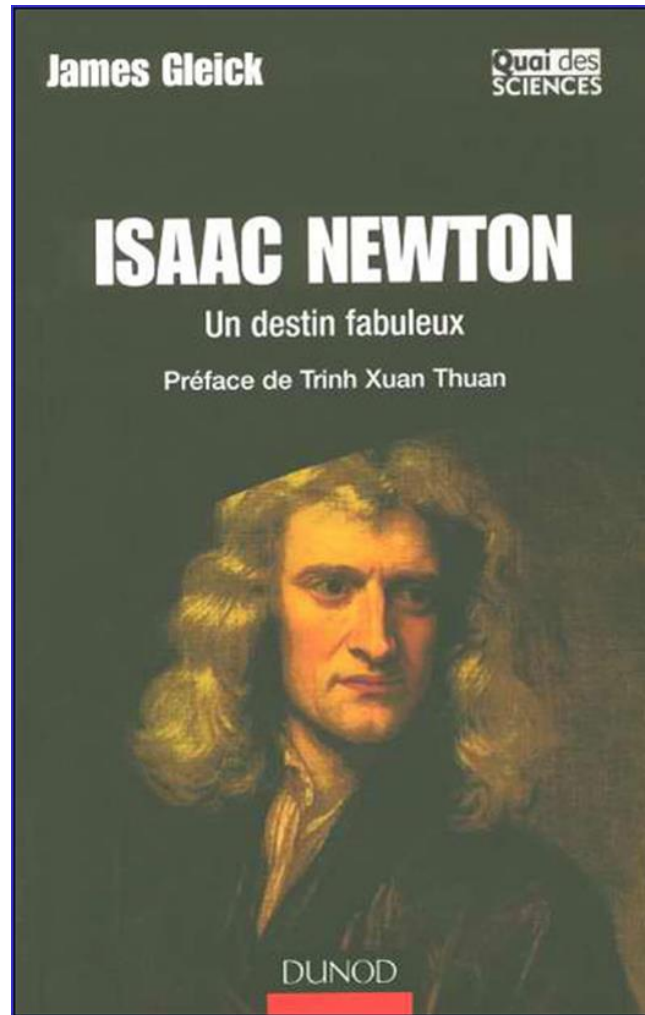
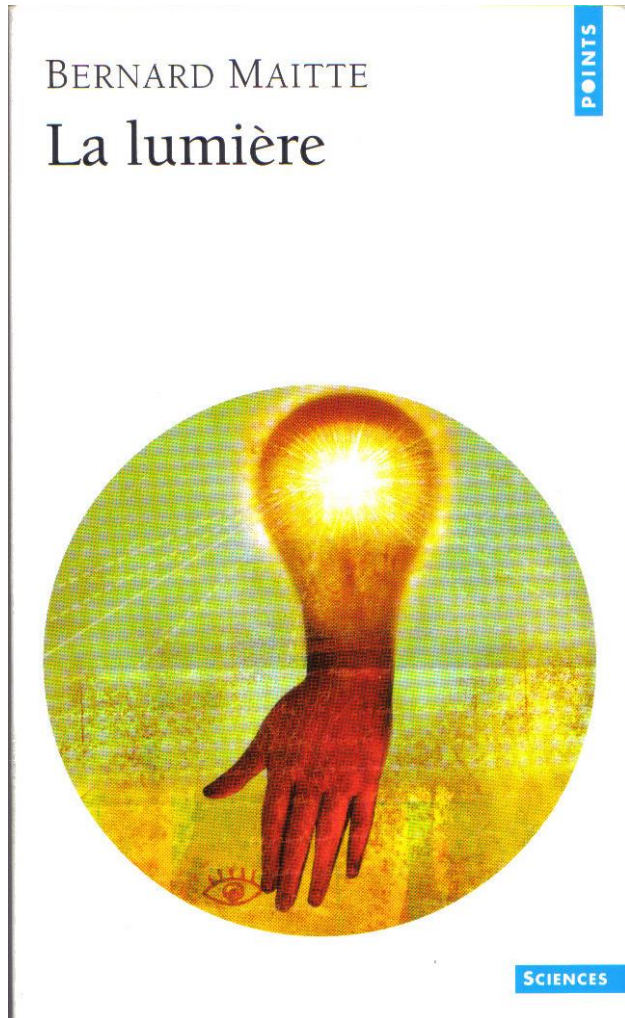
Comment la lumière voyage-t-elle, et sous quelle forme transporte-t-elle cette énergie ?

Deux écoles s'affrontent

Newton: ce sont des corps matériels, ou des particules qui transportent l'énergie (**théorie de l'émission**)

Huygens: ce sont des ondes qui transportent l'énergie (**théorie des ondes**)

Dualité Onde-Corpuscule

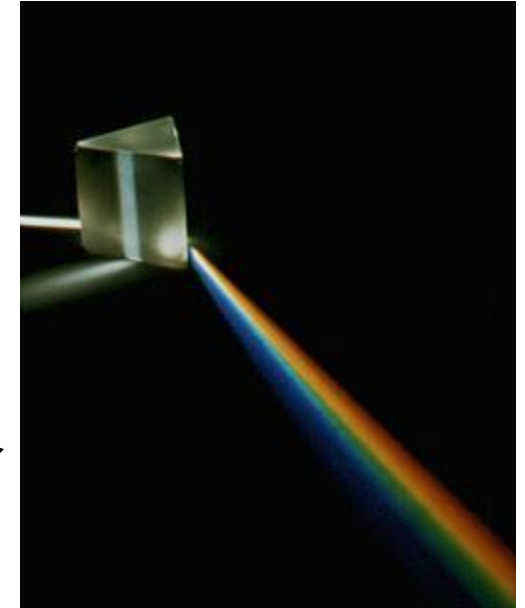
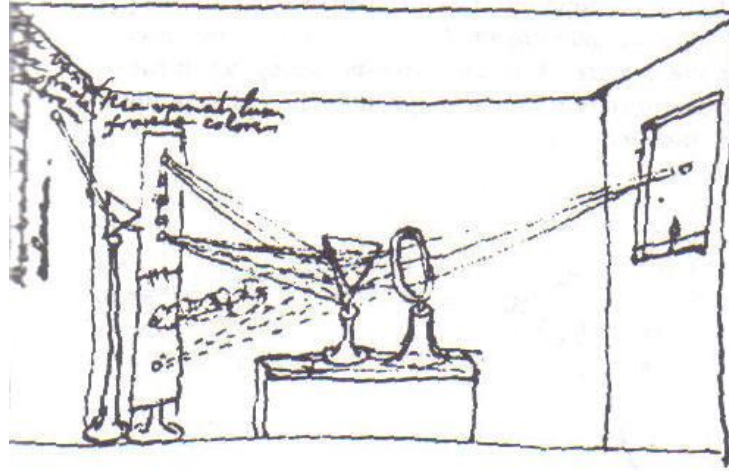


Théoricien de l'émission

Dualité Onde-Corpuscule

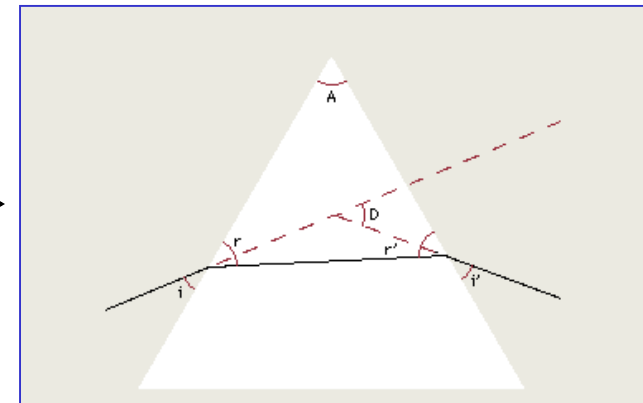


Prisme de Newton (1666)

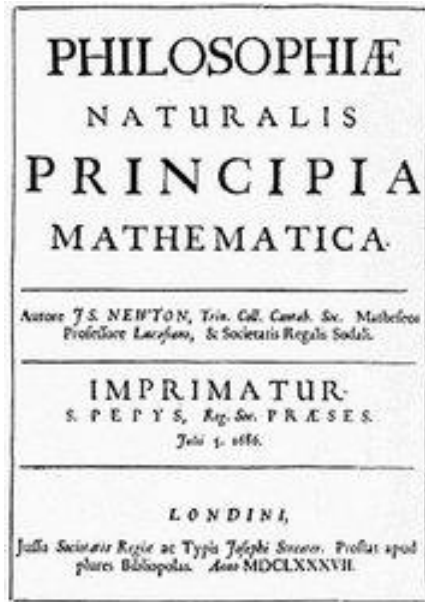


Lumière décomposée par un prisme

Lorsqu'un faisceau de lumière traverse un prisme, il est réfracté et décomposé en rayonnements monochromatiques.

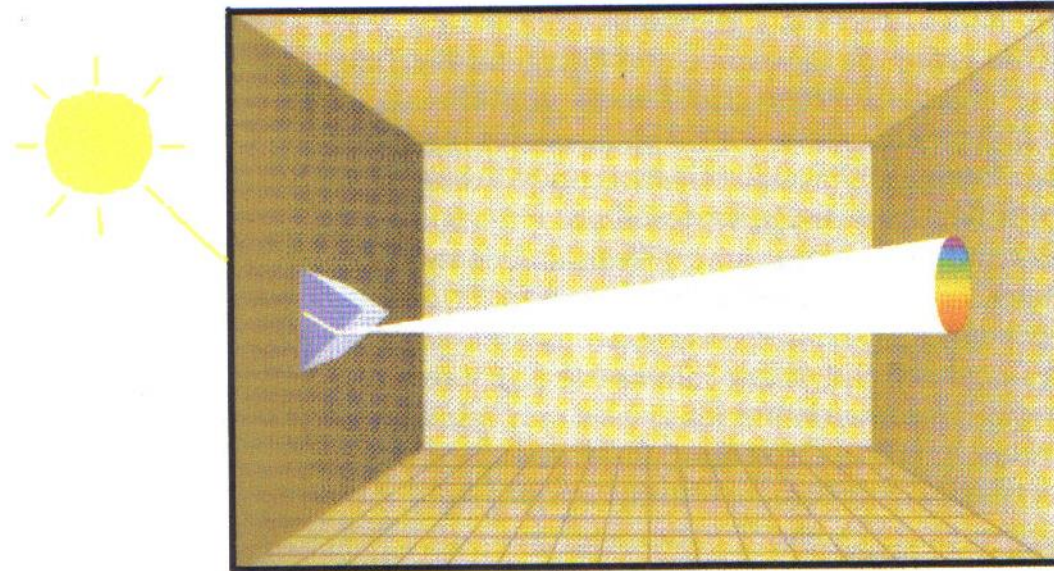
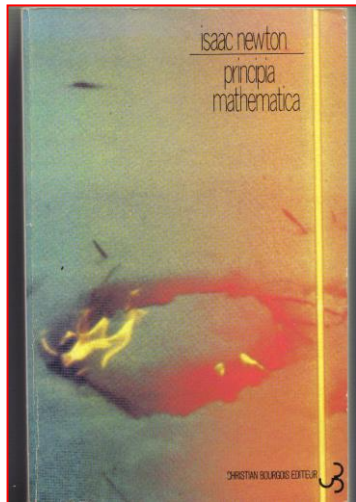


Dualité Onde-Corpuscule



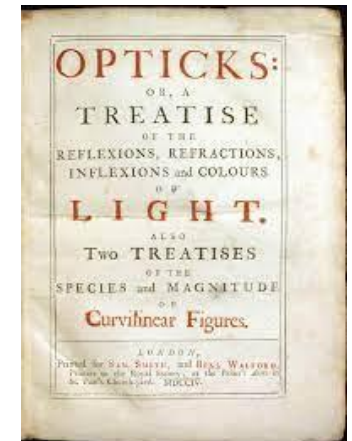
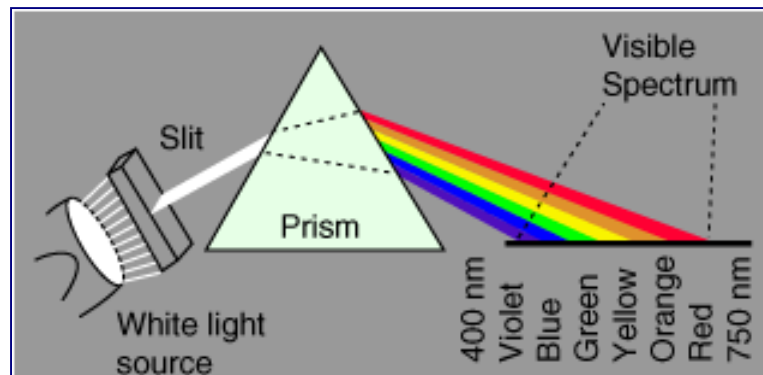
(1687)

-Gravitation-

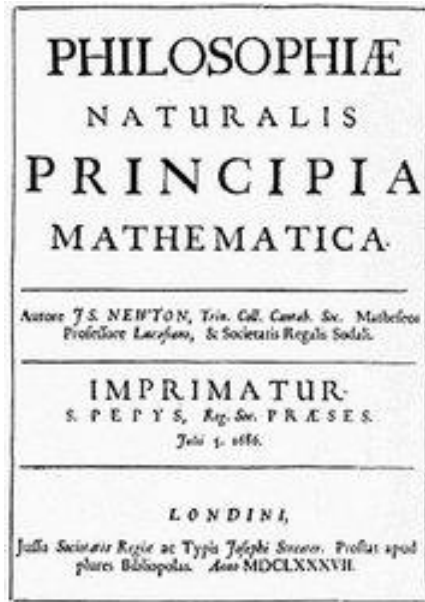


L'expérience de NEWTON : La décomposition de la lumière

(1704)

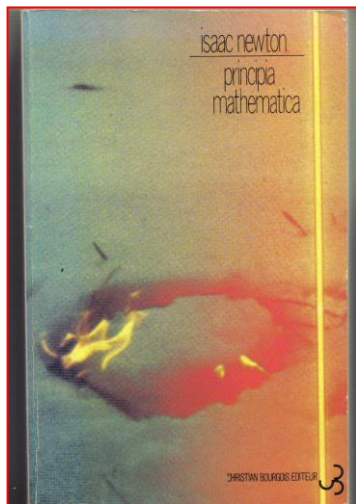


Dualité Onde-Corpuscule



(1687)

-Gravitation-



Émilie du Châtelet



EXPOSITION ABREGÉE
DU SYSTÈME
DU MONDE,

ET EXPLICATION DES PRINCIPAUX
Phénomènes astronomiques tirés des Principes de
M. Newton.

INTRODUCTION.



LES Philosophes ont commencé par avoir sur
l'Astronomie, comme sur le reste, les mêmes idées
que le peuple, mais ils les ont rectifiées; ainsi on
a commencé par croire que la terre étoit plate, &
qu'elle étoit le centre autour duquel tournoient tous
les corps célestes.

