

# Louis de Broglie, 100 ans d'onde de matière.

Thomas Durt, Ecole Centrale Méditerranée, Institut Fresnel

*thomas.durt@centrale-med.fr*

- Il y a 100 ans, Louis de Broglie, face à la crise de la physique de son temps, proposa une hypothèse, qui, selon les mots d'Einstein, " lève un coin du grand voile " .
- Cette hypothèse, celle des ondes de matière, va constituer le point de départ de la mécanique quantique moderne.
- Le but du séminaire sera de commémorer les travaux pionniers de Broglie sur les ondes de matière parus en 1923 et 1924, et de faire le lien avec les aspects contemporains des ondes de matière.
- Nous aborderons des thématiques allant de l'état de l'art concernant l'observation des ondes de matière (macro-molécules, interférométrie atomique, optique électronique et neutronique), aux interrogations fondamentales concernant la nature de ces ondes, tout en nous efforçant de donner une mise en perspective historique.

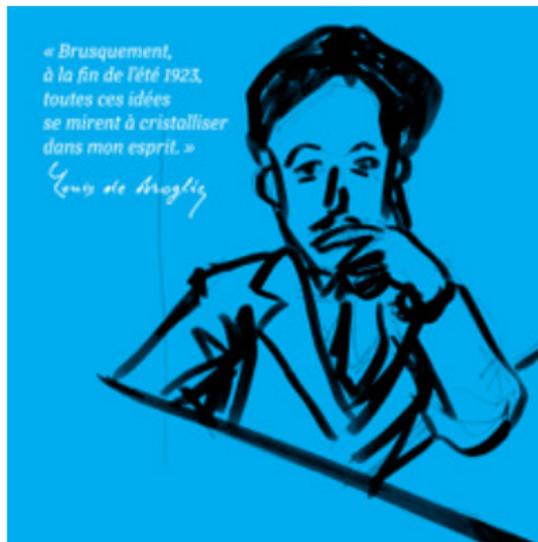
# Introduction: Louis de Broglie et les ondes de matière.

On peut lire sur WIKIPEDIA

- Louis Victor de Broglie, prince, puis duc de Broglie (prononcé en France de Breuil), né le 15 août 1892 à Dieppe et mort le 19 mars 1987 à Louveciennes, est un mathématicien et physicien français.
- A seulement 37 ans, il devient lauréat du prix Nobel de physique de 1929 “pour sa découverte de la nature ondulatoire des électrons”, qui a révolutionné la physique en généralisant à toute la matière la dualité onde-corpuscule proposée par Einstein pour la lumière.

# Introduction: Louis de Broglie et les ondes de matière.

- Les travaux révolutionnaires de Louis de Broglie constituent un jalon incontournable du développement de la physique quantique.
- Ils furent développés durant sa thèse de doctorat (3 articles en 1923, défense de thèse en novembre 1924).

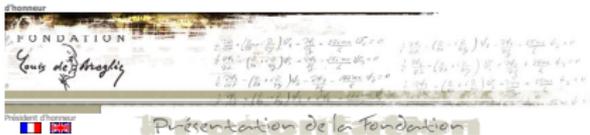




# Introduction: Louis de Broglie et les ondes de matière.

- En novembre 2024, l'anniversaire de la défense de thèse sera célébré à Paris par la fondation de Broglie  
<https://fondationlouisdebroglie.org/>

11/03/2024 11:23 Fondation Louis de Broglie



**FONDATION**  
Louis de Broglie

Président d'honneur  
Président d'honneur  
Louis de Broglie

**Fondation**  
Présidence et directoire

**Institut**  
Président de la Fondation Louis de Broglie : Christian de PANGE  
Président d'honneur : Georges LOCHAK  
Vice-Président : Daniel FAUPEL  
Secrétaire Général : Philippe FRESBULT  
Trésorier : Frédéric NEVEU

**Annuaire**  
Contact / Assistante de Direction : Dominique MORENAS, 23, rue Maroulet, 75012 Paris

**Colloques et conférences**  
Site : <http://www.fondationlouisdebroglie.org>  
Téléphone : 01 46 32 30 08  
Téléfax : 01 46 34 92 07  
e-mail : [inst.louisdebroglie@fue.fr](mailto:inst.louisdebroglie@fue.fr)