Les Babyloniens, & ensuite Pythagore & ses Disciples, ayant découvert

(1706-1749)



Elle est renommée pour sa traduction en français des Principia Mathematica de Newton.

*La traduction et les commentaires des Principia de Newton par Émilie du Châtelet
Claudine Hermann*

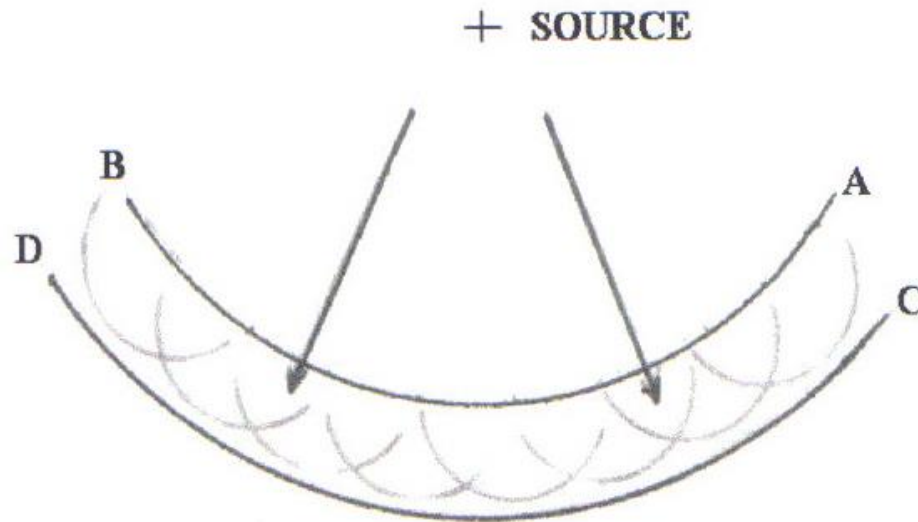
<https://journals.openedition.org/bibnum/722>

Dualité Onde-Corpuscule

La théorie corpusculaire de Newton

Isaac Newton, père de la théorie de la gravitation, se pencha assez tôt sur le problème de la nature de la lumière. Selon lui, la lumière est composée de corpuscules soumis à l'action de forces. De ce fait, Newton en fait une étude purement mécanique. Cela donna une grande crédibilité à sa théorie (la mécanique de l'époque est en pleine expansion) malgré les multiples incohérences que comporte son modèle. Il commence par lire les ouvrages de Kepler, Barrow et Hooke traitant du phénomène des couleurs. Il se procure un prisme et entreprend des expériences qui le mènent à la question suivante: les couleurs font-elles partie de la lumière ou sont-elles créées par la surface réfléchissante ? Après plusieurs expériences supplémentaires, il en arrive à la conclusion que les couleurs appartiennent à la lumière et postule que les corpuscules qui la composent sont de type différents, ce qui donne une impression de « couleur ». En ce qui concerne la réflexion, Newton se heurte à plusieurs problèmes et confronte sa théorie à celle de Descartes qui assimile la réflexion à un rebond de la lumière sur la surface des objets. Or, si la cause était effectivement un rebond, celui-ci résulterait des chocs des particules de lumière sur les particules constitutives des corps; l'intensité de la réflexion étant la plus grande dans le vide, il devrait y avoir plus de parties constitutives dans le vide que dans le verre ! Newton ne peut que rejeter le modèle cartésien. Selon les principes de sa nouvelle mécanique, la déviation ne peut alors que résulter de l'action d'une force. Selon lui, cette force est perpendiculaire à la surface de réflexion et s'exerce au point où la lumière frappe la surface. Elle agit à très faible distance et son intensité décroît avec l'éloignement du plan. Pourtant un même rayon peut-être ou réfléchi ou réfracté par un même milieu. Newton le sait et tente de résoudre ce problème par le calcul. Il retrouve ainsi les lois de Descartes et postule que la vitesse de la lumière doit être plus grande dans les milieux à fort indice que dans ceux à faible indice. Cette conclusion avait déjà été qualifiée d'absurde par Fermat et Grimaldi. Newton répond alors que « les corps transparents [doivent avoir] assez de pores libres pour transmettre la lumière sans obstacle ». Si la force réfractante est assez intense, il y a réflexion, sinon la lumière est juste déviée et c'est la réfraction. Newton parvient ainsi à résoudre le paradoxe précédent. Il va même plus loin en expliquant la dispersion des couleurs dans un prisme en postulant que les particules de lumière ont des masses différentes. Elles sont donc déviées différemment selon la relation fondamentale de la dynamique : $F = m \cdot a$ et il en va de même pour la diffraction de Grimaldi. Newton peut donc formuler sa théorie de la lumière: ***elle est composée de corpuscules de masses différentes émis par une source et qui se propagent dans le vide. Lorsqu'elles arrivent à la surface d'un milieu, ces particules subissent l'action d'une force réfringente excitée par eux, perpendiculaire à cette surface, proportionnelle à la densité du corps heurté et qui s'exerce à faible distance de celui-ci. Cette force, en déviant la trajectoire des corpuscules cause à la fois la réflexion, la réfraction, la dispersion et la diffraction.*** Cependant, Newton sait que sa théorie est loin d'être parfaite. L'idée d'une seule force est séduisante mais comment se fait-il qu'un seul pinceau monochromatique subisse des effets différents, *en même temps*, comme la réflexion partielle lors de la réfraction ? Grimaldi n'avait-il pas précisé que la diffraction ne s'apparente nullement avec les phénomènes de réflexion et de réfraction ? Devant ces incohérences, Newton va utiliser toute une série d'artefacts, il va réintroduire l'éther et les ondes, dissimuler ses erreurs sous des artifices de langage dans ses Traités, aboutir à des insuffisances toujours plus grandes, il attendra trente-quatre ans avant qu'en 1704, Hooke et Huygens morts, il décide de publier ses travaux menés de 1666 à 1670, il parvient même à expliquer l'optique par sa théorie de la gravité ! Newton n'est plus maître de ses explications. Il le sent et il abandonne la physique pour l'alchimie. Parallèlement, en Europe, Huygens a eu le temps de fonder sa théorie ondulatoire de la lumière.

Dualité Onde-Corpuscule

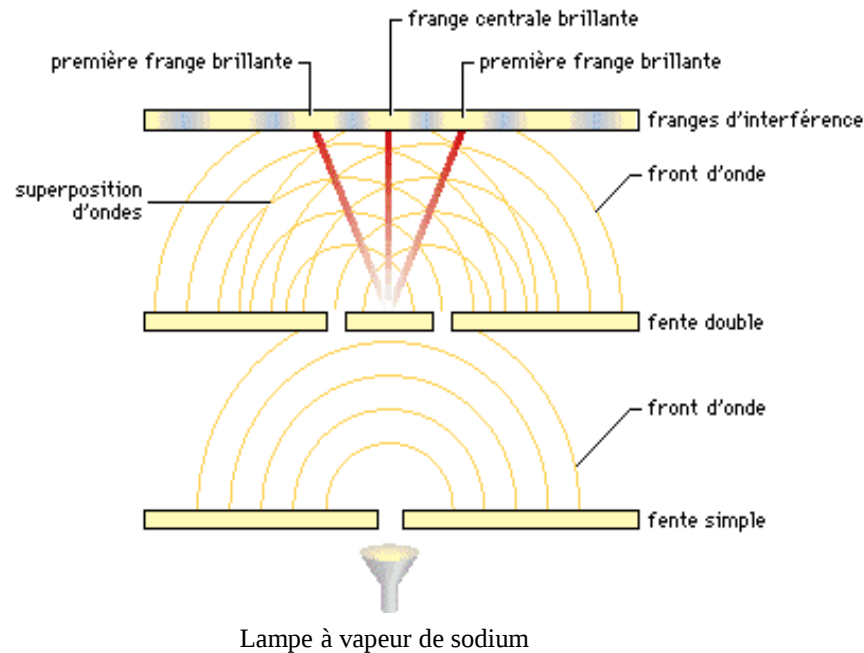


Le principe de HUYGENS utilisé pour déterminer le front d'onde CD quand AB est donné

Huygens est à l'origine de la théorie ondulatoire de la lumière: chaque point d'ondes en mouvement est lui-même source de nouvelles ondes.

Dualité Onde-Corpuscule

Le fentes de Thomas Young (1801)



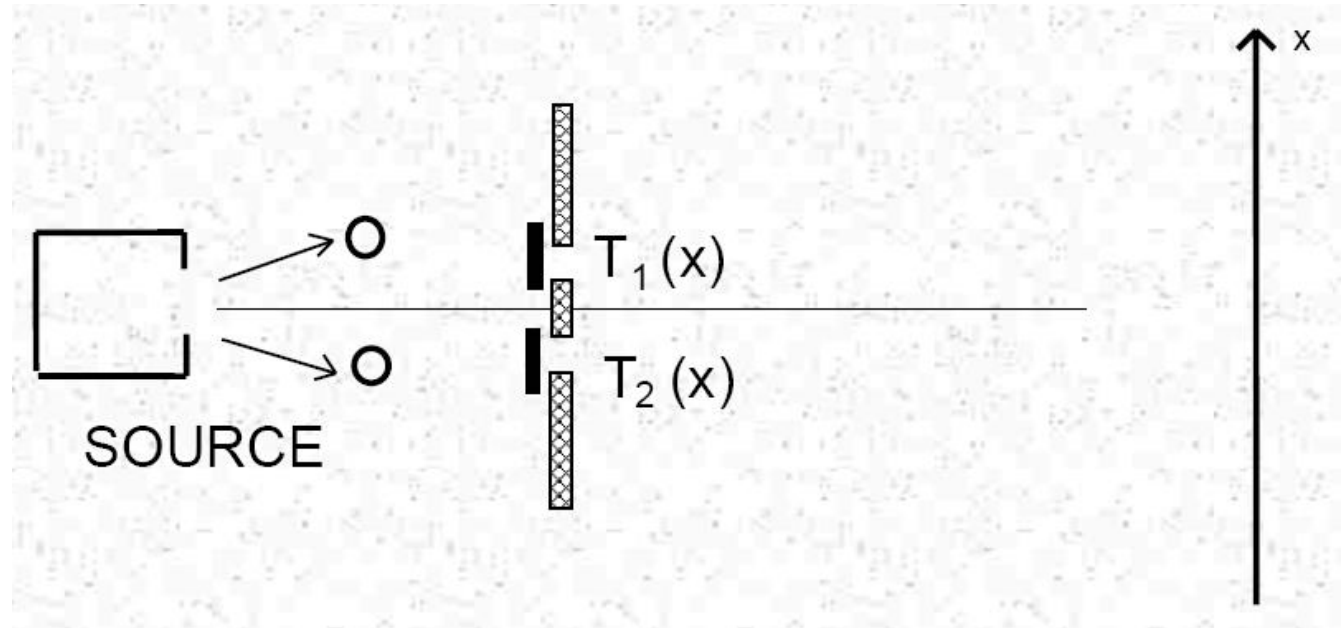
Nature ondulatoire de la lumière

Expérience *cruciale* car elle vérifie définitivement
la théorie ondulatoire de **Huygens**

Dualité Onde-Corpuscule



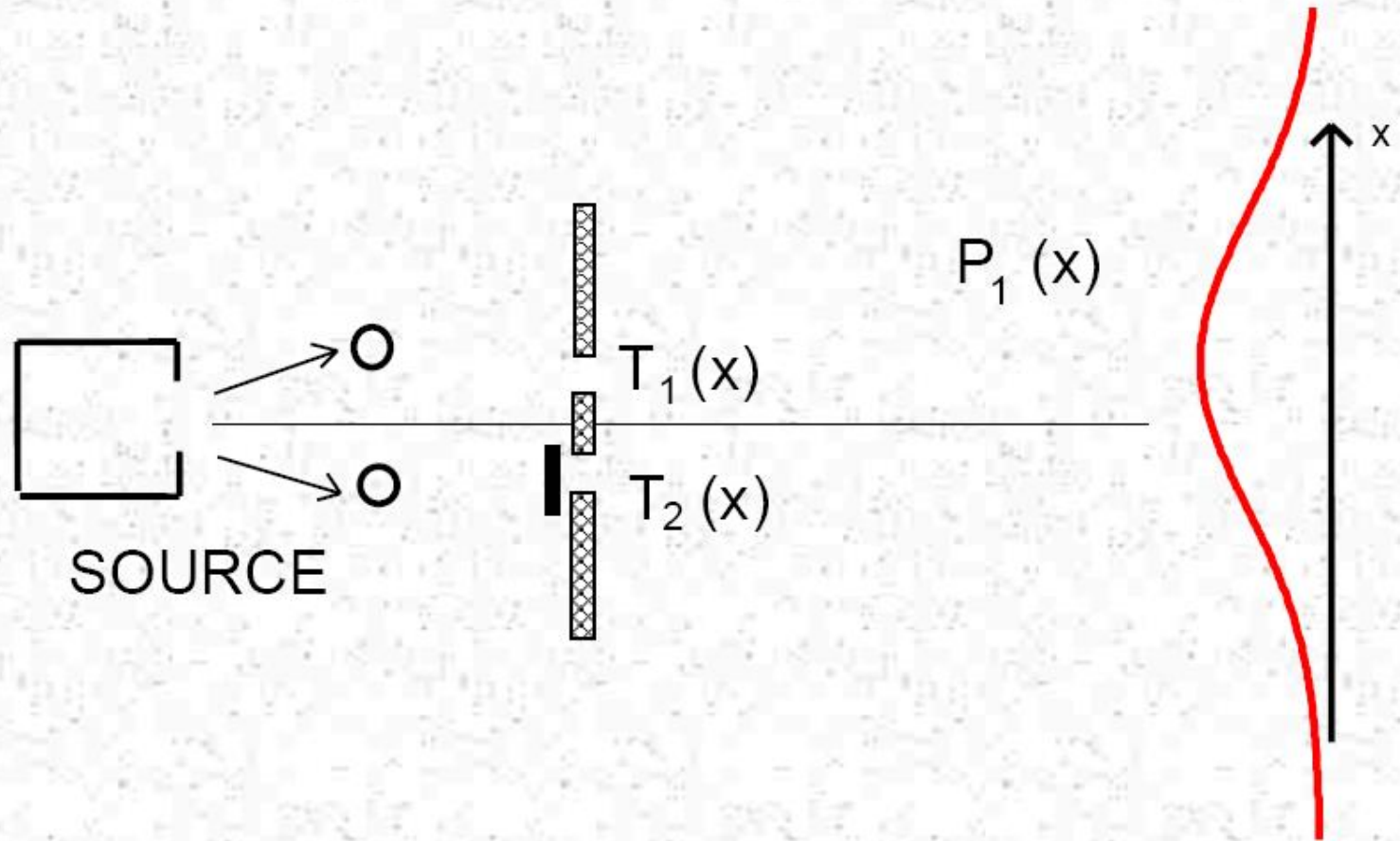
Thomas Young (1773-1829)