**Publications**  
Mémoires

**Naissance et Cadre de la Fondation**  
La Fondation Louis de Broglie a été créée en 1973 par Louis de Broglie et Georges Lochak à l'occasion du cinquantième anniversaire de la découverte des ondes de matière qui sont à la base de la mécanique ondulatoire.  
Avec le soutien d'un prestigieux **Comité de Parrainage**, la Fondation Louis de Broglie a reçu aussitôt le mécénat de plusieurs **entreprises**. Pour sa part, Louis de Broglie lui a légué la propriété qu'il avait achetée avec le montant de son prix Nobel.  
Juridiquement, la Fondation Louis de Broglie bénéficie d'un compte ouvert au sein de la **Fondation de France** qui gère les dons qui lui sont adressés. Un collège d'administrateurs, dont les premiers membres ont été choisis par Louis de Broglie lui-même, est chargé de veiller à la gestion de la Fondation dans l'esprit qu'il avait défini et qui sera explicité plus loin.

<https://fondationlouisdebroglie.org/presentation.html>

13

## Isaac Newton versus Christiaan Huygens.

- Au 17ème siècle, deux théories rivales voient le jour concernant la nature de la lumière.
- Newton prétend que la lumière est faite de particules.
- Huygens prétend que celle-ci est constituée d'ondes.
- Le crédit scientifique de Newton est tel que la plupart des physiciens adoptent ses idées.

## Fresnel, Young et Arago.

- Au début du 19<sup>ème</sup> siècle, la théorie ondulatoire de Huygens se voit développée simultanément par Young en Angleterre et Fresnel en France.
- Les expériences d'Arago permettent de clore le débat: la lumière est une onde.

## Faraday, Ampère, Maxwell et Hertz.

- Toujours au 19ème siècle, les physiciens développent progressivement une théorie des forces électro-magnétiques.
- Ces travaux atteignent un point culminant lorsque Maxwell écrit les équations décrivant la propagation des champs électro-magnétiques (1848) et montre qu'ils se comportent comme des ondes se propageant à la vitesse de la lumière.
- Maxwell en déduit que la lumière est une onde (vibration) électro-magnétique.
- Les expériences de Hertz (1888) confirment cette idée: la lumière est une onde électro-magnétique.
- Ceci concerne aussi bien la lumière visible que l'infra-rouge, les ondes radio, l'ultraviolet et les rayons X.

## Lorentz et l'électron.

- A la fin du 19ème siècle, Lorentz décrit l'interaction entre une particule chargée (l'électron) et les champs de force électro-magnétiques.
- Sa théorie est aujourd'hui appelée l'électro-dynamique classique.
- Ce travail boucle la boucle: un électron émet des ondes électro-magnétiques comme décrit par les équations de Maxwell, et ces ondes influencent en retour le mouvement de l'électron.

## L'électron: première particule fondamentale mise en évidence expérimentalement.

- Un électron peut être vu comme un “atome d'électricité” (“particule élémentaire” ou “fondamentale”, une brique de la matière).
- dicit wikipedia:

*...Le concept d'une quantité indivisible de charge électrique est élaboré à partir de 1838 par le naturaliste britannique Richard Laming afin d'expliquer les propriétés chimiques des atomes. L'électron est identifié comme le corpuscule envisagé par Joseph John Thomson et son équipe de physiciens britanniques en 1897, à la suite de leurs travaux sur les rayons cathodiques....*

## Fin du 19ème, et (?) fin de la Physique.

- Outre ses éclatants succès en optique, électro-magnétisme etc, la physique classique s'est aussi illustrée au 19ème siècle en astronomie, dans la continuation des théories formulées par Newton dans le cadre de la mécanique classique:
  - Les travaux de Newton sont repris et développés par Laplace, Poisson et autres.
  - Leverrier prédit en 1846 l'existence d'une nouvelle planète (Neptune), pas encore observée, en se basant sur les anomalies observées dans le cas du mouvement d'Uranus.

## Fin du 19ème, et (?) fin de la Physique.

- Que ce soit dans le cadre de la théorie de la gravitation ou de l'électro-magnétisme, la description de l'univers physique repose sur deux concepts:
  - les **ONDES** ou **CHAMPS**: des objets physiques étendus dans l'espace, considérés comme la vibration d'un milieu.
  - les **CORPUSCULES** ou **PARTICULES**: des objets physiques massifs, localisés dans l'espace (paradigme du point matériel en mécanique).