Phénomène d'interférence (**1801**)

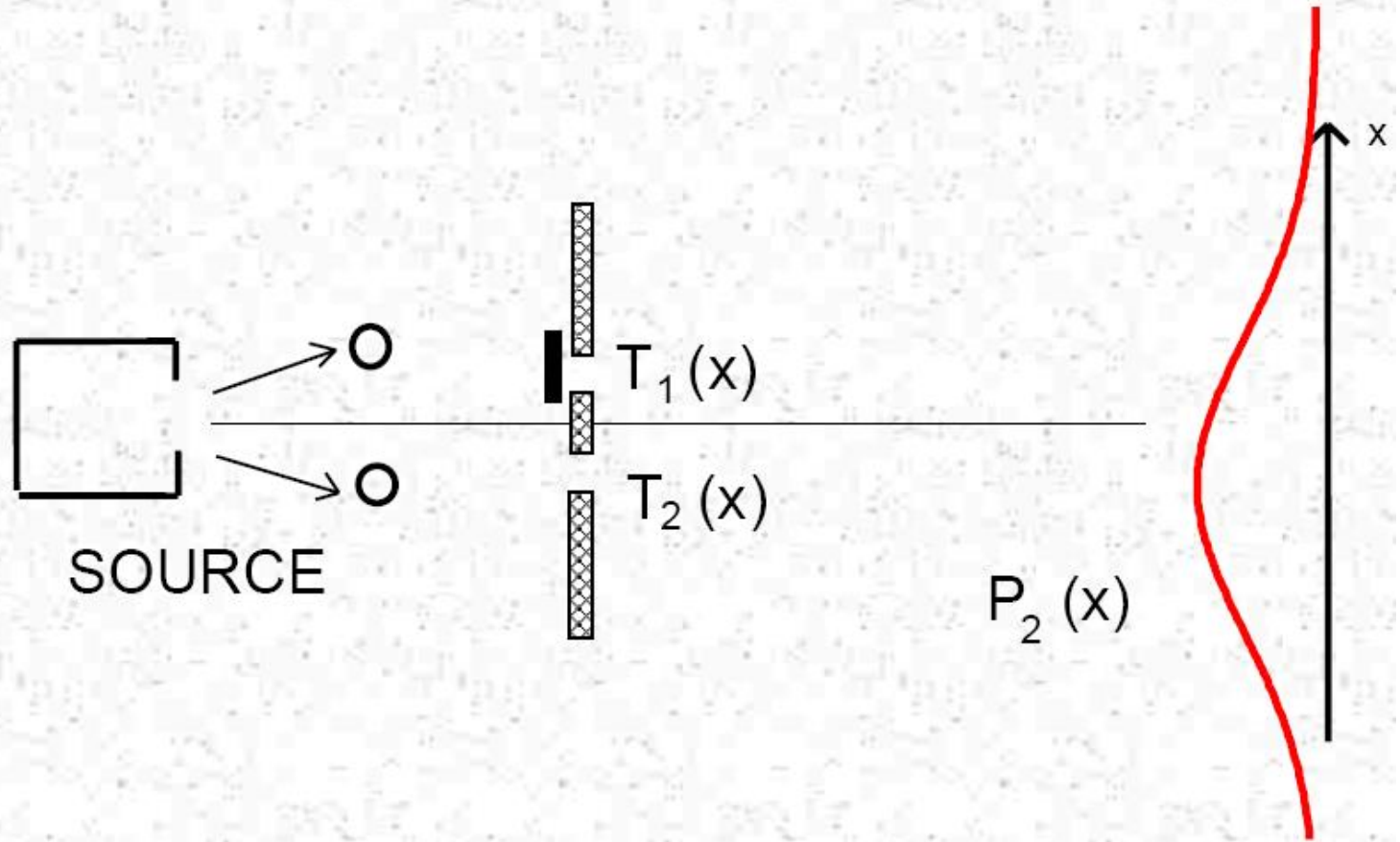
Dualité Onde-Corpuscule

1^{ère} fente ouverte : patatoïde



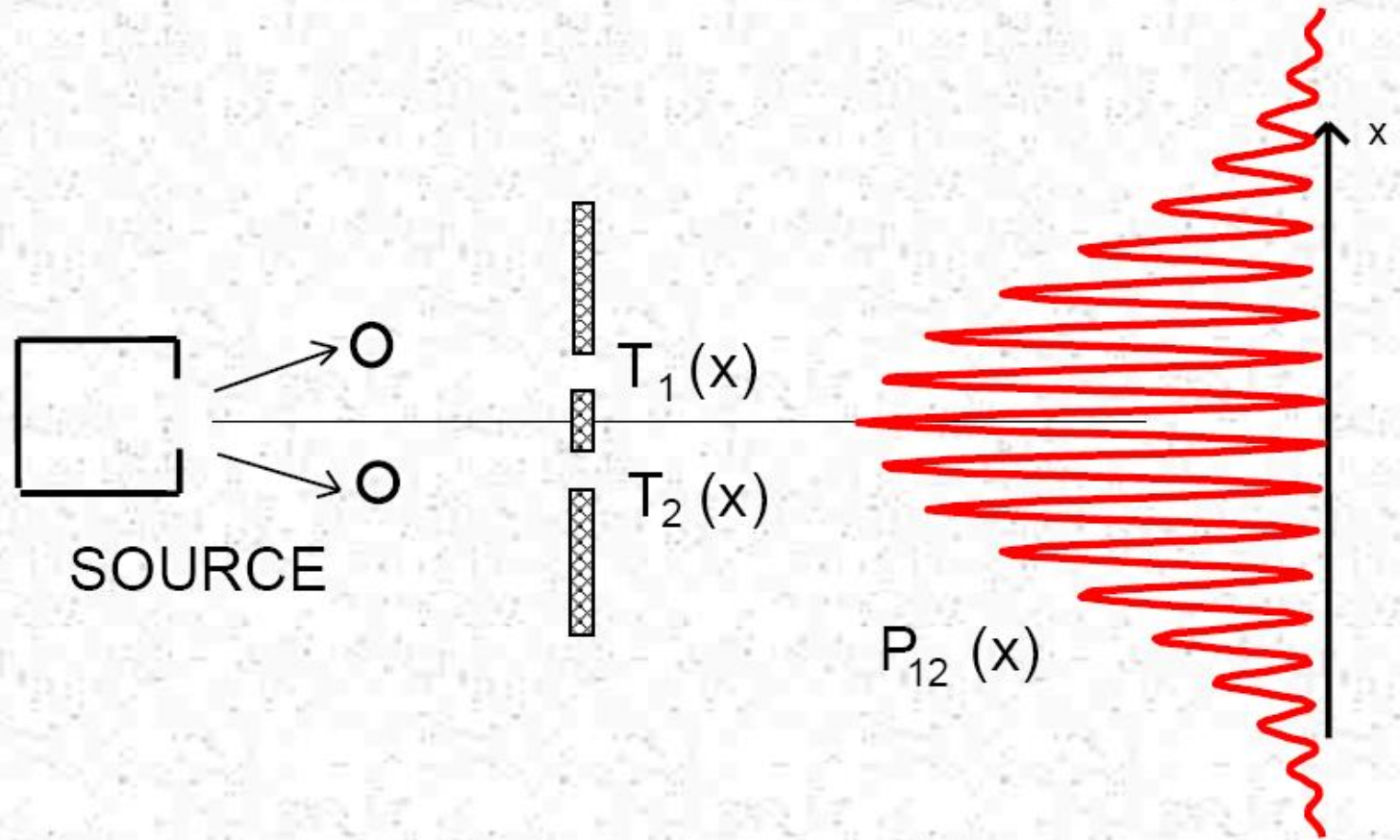
Dualité Onde-Corpuscule

2^{ème} fente ouverte : patatoïde



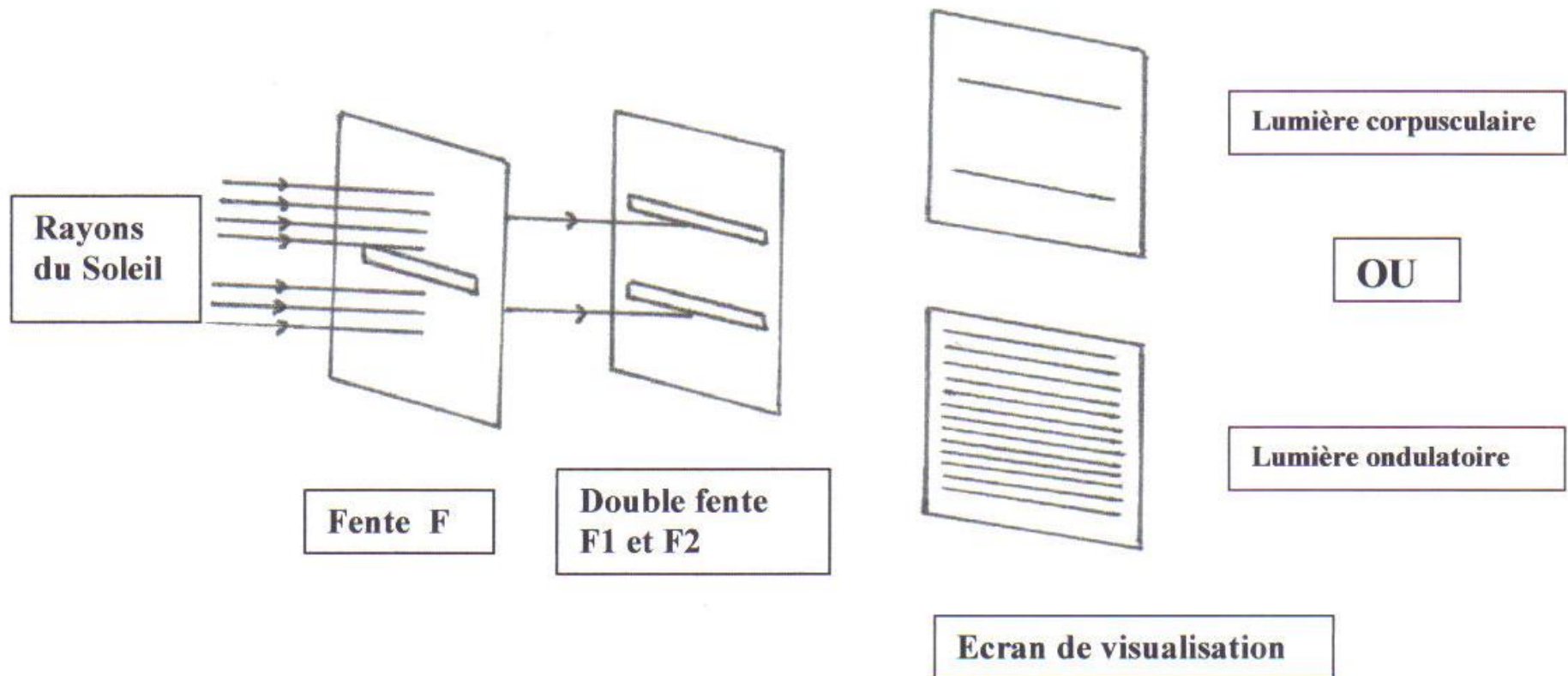
Dualité Onde-Corpuscule

Les 2 fentes ouvertes : franges d'interférences



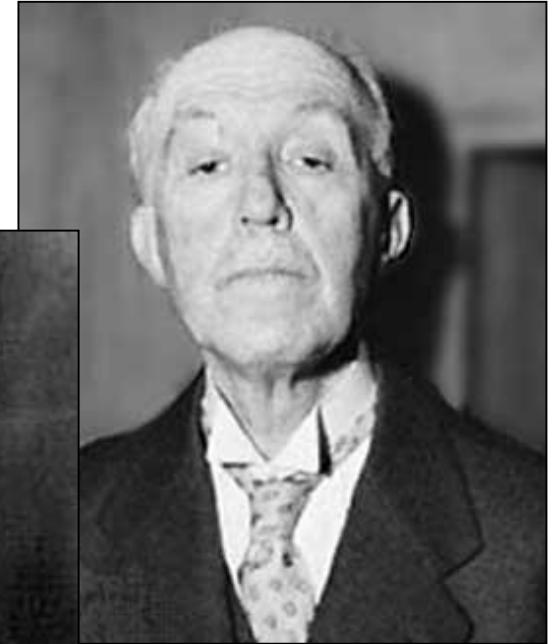
Dualité Onde-Corpuscule

En résumé...



Dualité Onde-Corpuscule

Louis de Broglie (1892-1987)



Dualité Onde-Corpuscule

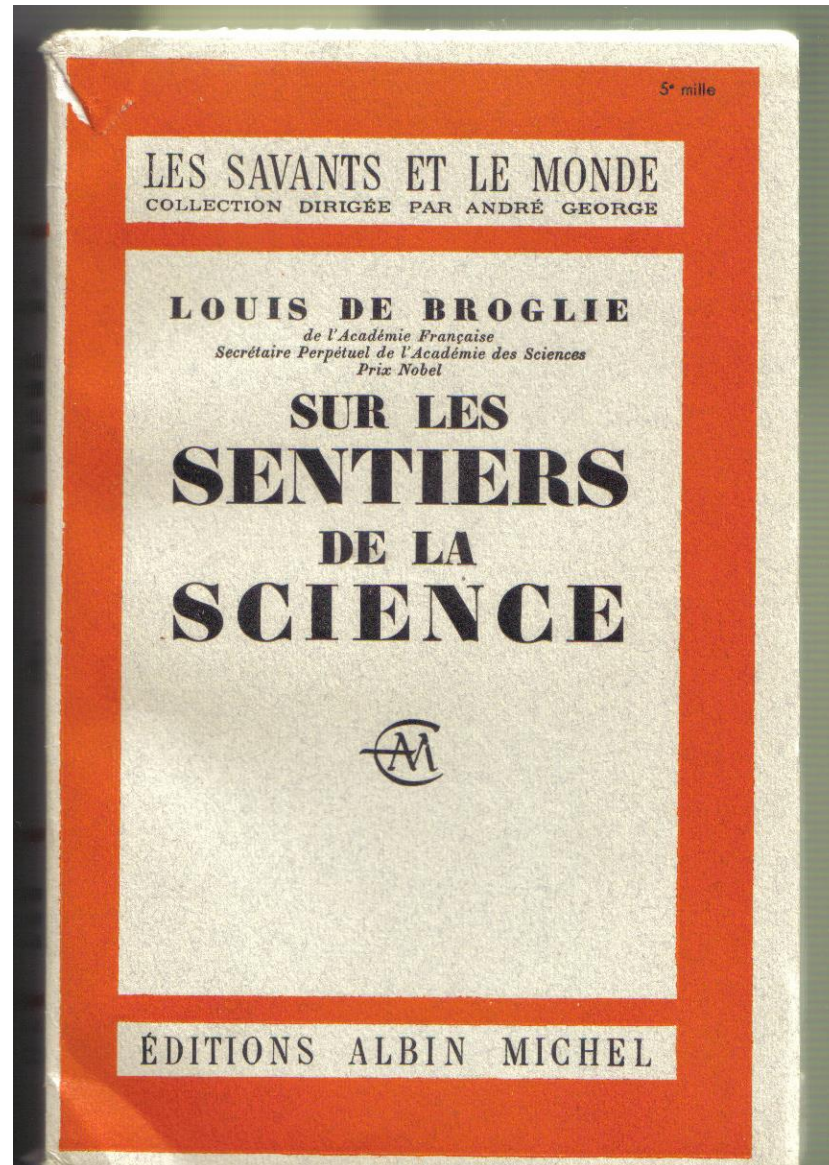
Louis de Broglie (1892-1987)

Un duc au pays des quanta...

Issu d'une illustre famille, Louis de Broglie se destine d'abord aux disciplines littéraires. A 18 ans, il obtient une licence d'histoire. Puis il passe une année en droit et prépare un diplôme sur la politique française au début du XVIII^e siècle. Mais à 20 ans, il commence à s'intéresser aux sciences et il sera licencié ès sciences en deux ans. Pendant la Première Guerre mondiale, Louis de Broglie est affecté au poste radiotélégraphique de la tour Eiffel et peut se consacrer à ses recherches sur les ondes radioélectriques. Au sortir de la guerre, il rejoint son frère **Maurice** et l'aide dans ses travaux sur les rayons X. Ayant acquis de nombreuses connaissances pratiques, il se lance alors dans la théorisation.

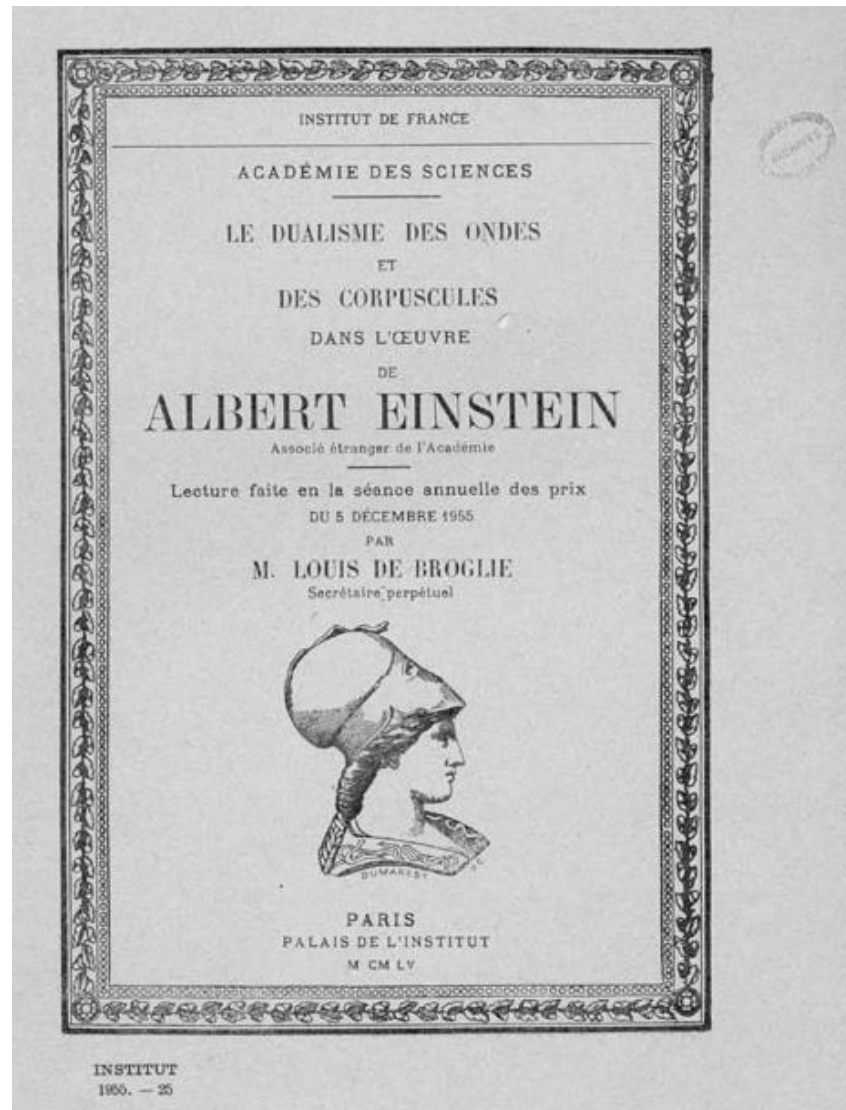


Dualité Onde-Corpuscule



Dualité Onde-Corpuscule

A. Einstein est
mort en 1955



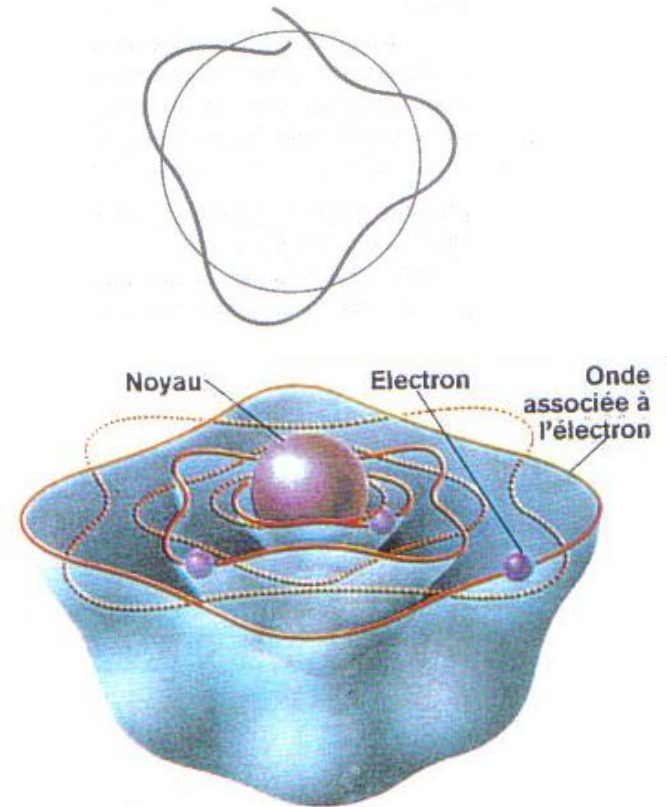
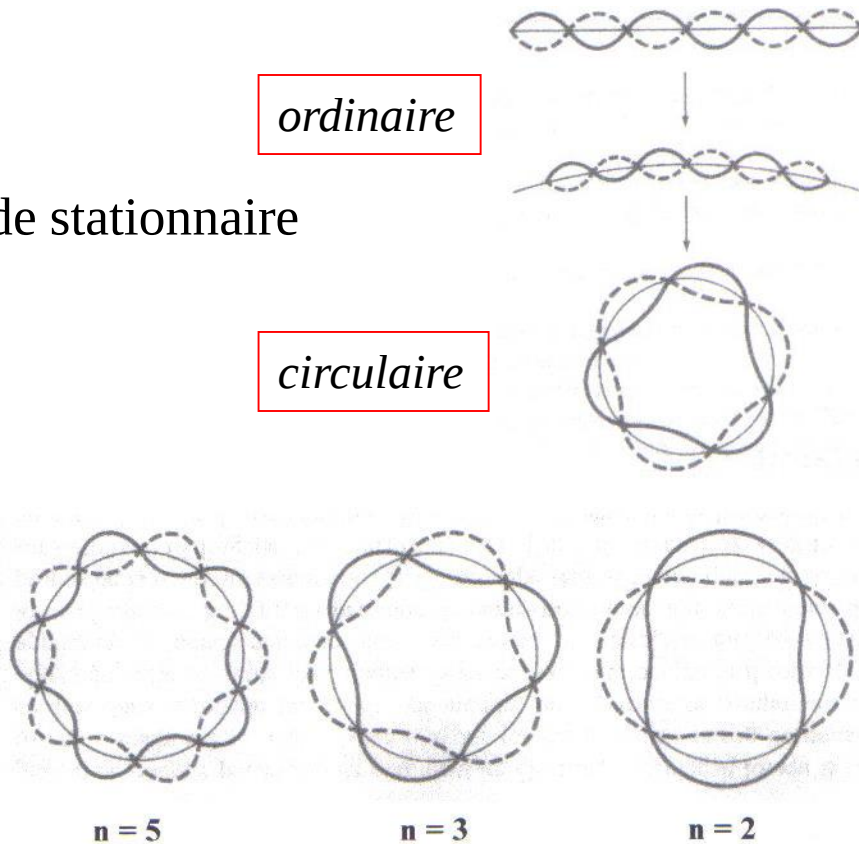
A consulter sur le site: Broglie_oc.pdf

Dualité Onde-Corpuscule

ordinaire

Onde stationnaire

circulaire



$$2\pi r_n = n\lambda \quad \text{avec} \quad \lambda = h/p \Rightarrow \oint \vec{p} \cdot d\vec{l} = nh$$

Mécanique ondulatoire

Quantification de l'action de Bohr

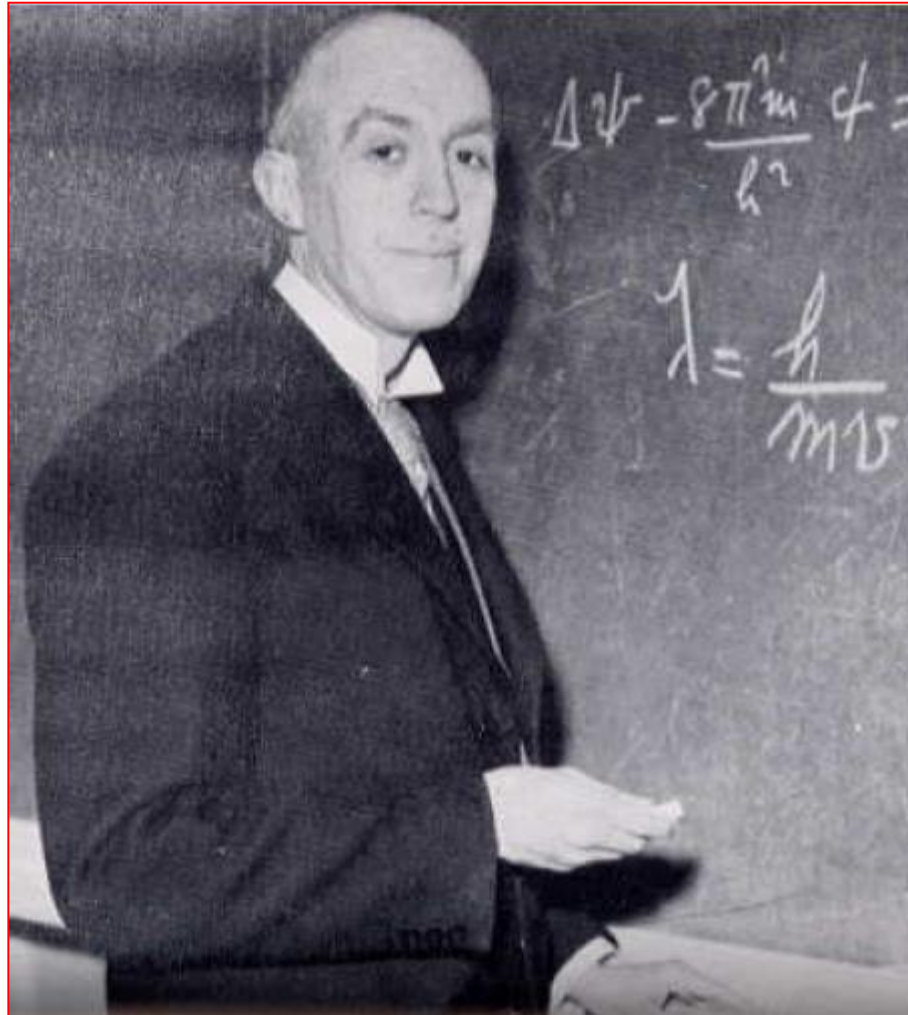
Dualité Onde-Corpuscule

matière onde



$$E = \hbar\omega$$

$$\vec{p} = \hbar \vec{k}$$



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

À toute particule de masse m on associe une onde de longueur d'onde λ

1924

Dualité Onde-Corpuscule

Thèse Novembre 1924

RECHERCHES SUR LA THÉORIE DES QUANTA

Par M. LOUIS DE BROGLIE

SOMMAIRE. — L'histoire des théories optiques montre que la pensée scientifique a longtemps hésité entre une conception dynamique et une conception ondulatoire de la lumière; ces deux représentations sont donc sans doute moins en opposition qu'on ne l'avait supposé et le développement de la théorie des quanta semble confirmer cette conclusion.

Guidé par l'idée d'une relation générale entre les notions de fréquence et d'énergie, nous admettons dans le présent travail l'existence d'un phénomène périodique d'une nature encore à préciser qui serait lié à tout morceau isolé d'énergie et qui dépendrait de sa masse propre par l'équation de Plank-Einstein. La théorie de relativité conduit alors à associer au mouvement uniforme de tout point matériel la propagation d'une certaine onde dont la phase se déplace dans l'espace plus vite que la lumière (ch. I).

Pour généraliser ce résultat dans le cas du mouvement non uniforme, on est amené à admettre une proportionnalité entre le vecteur Impulsion d'Univers (d'un point matériel et un vecteur caractéristique de la propagation de l'onde associée dont la composante de temps est la fréquence. Le principe de Fermat appliqué à l'onde devient alors identique au principe de moindre action appliqué au mobile. Les rayons de l'onde sont identiques aux trajectoires possibles du mobile (ch. II).

L'énoncé précédent appliqué au mouvement périodique d'un électron dans l'atome de Bohr permet de retrouver les conditions de stabilité quantiques comme expressions de la résonance de l'onde sur la longueur de la trajectoire (ch. III). Ce résultat peut être étendu au cas des mouvements circulaires du noyau et de l'électron autour de leur centre de gravité commun dans l'atome d'hydrogène (ch. IV).

L'application de ces idées générales au quantum de lumière conçu par Einstein mène à de nombreuses concordances très intéressantes. Elle permet d'espérer malgré les difficultés qui subsistent, la constitution d'une optique à la fois atomistique et ondulatoire établissant une sorte de correspondance statistique

entre l'onde liée au grain d'énergie lumineuse et l'onde électromagnétique de Maxwell (ch. V.)

En particulier, l'étude de la diffusion des rayons X et γ par les corps amorphes nous sert à montrer combien une conciliation de ce genre est aujourd'hui désirable (ch. VI)

Enfin, l'introduction de la notion d'onde de phase dans la mécanique statistique conduit à justifier l'intervention des quanta dans la théorie dynamique des gaz et à retrouver les lois du rayonnement noir comme traduisant la distribution de l'énergie entre les atomes dans un gaz de quanta de lumière.