## Fin du 19ème, et (?) fin de la Physique.

- Face aux succès éclatants de la physique classique au 19ème, Lord Kelvin se serait exclamé  
*...There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.....*

## **Fin du 19ème, et (?) fin de la Physique.**

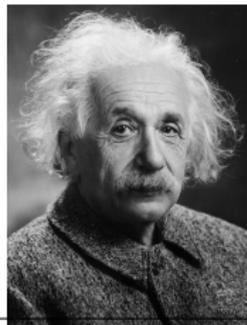
- Lord Kelvin a néanmoins reconnu, en 1900, l'existence de deux nuages dans le ciel bleu de la physique de l'époque:
  - L'impossibilité de mettre en évidence le mouvement par rapport à l'“éther”, milieu hypothétique servant de support à la propagation de la lumière, traqué sans succès durant tout le 19ème siècle.
  - Des difficultés rencontrées en physique statistique.

## Les nuages de Kelvin et la physique moderne.

- Les “nuages” de Lord Kelvin sont annonciateurs des deux théories fondamentales de la physique moderne, développées durant la première moitié du 20ème siècle:
  - L'impossibilité de mettre en évidence le mouvement par rapport à l'“éther” donnera lieu à la théorie de la relativité restreinte.
  - Les difficultés rencontrées en physique statistique, dans le cadre du problème du corps noir amèneront Planck en 1900 à supposer la quantification de l'énergie des ondes électro-magnétiques.

## 1905, Einstein et le photon.

- En 1905, Einstein, afin d'expliquer l'effet photo-électrique<sup>1</sup>, émet l'hypothèse selon laquelle la lumière est faite d'“atomes” de lumière (aujourd'hui appelés les photons).
- Chaque photon possède une énergie  $h\nu$  où  $h$  est la constante de Planck<sup>2</sup> et  $\nu$  la fréquence de la lumière considérée.



<sup>1</sup>L'effet photo-électrique a lieu lorsque la lumière arrache des électrons présents à la surface d'un matériau conducteur (exemple: du métal).

<sup>2</sup>Cette constante  $h$  vaut environ  $6,7 \cdot 10^{-34}$  Joule-seconde. Elle a été introduite par Max Planck en 1900 afin de décrire la radiation thermique c'est-à-dire la lumière émise par un solide à température  $T$  (problème du “corps noir”). Planck a aussi introduit le concept de “quantum lumineux d'énergie  $h\nu$ ”.

## 1905, Einstein et le photon.

- Selon sa couleur (fréquence) la lumière est donc faite de corpuscules d'énergie différente: les photons bleus sont plus énergétiques que les photons rouges par exemple.
- L'énergie cinétique des électrons émis augmente donc lorsque l'on éclaire le matériau conducteur avec une lumière de fréquence plus élevée:

$h\nu = E_s^e + E_{cin.}^e$ , ou encore  $E_{cin.}^e = h(\nu - \nu_s)$  avec  $h\nu_s = E_s^e$ , avec  $E_s^e$ , l'énergie seuil, à savoir l'énergie d'extraction caractéristique du matériau utilisé.

## 1905, Einstein et le photon.

- Ceci explique aussi pourquoi l'effet photoélectrique n'apparaît qu'aux fréquences lumineuses suffisamment élevées: si la fréquence est trop basse ( $h\nu < E_s$ , ou encore  $\nu < \nu_s = E_s/h$ ), les atomes de lumière (photons ou quanta) ne disposent pas de l'énergie suffisante pour arracher un électron.

## Acceptation du concept de photon par la communauté scientifique.

- En 1909, G.I. Taylor observe que les interférences sont toujours présentes même lorsque l'on utilise de la lumière de très faible intensité<sup>3</sup>.
- On peut considérer de ce fait que le photon est la deuxième particule fondamentale à avoir été observée après l'électron.

---

<sup>3</sup>G.I. Taylor, "Interference fringes with weak light" Proc. Camb. Phil. Soc. 15 (1909), 114.

## Acceptation du concept de photon par la communauté scientifique.

- En 1914, R.A. Millikan mesure la pente de la droite reliant l'énergie cinétique des photons arrachés par effet photo-électrique en fonction de la fréquence lumineuse et retrouve la constante de Planck, ce qui confirme la relation d'Einstein  $E_{cin.}^e = h(\nu - \nu_s)$ .
- Comme bon nombre de ses collègues de l'époque, Millikan reste très réticent à accepter le concept même de particule de lumière (photon):  
*...His results, published in 1914, confirmed Einstein's predictions in every detail,[...] but Millikan was not convinced of Einstein's interpretation, and as late as 1916 he wrote, "Einstein's photoelectric equation... cannot in my judgment be looked upon at present as resting upon any sort of a satisfactory theoretical foundation," even though "it actually represents very accurately the behavior" of the photoelectric effect. In his 1950 autobiography, however, he declared that his work "scarcely permits of any other interpretation than that which Einstein had originally suggested, namely that of the semi-corpuscular or photon theory of light itself".*  [dixit wikipedia](#)  