INTRODUCTION HISTORIQUE

I. — Du XVI^e au XX^e siècle.

La science moderne est née à la fin du XVI^e siècle à la suite du renouveau intellectuel dû à la Renaissance. Tandis que l'Astronomie de position devenait de jour en jour plus précise, les sciences de l'équilibre et du mouvement, la statique et la dynamique se constituèrent lentement. On sait que ce fut Newton qui le premier fit de la Dynamique un corps de doctrine homogène et par sa mémorable loi de la gravitation universelle ouvrit à la nouvelle science un champ énorme d'applications et de vérifications. Pendant les XVIII^e et XIX^e siècles un grand nombre de géomètres, d'astronomes et de physiciens développèrent les principes de Newton et la Mécanique parvint à tel degré de beauté et d'harmonie rationnelle qu'on en oublia presque son caractère de science physique. On parvint, en particulier, à faire découler toute cette science d'un seul principe, le principe de moindre action énoncé d'abord par Maupertuis, puis d'une autre manière par Hamilton et dont la forme mathématique est remarquablement élégante et condensée.

Par son intervention en Acoustique, en Hydrodynamique, en Optique, en Capillarité, la Mécanique parut un instant régner sur tous les domaines. Elle eut un peu plus de peine à absorber une nouvelle branche de la science née au

Dualité Onde-Corpuscule

Maurice de Broglie (1875-1960) partageait l'opinion de Bragg quant à la double nature, corpusculaire et ondulatoire, des rayons X. Les deux frères de Broglie eurent de longues discussions sur cette question et sur l'effet photoélectrique.

En 1924, tenant compte des théories du quantum de la lumière et de la relativité restreinte établies par Einstein en 1905, Louis de Broglie associa à toute particule (comme l'électron) un caractère ondulatoire. Il était à la recherche d'une théorie synthétique du rayonnement qui puisse combiner à la fois les concepts d'onde et de particule. Sa thèse doctorale sur le sujet portait le titre *Recherches sur la théorie des Quanta*. Comme preuve expérimentale sur le caractère ondulatoire de toute entité matérielle, il avançait qu'un faisceau d'électrons devrait diffracter en passant à travers une ouverture. A Jean Perrin (1870-1942) qui lui demandait comment prouver expérimentalement ses dires, il répondit qu'on pourrait obtenir un patron d'interférences à partir des diffraction des électrons sur tes mailles d'un cristal faisant office de réseau.

Il avait une intuition profonde de la symétrie dans la nature et il supposa donc que si la lumière se comportait tantôt comme une onde et tantôt comme une particule, il se pouvait aussi que les choses que nous concevons comme des particules (les électrons et les autres corps matériels) aient peut-être aussi des propriétés ondulatoires. De Broglie émit l'idée qu'il existait entre k la longueur d'onde d'une particule de la matière et sa quantité de mouvement la même relation que pour un photon, soit l'équation $p=h/\lambda$. Autrement dit, pour une particule de masse m voyageant à la vitesse v , la longueur d'onde λ est donnée par:

$$\lambda = h/(mv).$$

Ceci est souvent appelé la longueur d'onde d'une particule.

L'idée est si ardue pour l'époque qu'elle paraît saugrenue aux rares physiciens qui la remarquent; certains savants étrangers parient même avec dérision de « comédie française ». L'avenir leur donnera grandement tort.

L'un des arguments du physicien français en faveur de la nature ondulatoire des électrons était que cette hypothèse permettait d'expliquer la théorie de l'atome d'hydrogène de Bohr. De Broglie suggéra que chaque orbite électronique dans l'atome était une onde stationnaire. Nous savons que le pincement d'une corde de violon ou de guitare génère sur la corde un grand nombre de longueurs d'onde, mais que seulement certaines d'entre elles persistent (celles qui ont des nœuds à leurs extrémités). Ces dernières sont les modes *résonants* (*modes propres de vibration*) de la corde. Toutes les longueurs d'onde interfèrent avec elles-mêmes après réflexion et leurs amplitudes tombent rapidement à zéro. Comme, dans la théorie de Bohr, les électrons suivent des trajectoires circulaires, de Broglie soutint que l'onde de l'électron devait être une onde stationnaire circulaire fermée sur elle-même (figure 1).

Dualité Onde-Corpuscule

Si une longueur d'onde n'est pas fermée sur elle-même (figure 2), il se produit des interférences destructrices au fur et à mesure que l'onde se propage sur la boucle et l'onde disparaît rapidement. Par conséquent, les seules ondes qui persistent sont celles pour lesquelles la circonférence de l'orbite circulaire contient un nombre entier de longueurs d'onde (figure 3). La circonférence d'une orbite de Bohr de rayon r_n est $2\pi r_n$; nous avons donc $2\pi r_n = n\lambda$ avec $n = 1, 2, 3, \dots$. En remplaçant λ par h/mv , on obtient

$$2\pi r_n = nh/mv \rightarrow mvr_n = nh/2\pi$$

Ceci est **exactement la condition quantique proposée par N. Bohr de façon empirique**. Et c'est de cette équation que Bohr avait tiré ses orbites et ses niveaux d'énergie discrets. Nous avons donc une explication des orbites et des états d'énergie quantifiés du modèle de Bohr: ils sont dus à la nature de l'électron et au fait que seules des ondes résonantes persistent. Ceci suppose que la **dualité onde-corpuscule** est à la base de la structure de l'atome.

Notons qu'il ne faut pas conclure, en regardant les ondes électroniques circulaires de la figure 3, que l'électron suit une trajectoire ondulée. Dans le modèle de l'hydrogène de Bohr, l'électron, considéré comme une particule, suit un cercle. L'onde circulaire, par contre, représente l'amplitude de « l'onde matérielle » de l'électron, et sur la figure 3 l'amplitude de l'onde est, par commodité, surimposée au parcours circulaire de l'orbite de la particule.

La théorie de Bohr fonctionne bien pour l'hydrogène et pour les ions à un électron. Elle ne fonctionne pas aussi bien pour les atomes à plusieurs électrons. Ces problèmes, et d'autres, conduisirent éventuellement à une nouvelle théorie radicale, la mécanique quantique, qui résolut enfin le problème de la structure atomique et transforma notre vision de l'atome: la représentation des électrons sur des orbites bien définies fut remplacée par celle de « nuages » d'électrons. Cette théorie nouvelle (et maintenant généralement acceptée) de la mécanique quantique a transformé totalement notre compréhension des mécanismes fondamentaux sous-jacents aux processus physiques.

Dualité Onde-Corpuscule

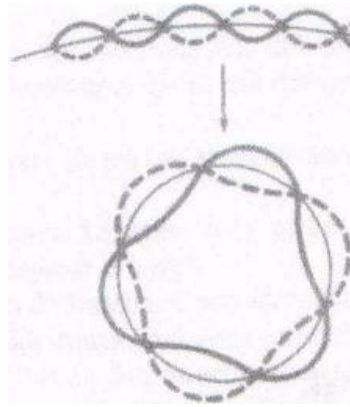


Figure 1: Comparaison entre une onde stationnaire ordinaire et une onde stationnaire circulaire.

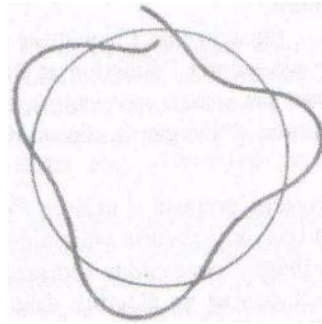


Figure 2: Lorsqu'une onde n'est pas fermée sur elle-même (et que, par conséquent, elle n'interfère pas avec elle-même) elle disparaît rapidement.

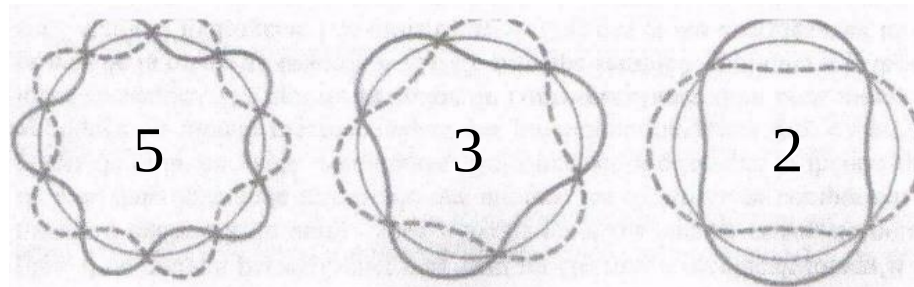
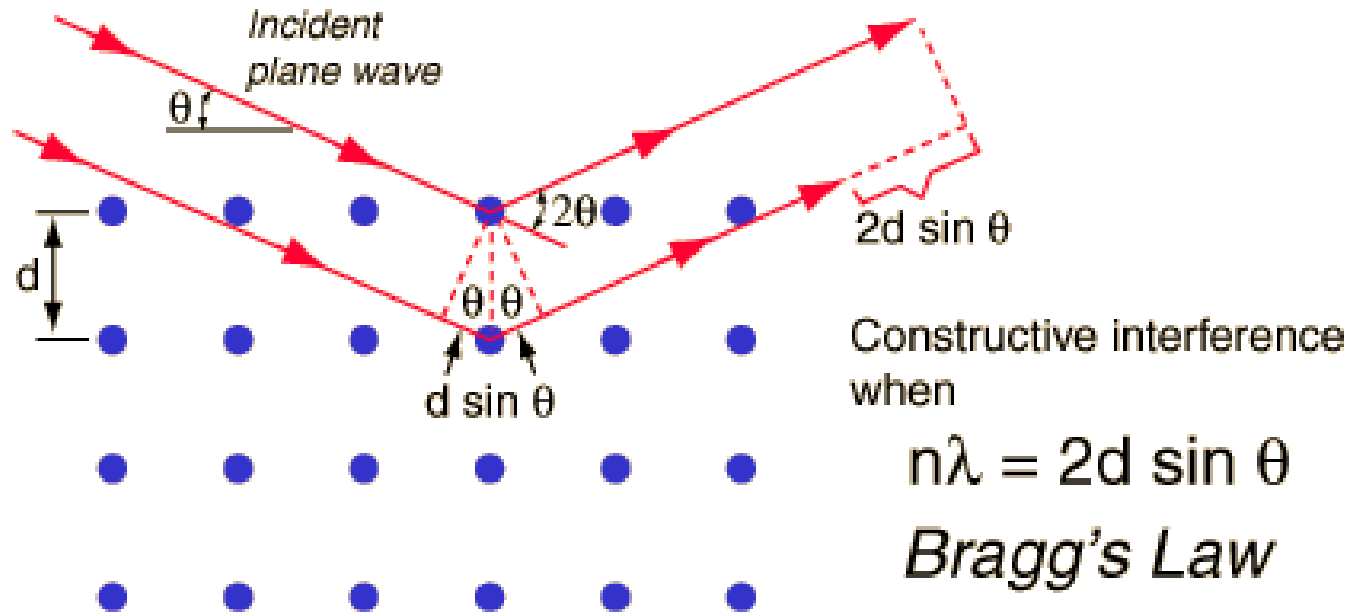


Figure 3: Ondes circulaires pour 5, 3 et 2 longueurs d'onde sur la circonférence; n est le nombre de longueurs d'onde, et est aussi le nombre quantique.

Dualité Onde-Corpuscule

1912

La loi de Bragg (rayon X)



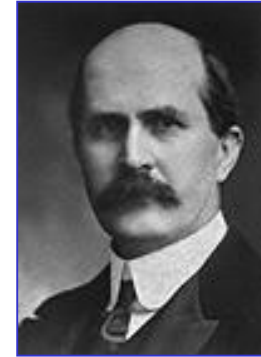
Cette loi établit un lien entre la distance séparant les atomes d d'un cristal et les angles sous lesquels sont dispersés des rayons X frappant le cristal.

Pour la première fois, on peut connaître la position exacte des atomes contenus dans les cristaux.

Dualité Onde-Corpuscule



(1890-1971)



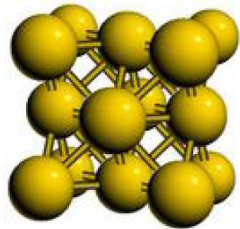
Son père

Lawrence Bragg découvre la loi dite « loi de Bragg » en **1912**, alors qu'il se trouvait au Trinity College à Cambridge. Cette loi établit un lien entre la distance séparant les atomes d'un cristal et les angles sous lesquels sont dispersés des rayons X frappant le cristal. En 1915, Lawrence Bragg et son père reçoivent le prix Nobel de physique pour leurs travaux sur la diffraction des rayons X. Ces travaux permettent de déterminer, pour la première fois, la position exacte des atomes contenus dans les cristaux, ce qui entraînera des progrès considérables dans différents domaines, en particulier en biologie moléculaire. En 1919, Lawrence Bragg succède à lord Ernest Rutherford en tant que professeur de physique à l'université de Manchester. Dans les années trente, Lawrence Bragg soutient les recherches de Max Ferdinand Perutz sur la structure des protéines globulaires. En 1937, il est nommé directeur du National Physical Laboratory et, en 1938, après le décès prématuré de Rutherford, il devient professeur de physique expérimentale à Cambridge. De 1954 à 1965, il dirige la Royal Institution à Londres. Il est anobli en 1941.