## Acceptation du concept de photon par la communauté scientifique.

- En 1921, Einstein reçoit le prix Nobel de Physique pour sa contribution à la compréhension de l'effet photo-électrique.
- Aujourd'hui on dispose de caméras single-photons permettant d'observer une granularité dans les motifs d'interférence lumineuse (ceux-ci apparaissent composés de grains, les quanta ou photons).

## **1905-1908, le photon d'Einstein, particule relativiste de masse nulle.**

- Entre 1905 et 1908, Einstein développe une description relativiste du photon, qui l'amène à considérer le photon comme une particule de masse nulle se déplaçant à la vitesse de la lumière  $c$ , par rapport à tout observateur, quel que soit le mouvement de ce dernier.

## Introduction à la Relativité Restreinte.

- **Transformations de Lorentz.**
- Soit un référentiel d' espace-temps, dans lequel on mesure les intervalles d' espace et de temps  $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{t})$ .
- Soit un second référentiel, en mouvement par rapport au premier, à vitesse  $+v$  selon l' axe  $X$ , Le passage aux nouvelles coordonnées spatio-temporelles  $(x, y, z, t)$  obéit à la transformation de Lorentz:

$$\begin{cases} t = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \left( \tilde{t} - \frac{v\tilde{x}}{c^2} \right) \\ x = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} (\tilde{x} - v\tilde{t}) \\ y = \tilde{y} \\ z = \tilde{z} \end{cases}$$

Où  $\beta = \frac{v}{c}$

## Transformations de Lorentz.

- En accord avec le principe de relativité, la transformation inverse s'écrit en remplaçant  $v$  par  $-v$ :

$$\begin{cases} \tilde{t} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \left( t + \frac{vx}{c^2} \right) \\ \tilde{x} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} (x + vt) \\ \tilde{y} = y \\ \tilde{z} = z \end{cases}$$

## Invariants relativistes.

- On peut vérifier que la transformation de Lorentz possède un invariant:

la "4-norme Minkovskienne":

$c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2$  prend, en effet, la même valeur dans tous les référentiels reliés au premier par une transformation de Lorentz. Par exemple on a

$$\begin{aligned} & c^2\tilde{t}^2 - \tilde{x}^2 - \tilde{y}^2 - \tilde{z}^2 \\ &= \frac{1}{1-\beta^2} \left[ c^2 \left( t + \frac{vx}{c^2} \right)^2 - (x + vt)^2 \right] - y^2 - z^2 \\ &= \frac{c^2}{c^2-v^2} \left[ c^2 \left( t^2 + 2t \frac{vx}{c^2} + \left( \frac{vx}{c^2} \right)^2 \right) - (x^2 + 2xvt + v^2t^2) \right] - y^2 - z^2 \\ &= \frac{c^2}{c^2-v^2} \left[ (c^2 - v^2)t^2 - \left( 1 - \frac{v^2}{c^2} \right) x^2 \right] - y^2 - z^2 \\ &= c^2t^2 - x^2 - y^2 - z^2. \end{aligned}$$

## Invariants relativistes.

- **Remarque 1**

Il en est de même pour le quadrivecteur (énergie, quantité de mouvement)  $(E, \vec{p}c)$ , dont on peut montrer que la norme Minkoskienne  $E^2 - p^2c^2$  est non seulement invariante sous les transformations de Lorentz, elle est aussi une quantité invariante au cours du temps (ou constante du mouvement): pour une particule de masse  $m$  on a, en n'importe quel endroit de sa trajectoire et dans tout référentiel

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4.$$

L' énergie et la quantité de mouvement relativistes sont liées à la vitesse instantanée  $\vec{v}$  par les relations

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \quad \vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}.$$

## Addition des vitesses.

- **Remarque 2**
- Soit un objet se déplaçant à vitesse  $v_1$  dans la direction  $+X$ , à l'encontre duquel survient un objet se déplaçant à vitesse  $v_2$  dans la direction  $-X$ . Selon notre intuition non-relativiste, le premier objet se déplace par rapport au second à la vitesse relative  $v^{rel} = v_1 + v_2$ . On peut montrer que cette intuition est fautive: la loi relativiste d'addition des vitesses s'écrit en ce cas

- $$v^{rel} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}.$$

En particulier, un photon (pour lequel  $v_2 = c$ ) semblera se propager à la vitesse  $v^{rel} = c$  quel que soit le référentiel (ici indépendamment de  $v_1$ ), en accord avec le principe de relativité selon lequel la vitesse de la lumière est la même (est un invariant relativiste) dans tout référentiel:

- $$\frac{v_1 + c}{1 + \frac{v_1 c}{c^2}} = c.$$

## Limite classique.

### • Remarque 3

Dans la limite des vitesses non-relativistes ( $v \ll c$  et donc  $\beta \approx 0$ ) on retrouve les lois de transformation habituelles (Newtoniennes et Galiléennes):

$$\begin{cases} t \approx \tilde{t} \\ x \approx \tilde{x} - v\tilde{t} \\ y = \tilde{y} \\ z = \tilde{z} \end{cases}$$

selon lesquelles le temps est un temps absolu,  $s'$  écoulant au même rythme dans tout référentiel.

- En outre on retrouve la loi d'addition des vitesses usuelle  $v^{rel} = v_1 + v_2$ , ainsi que les relations familières  $E = mc^2 + E_c$  où  $E_c \approx m\frac{v^2}{2}$ , et  $\vec{p} \approx m\vec{v}$ .

## Retour au photon d' Einstein, particule de masse nulle.

- L' on prédit dans le cadre de la relativité restreinte (voir ci-dessus) que l' impulsion  $p$  (souvent appelée quantité de mouvement en physique classique), la vitesse  $v$  et l' énergie  $E$  d' une particule libre de masse  $m$  satisfont aux relations

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p^2 c^2} = \frac{m c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}.$$

Photon= particule de lumière (pour laquelle  $v = c$ ) donc

$$v = c \Rightarrow m = 0 \Rightarrow E = pc$$

## Retour au photon d' Einstein, particule de masse nulle.

- Un photon correspond selon Einstein à un quantum d' énergie de valeur  $h\nu$ , en accord avec l'hypothèse de quantification de Planck.
- L' impulsion (quantité de mouvement) d' un photon vaut  $p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}$ , où  $\lambda$  est la longueur d' onde de la lumière.

## Retour au photon d' Einstein, particule de masse nulle.

- Comme on le voit, les **RELATIONS D'EINSTEIN** du photon:

$$E = h\nu; p = h/\lambda$$

mettent sur un même pied des propriétés corpusculaires (énergie, quantité de mouvement) et des propriétés ondulatoires (fréquence, longueur d'onde).

- Elles manifestent la nature duale de la lumière, à la fois onde et particule.

## Travaux de Louis de Broglie en 1923-1924.

- En 1923 et 1924, l'apport essentiel de Louis de Broglie consiste en la généralisation, à tout objet massif, des **RELATIONS D'EINSTEIN** du photon:

$$E = h\nu; p = h/\lambda$$

- A la base de la physique quantique, ces équations manifestent la nature duale de tout objet quantique à la fois onde et particule.

## Louis et Maurice de Broglie

- Né en 1892, le prince Louis de Broglie, décroche d'abord une licence ès lettres orientée vers l'histoire.
- Sous l'impulsion de son frère Maurice, né en 1875, physicien reconnu pour ses travaux sur le sonar, et dans le domaine de la radioactivité, disposant d'un laboratoire privé depuis 1908, Louis se passionne pour la physique moderne.
- A cette époque, les conférences Solvay organisées à Bruxelles par l'industriel Solvay et présidées jusque 1927 par Hendrik Lorentz<sup>4</sup> jouent un rôle majeur dans la diffusion des idées nouvelles. Maurice de Broglie y participe et à son retour à Paris il éveille l'intérêt de son petit frère pour les avancées les plus originales de la physique moderne.

---

<sup>4</sup>1) 1911 La théorie du rayonnement et des quanta; 2) 1913 La structure de la matière; 3) 1921 Atomes et électrons.

## **Louis de Broglie se voue corps et âme à la physique moderne**

- Louis de Broglie décide de se consacrer à la physique et étudie à la Sorbonne physique et mathématiques.
- Pendant la première guerre mondiale, il travaille dans un poste de TSF à Paris (tour Eiffel), ce qui lui donnera le gout des innovations techniques.
- Il conservera toute sa vie une appétence pour les innovations pratiques.