Dualité Onde-Corpuscule



Davisson (1881-1958)

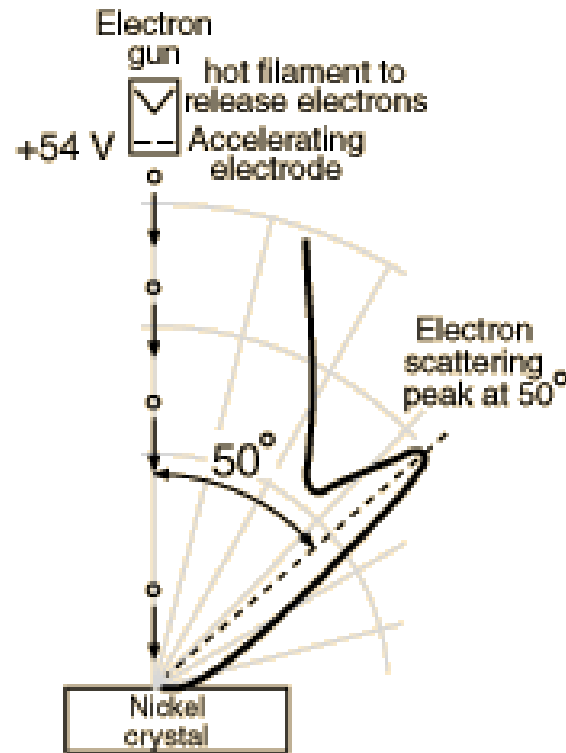


Structure cubique faces-centrées
(comme le Nickel utilisé dans
l'expérience de Davisson-Germer)

1924
de Broglie's
hypothesis

1927
Davisson-
Germer
experiment

1929
Nobel Prize
for
de Broglie



Theory

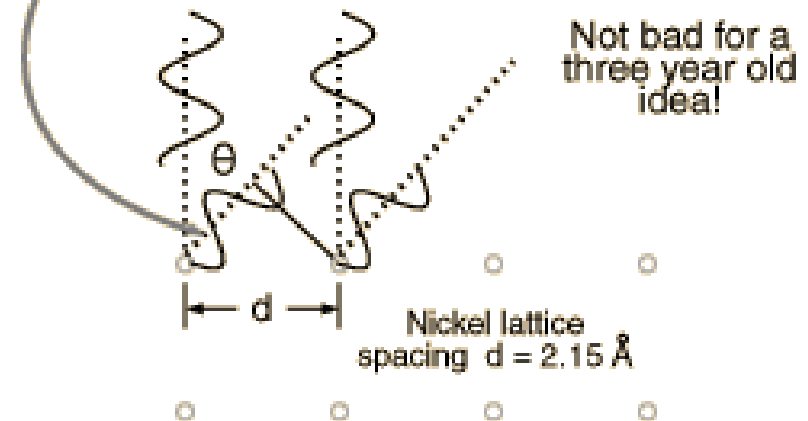
$$\lambda = \frac{h}{mv} = 1.67 \text{ \AA} \text{ for } 54 \text{ V}$$

Experiment

Pathlength difference

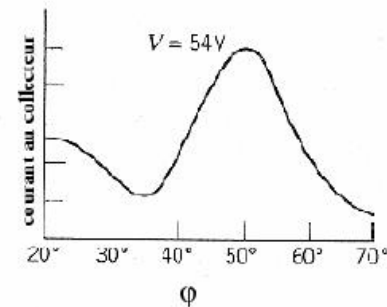
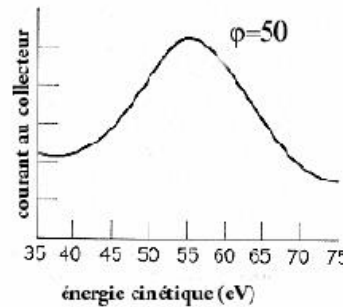
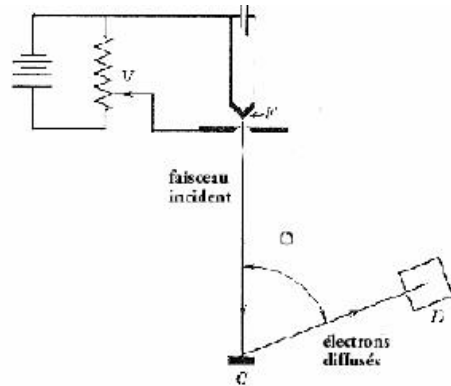
$$d \sin \theta = 2.15 \sin 50^\circ = \lambda = 1.65 \text{ \AA}$$

for constructive interference



Expérience de Davisson & Germer (1927)

Dualité Onde-Corpuscule

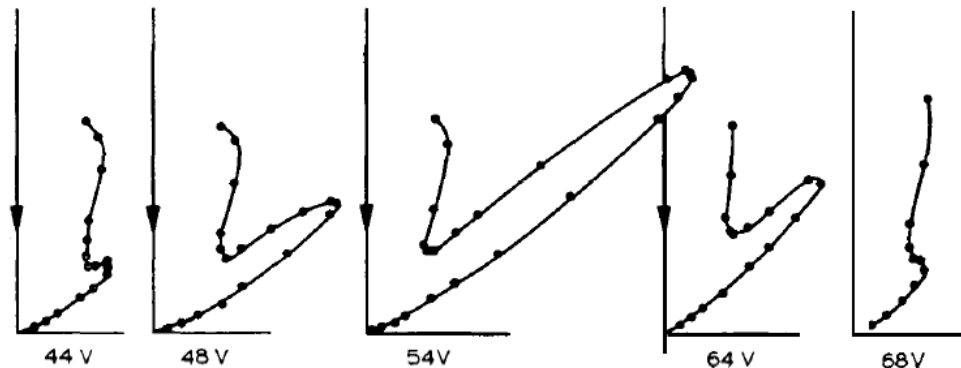


Lorsque l'énergie des électrons est fixée, on observe un maximum de diffraction à un certain angle.

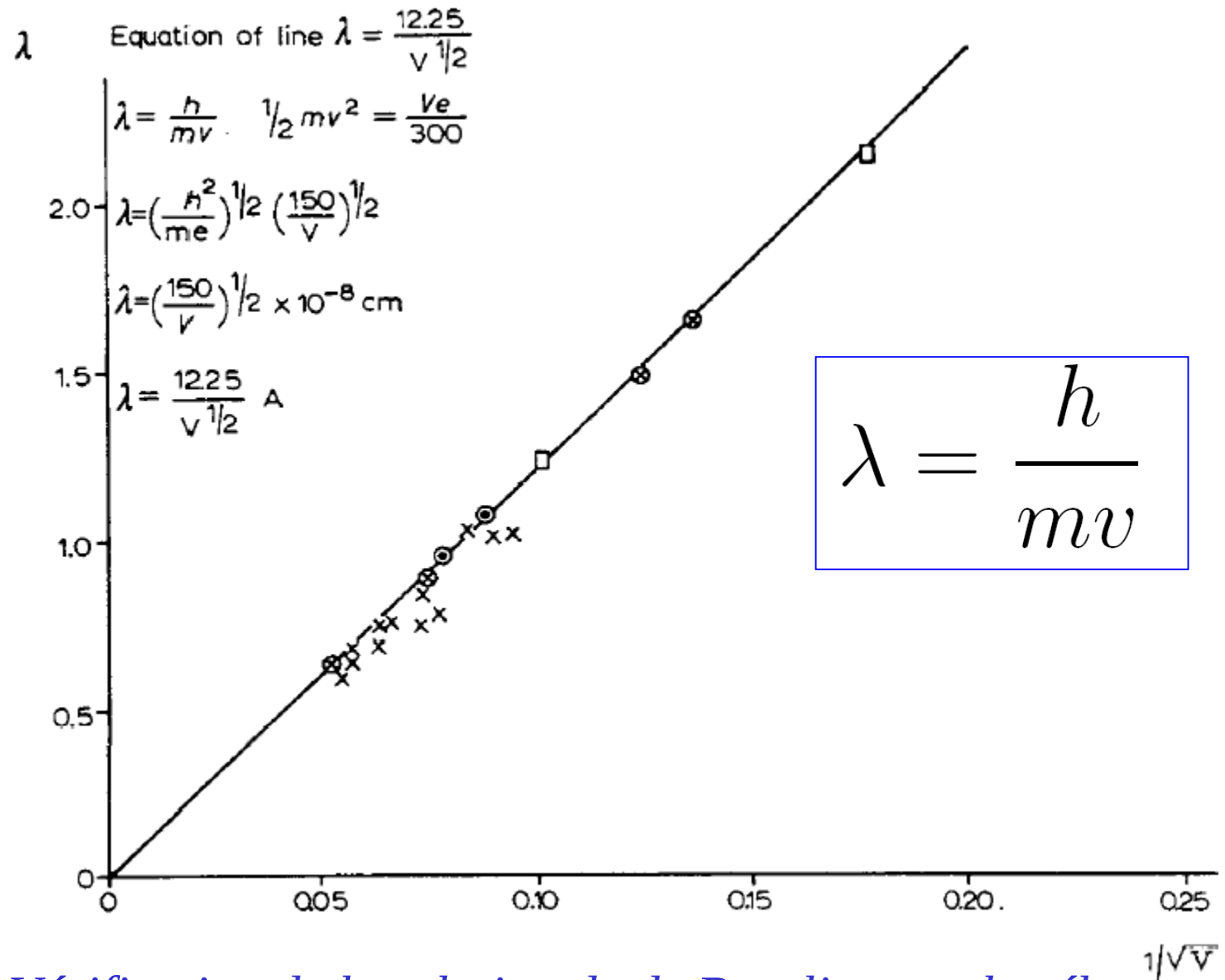
Lorsque l'angle d'observation est fixé, on observe un maximum de diffraction pour une certaine énergie des électrons incidents.

On peut diminuer l'intensité du faisceau d'électrons pour n'envoyer qu'un seul électron à la fois sur le cristal.

Sur le site: [Davisson_lecture.pdf](#)



Dualité Onde-Corpuscule



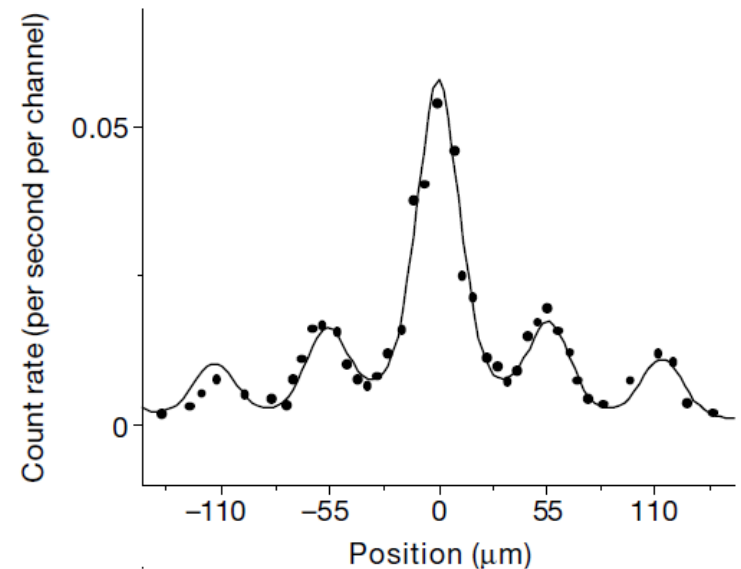
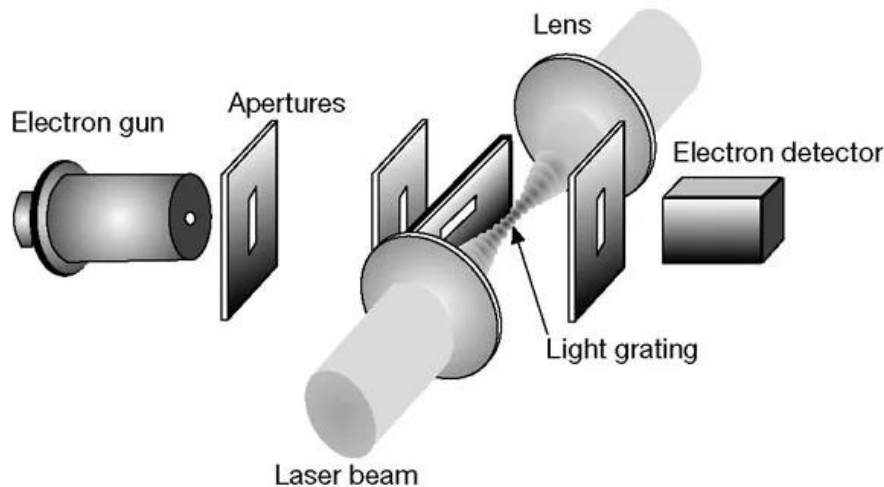
Vérification de la relation de de Broglie pour les électrons

Dualité Onde-Corpuscule

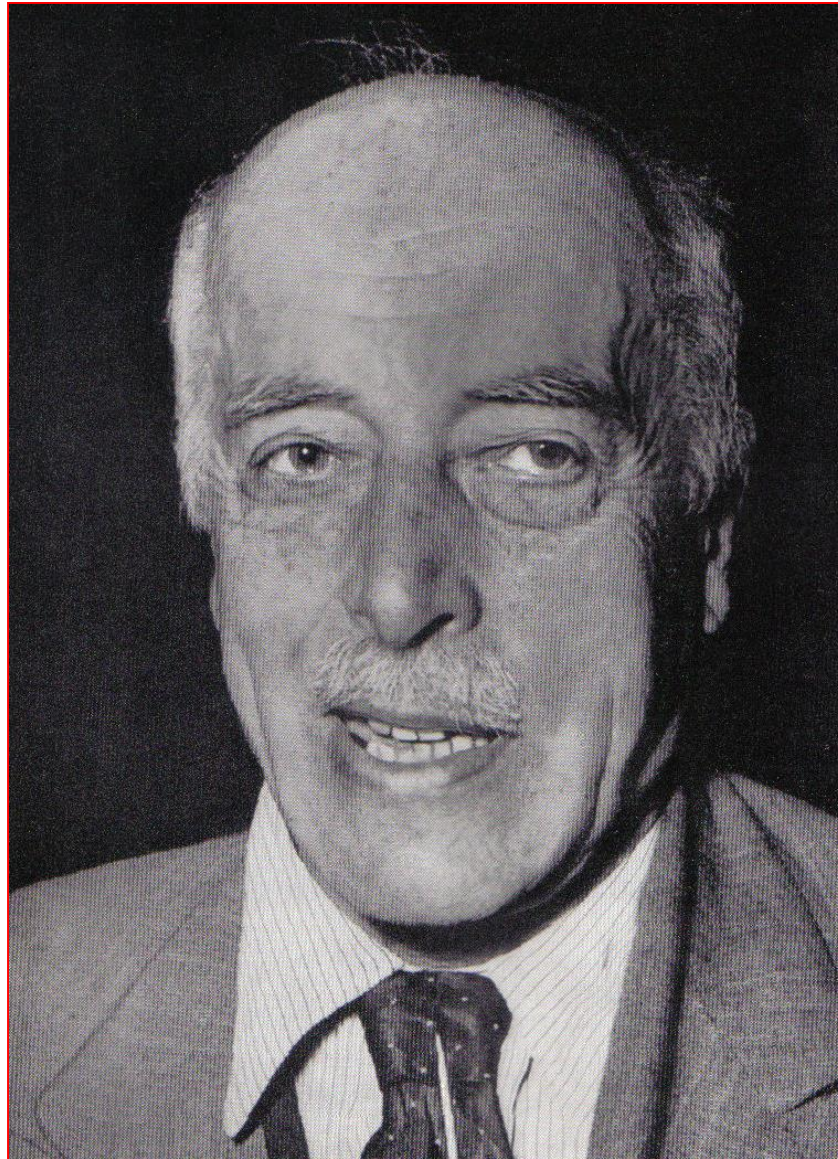
Kapitza-Dirac effect (1933)

Kapitza and Dirac predicted that electrons should also be diffracted by a standing light wave. This Kapitza-Dirac effect is analogous to the diffraction of light by a grating, but with the roles of the wave and matter reversed.

→ Observed in 2001



Dualité Onde-Corpuscule



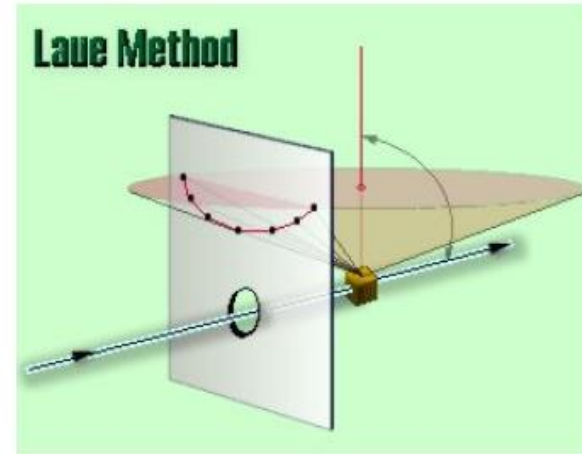
Max von Laue (1914)

Dualité Onde-Corpuscule

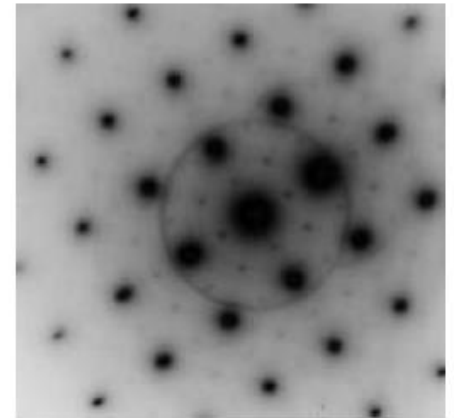
Motifs de diffraction de Laue avec des rayons X

■ “Back-reflection” Laue

- Dans cette méthode, le film photographique est placé entre la source de rayons-X et le cristal. Le faisceau qui est diffracté vers l'arrière du cristal est enregistré sur le film sous forme de spots (maxima de diffraction).
- On peut également observer la diffraction en transmission plutôt qu'en réflexion.
- La figure du bas donne à gauche un exemple de **diffraction des rayons-X** par un seul cristal de silicium. La longueur d'onde des photons est d'environ 0.1nm.
- La figure du bas à droite est un patron de **diffraction des électrons** sur un cristal (alliage de manganèse-nickel).



Rayons X



Electrons

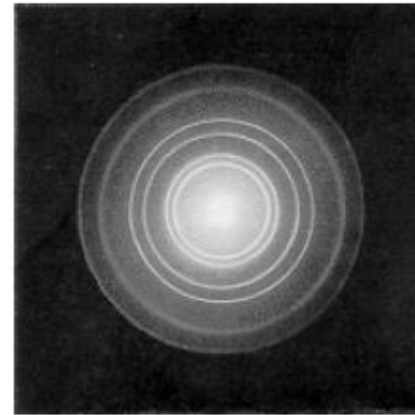
L'une des plus belles découvertes de la physique (A. Einstein)

Dualité Onde-Corpuscule

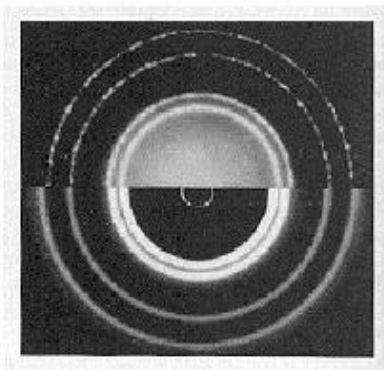
Motifs de diffraction de Laue avec des électrons



Pour un cristal



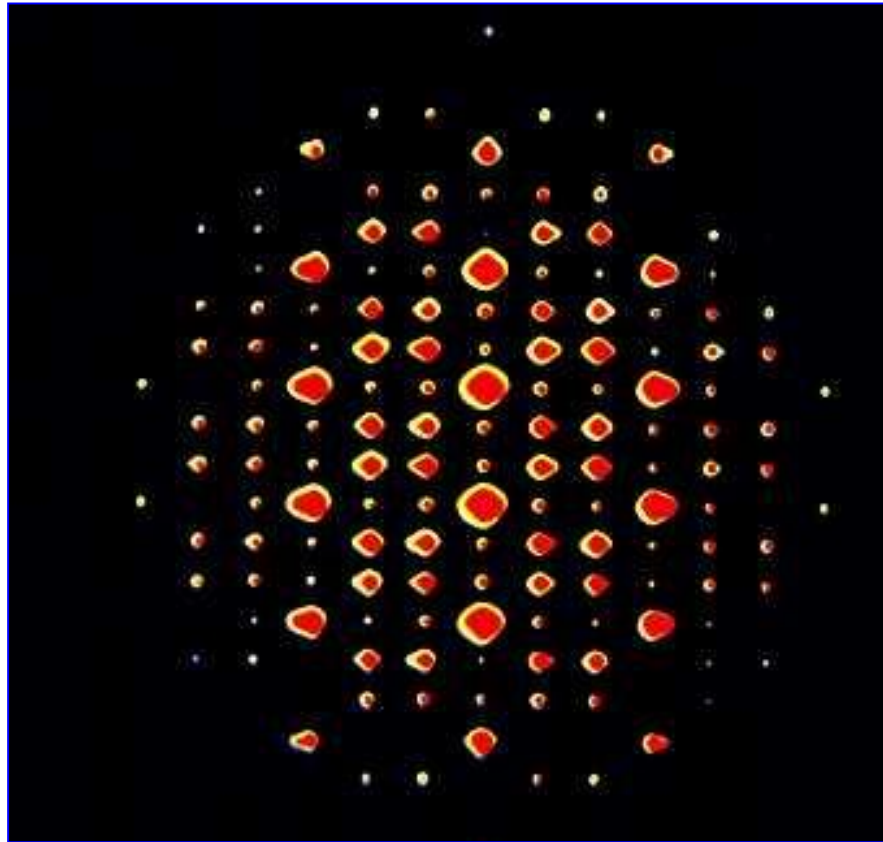
Pour une poudre



Comparaison entre patrons de diffraction (de Laue) pour électrons et REM!

L'électron est une onde!

Dualité Onde-Corpuscule



Ce réseau de points a été obtenu en projetant un faisceau d'électrons sur un *alliage de titane et de nickel*. Le faisceau dispersé a ensuite été recueilli par un détecteur. On remarque que le réseau d'électrons n'est pas uniforme : il présente des zones à forte concentration d'électrons (points). Cette disparité est due à l'interférence d'ondes associées aux électrons. Par ailleurs, la dispersion du faisceau s'interprète comme une manifestation de la diffraction. **Ces deux phénomènes, interférence et diffraction, mettent en évidence le caractère ondulatoire des particules.**

Dualité Onde-Corpuscule



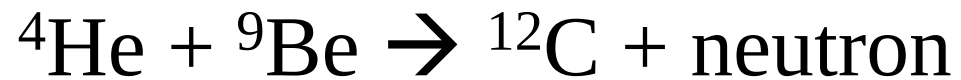
En **1937**, **George Paget Thomson** partage le prix Nobel avec **Davisson**, pour son travail sur la diffraction des électrons. C'est le fils du découvreur de l'électron **Joseph John Thomson** qui reçut aussi le prix Nobel en **1906**.



Dualité Onde-Corpuscule



Radioactivité artificielle et découverte du neutron (1932)



James Chadwick

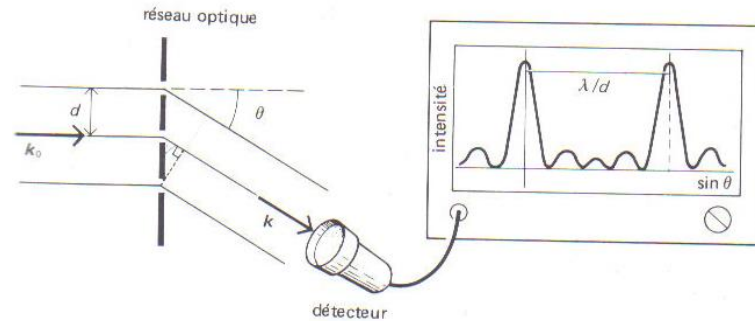
In 1930 the German physicists **Bothe** and **Becker** bombarded the light metal beryllium with alpha particles, and noticed that a very penetrating radiation was emitted. This radiation was non-ionising, and they assumed it was gamma rays.

In 1932 **Irène** and **Frédéric Joliot-Curie** investigated this radiation in France. They let the radiation hit a block of paraffin wax, and found it caused the wax to emit protons. They measured the speeds of these protons and found that the gamma rays would have to be incredibly energetic to knock them from the wax.

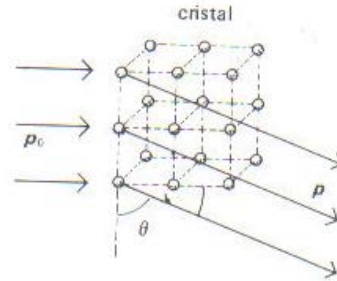
Chadwick reported the Joliot-Curie's experiment to **Rutherford**, who did not believe that gamma rays could account for the protons from the wax. He and **Chadwick** were convinced that the beryllium was emitting neutrons. Neutrons have nearly the same mass as protons, so should knock protons from a wax block fairly easily.

Dualité Onde-Corpuscule

Le neutron est aussi une onde...

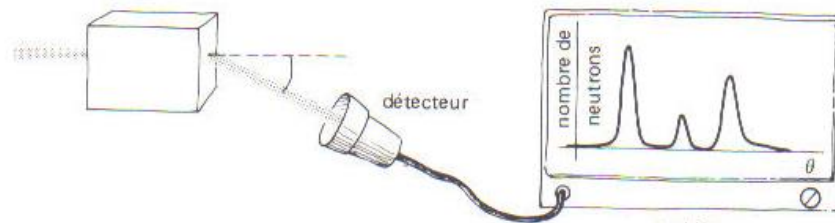


Interférence et diffraction de la lumière par un réseau optique



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

$\lambda \sim \text{quelques } \text{\AA} \longrightarrow E \sim 0.01\text{eV}$

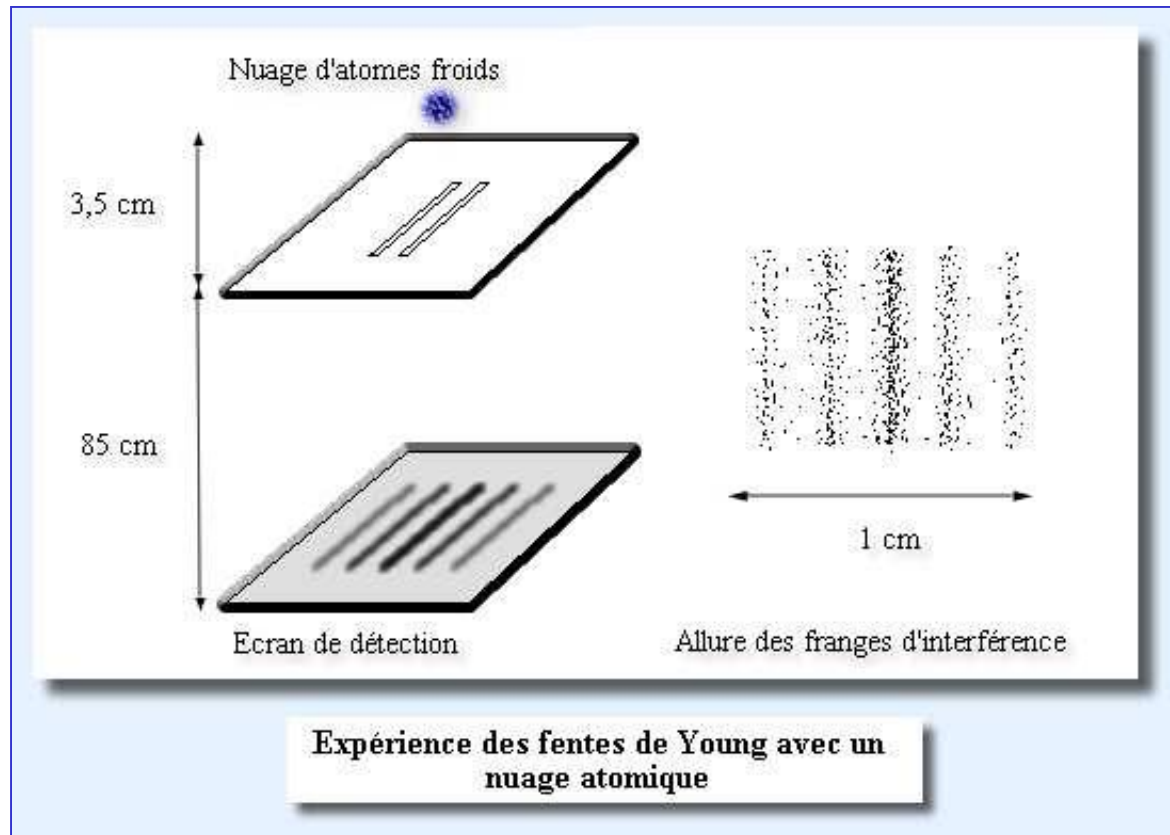


Interférence et diffraction des neutrons par un cristal

Dans les années 1970 (50 après de Broglie)

Dualité Onde-Corpuscule

L'atome est aussi une onde...

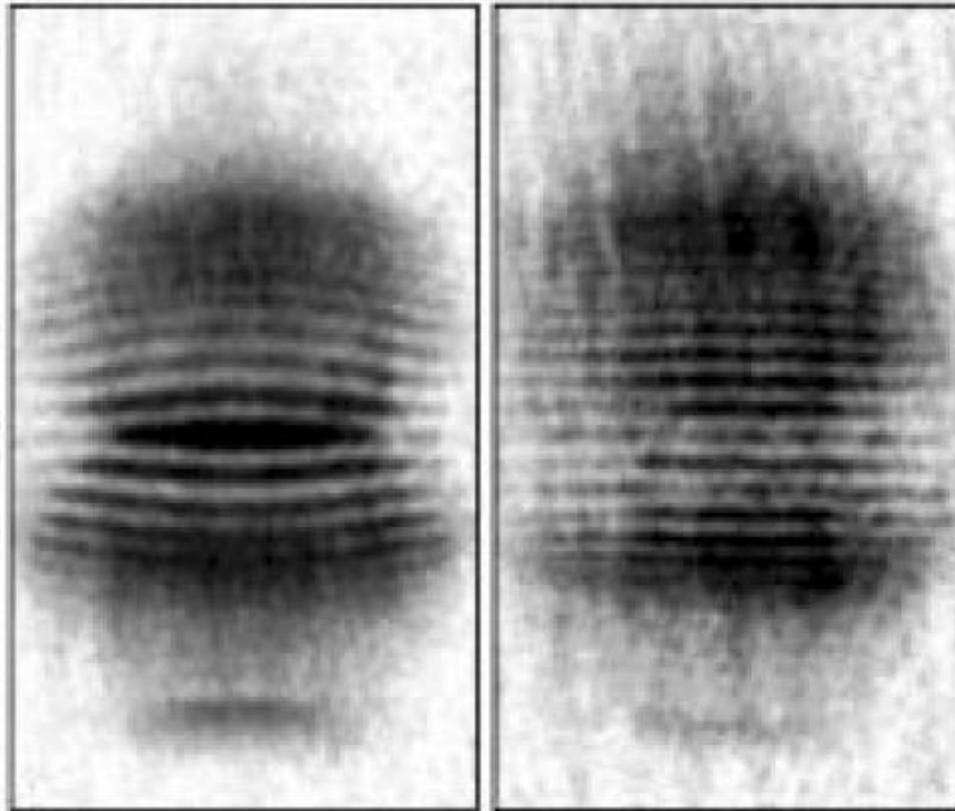


Expérience d'interférences atomiques réalisée en **1992** par une équipe japonaise de l'université de Tokyo:

Les atomes, immobilisés et refroidis, sont lâchés au-dessus des fentes ; ils tombent jusqu'à l'écran de détection, où chaque point noir correspond à l'impact d'un atome. La densité des impacts dessine une alternance de bandes sombres et claires : les franges d'interférence. La densité en un point de l'écran est proportionnelle à la probabilité qu'un atome de se retrouver en ce point. Cette probabilité est elle-même proportionnelle au module carré $|A_1 + A_2|^2$ de la somme des amplitudes A_1 et A_2 des deux ondes atomiques évaluées en ce point.

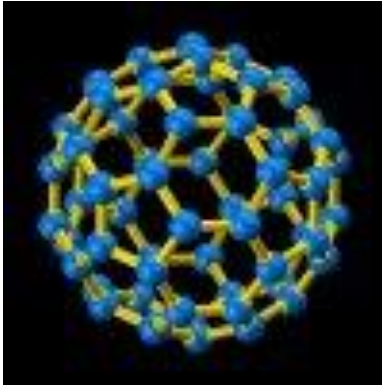
Dualité Onde-Corpuscule

Interférences avec des atomes

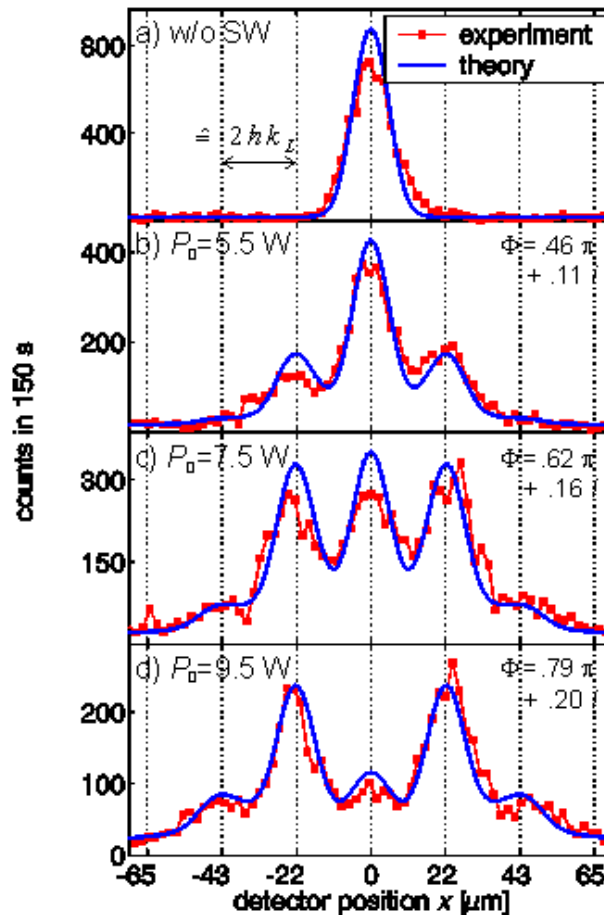


Dualité Onde-Corpuscule

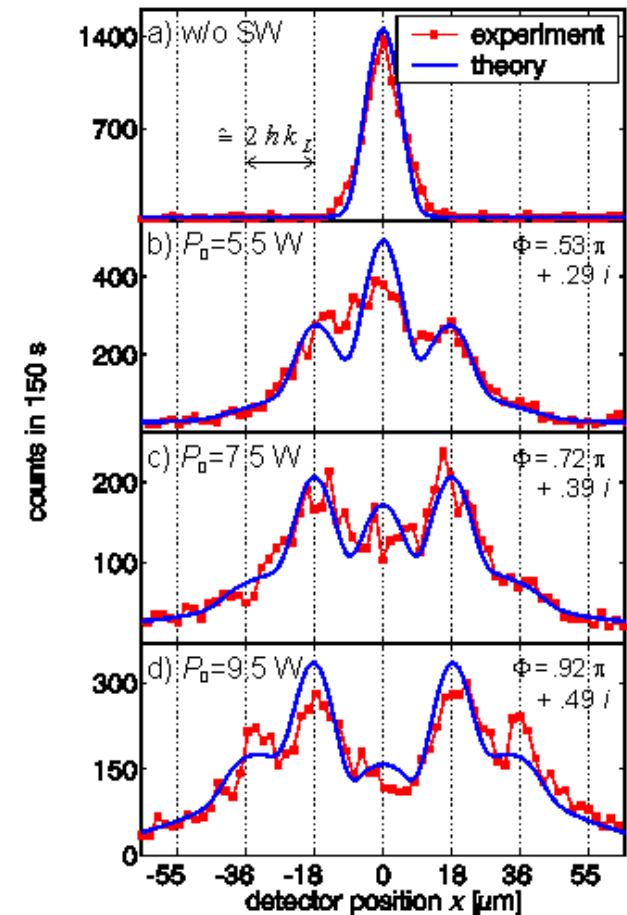
$\sim 1 \text{ nm}$



Une grosse molécule est aussi une onde...



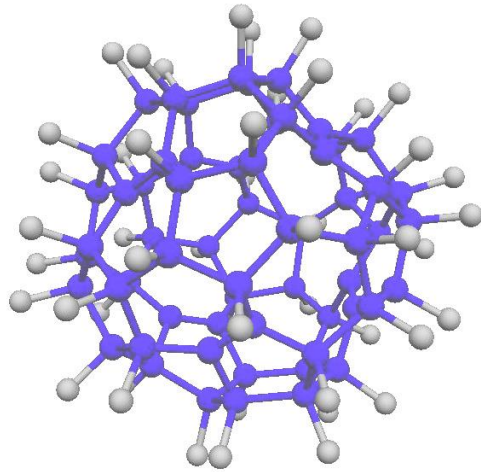
C_{60}



C_{70}

A. Zeilinger 1999

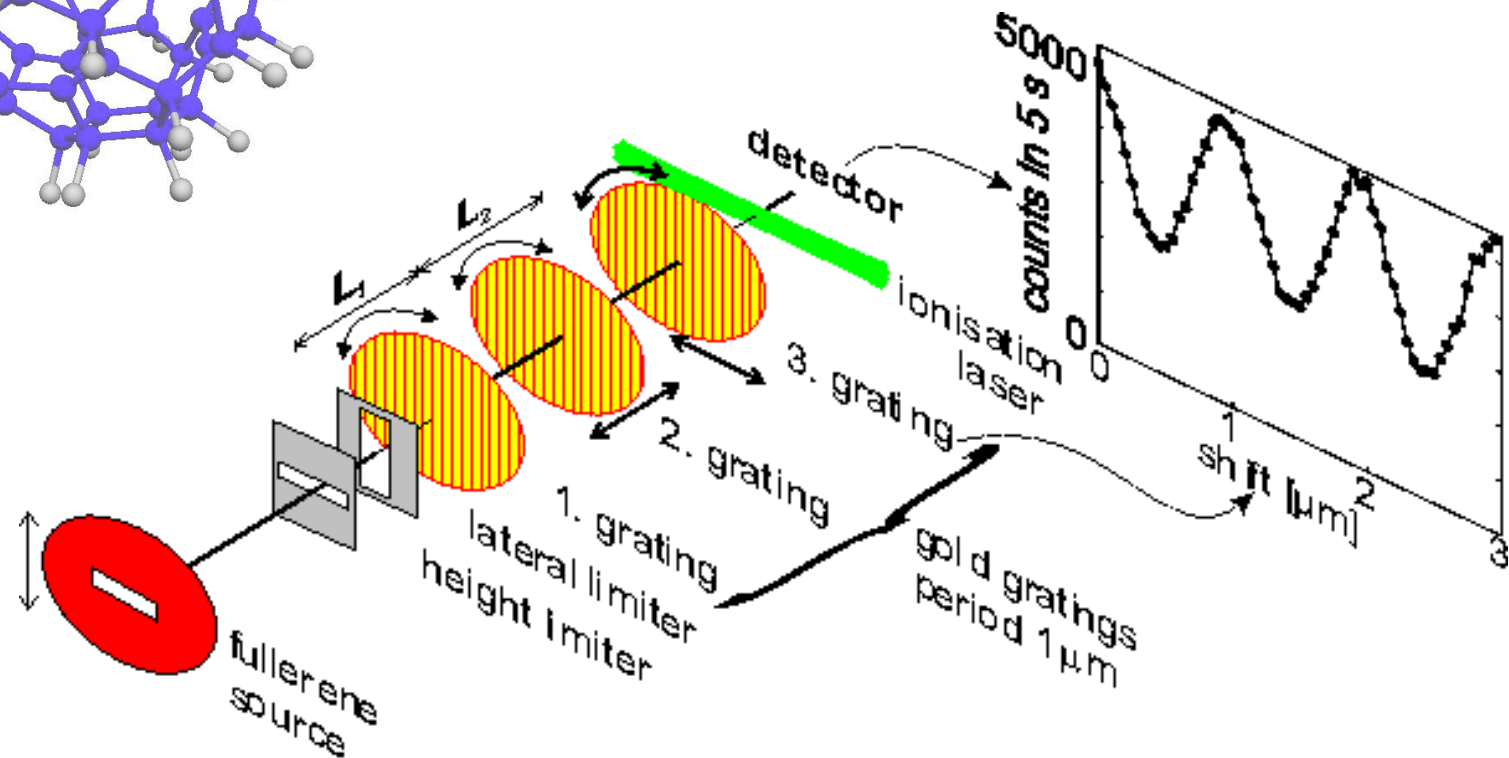
Dualité Onde-Corpuscule



Fullerenes fluorés $C_{60}F_{48}$

108 atomes

(2006)



Dualité Onde-Corpuscule

Quantum interference experiments with large molecules

Olaf Nairz,^{a)} Markus Arndt, and Anton Zeilinger^{b)}

Institut für Experimentalphysik, Universität Wien, Boltzmannngasse 5, A-1090 Wien, Austria

(Received 27 June 2002; accepted 30 October 2002)

Wave-particle duality is frequently the first topic students encounter in elementary quantum physics. Although this phenomenon has been demonstrated with photons, electrons, neutrons, and atoms, the dual quantum character of the famous double-slit experiment can be best explained with the largest and most classical objects, which are currently the fullerene molecules. The soccer-ball-shaped carbon cages C_{60} are large, massive, and appealing objects for which it is clear that they must behave like particles under ordinary circumstances. We present the results of a multislit diffraction experiment with such objects to demonstrate their wave nature. The experiment serves as the basis for a discussion of several quantum concepts such as coherence, randomness, complementarity, and wave-particle duality. In particular, the effect of longitudinal (spectral) coherence can be demonstrated by a direct comparison of interferograms obtained with a thermal beam and a velocity selected beam in close analogy to the usual two-slit experiments using light.

© 2003 American Association of Physics Teachers.

[DOI: 10.1119/1.1531580]

(Article sur le site...[Articles/Zeilinger.pdf](#))

Dualité Onde-Corpuscule

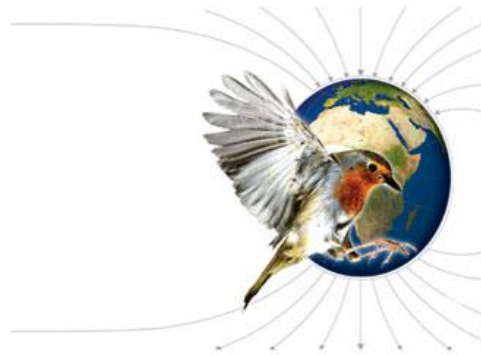


Septembre 2011

Vivre dans un monde quantique

Des effets quantiques dans les objets macroscopiques

La théorie quantique ne concerne pas seulement les électrons et les atomes. Elle s'applique aussi à plus grande échelle : aux oiseaux, aux plantes, voire aux humains.



Le rouge-gorge familier vole de la Scandinavie à l'Afrique en s'orientant à l'aide du champ magnétique terrestre. Parvenus dans l'œil de l'oiseau, les photons du Soleil détruiraient l'état de spin collectif de l'une des paires d'électrons d'une molécule présente dans la rétine de l'oiseau. Répété de multiples fois, ce phénomène quantique se traduirait par un signal neuronal assez important pour que le cerveau du rouge-gorge soit capable de percevoir l'inclinaison du champ magnétique terrestre. **C'est un exemple d'effet quantique à l'échelle macroscopique.**

Dualité Onde-Corpuscule

2000 atoms in two places at once
A new record of quantum superposition

Date:

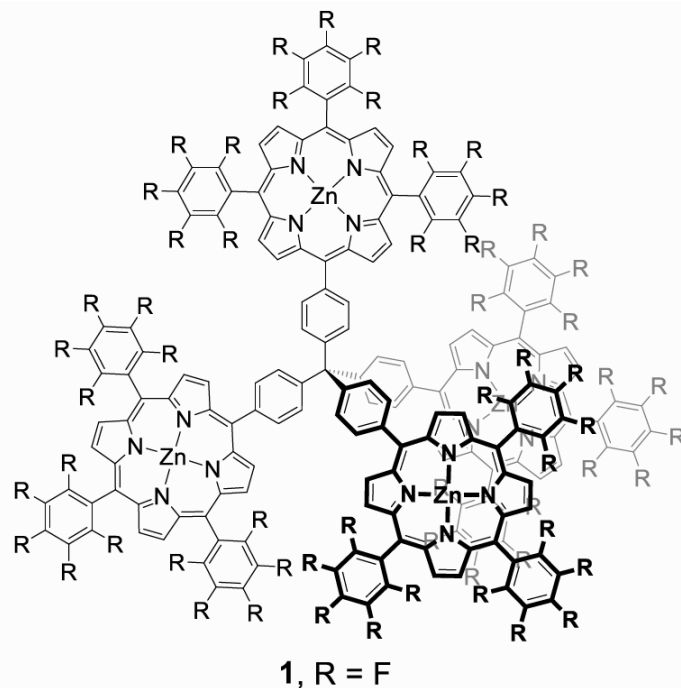
October 2, 2019

Source:

University of Vienna

Summary:

The quantum superposition principle has been tested on a scale as never before in a new study. Hot, complex molecules composed of nearly two thousand atoms were brought into a quantum superposition and made to interfere. By confirming this phenomenon -- 'the heart of quantum mechanics', in Richard Feynman's words -- on a new mass scale, improved constraints on alternative theories to quantum mechanics have been placed.



Dualité Onde-Corpuscule

Ce que vous pouvez lire après cette introduction...

- L'étrange histoire des quanta, Banesh Hoffmann & Michel Paty
- Comprendre la mécanique quantique, Roland Omnès