## Structure atomique et modèle de Bohr.

- En 1913, Niels Bohr applique avec succès le concept de quantification aux orbites électroniques dans les atomes.
- Ces orbites sont quantifiées comme suit:  
seules les orbites pour lesquelles le moment cinétique est égal à un multiple de  $\hbar$ , à savoir la constante de Planck divisée par  $2\pi$ , sont permises<sup>5</sup>.



<sup>5</sup>On vérifie que la quantification du rayon de l'orbite  $r_n = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{me^2}$  peut se réécrire en fonction du moment cinétique comme suit:

$$L = r.p = r_n \sqrt{2mT_n} = r_n \sqrt{2m \frac{1}{2} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_n}} = \sqrt{m \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} r_n} = n\hbar.$$

## Structure atomique et modèle de Bohr.

- En ce cas, l' énergie est elle aussi quantifiée et vaut

$$E_n = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{2 r_n},$$

où

$$r_n = n^2 a_0 = n^2 \frac{\hbar^2 4\pi\epsilon_0}{m e^2},$$

et  $n$  est un entier strictement positif.

## Structure atomique et modèle de Bohr.

- En outre, Bohr suppose que l'électron peut "sauter" d'une orbite quantifiée à l'autre en émettant ou absorbant un photon d'énergie  $h\nu_{n,n'} = |\delta E| = |E_{n'}^{final} - E_n^{initial}|$ , en accord complet avec la formule empirique de Balmer et Rydberg

$$h\nu_{n,n'} = hcR_H \left| \frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2} \right|$$

dans laquelle apparaît la constante de Rydberg de l'atome d'hydrogène qui a été mesurée avec une grande précision en 1888 par Rydberg<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup>L'estimation la plus récente de la constante de Rydberg est précise jusqu'à la 13ème décimale, ce qui en fait la constante physique la mieux mesurée à l'heure actuelle.

## Quantification semi-classique.

- Les règles de quantification de Bohr ont été par la suite généralisées par Wilson, Sommerfeld et autres (1913-1920) pour constituer ce que l'on appelle aujourd'hui le "formalisme" de quantification semi-classique.
- L'idée de base est que pour quantifier un système physique il faut d'abord en déterminer, pour chaque degré de liberté, les orbites périodiques (orbites fermées), et imposer la règle de quantification selon laquelle l'action associée à une orbite fermée vaut un multiple entier de la constante de Planck:

$$\forall i \quad \oint p_i dq^i = k_i 2\pi\hbar = k_i h$$

(où  $k_i$  est un entier, et pour un Hamiltonien  $H(q^i, p_i)$ ,  $i$  variant de 1 à  $N$ ,  $N$  étant le nombre de degrés de liberté indépendants du système).

## Quantification semi-classique.

- On retrouve ainsi facilement, outre la quantification à la Bohr des niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène déjà mentionnée, ainsi qu'une série de règles de quantification, dont la règle de quantification des moments cinétiques associés à des rotateurs rigides plans, ainsi que la règle de quantification de Planck dans le cas d'oscillateurs harmoniques:

$$E = nh\nu \quad \text{où } n \in \mathbb{N}$$

## Quantification semi-classique.

- En effet, dans le cas d' un oscillateurs harmonique 1D, les orbites fermées obéissent aux conditions  $x(t) = A\cos(\omega \cdot t + \phi)$  où  $A$  et  $\phi$  sont des constantes arbitraires, fixées par les conditions initiales, tandis que  $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$  où  $k$  est égal à la constante de rappel de l' oscillateur et  $m$  la masse de la particule oscillante.
- On peut vérifier que  $F = -k \cdot x = m \cdot a$  en accord avec la loi de Newton.

## Quantification semi-classique.

- Dans l'espace des phases la trajectoire fermée peut s'écrire, après élimination du paramètre  $t$ , sous la forme d'une ellipse:

$\frac{x^2}{A^2} + \frac{p^2}{(m\omega A)^2} = \cos^2(\omega \cdot t + \phi) + \sin^2(\omega \cdot t + \phi) = 1$ . Une telle ellipse possède un (petit) axe de longueur  $a = A$  et un (grand) axe de longueur  $b = m\omega A$ . Sa surface totale vaut  $\pi \cdot a \cdot b = \pi \cdot A^2 m\omega$ .

- Dès lors, si l'on impose la règle de quantification semi-classique, on trouve  $\pi A^2 m\omega = n \cdot h$  où  $n$  est un entier positif ou nul.

- L'énergie d'une orbite quantifiée vaut alors

$$\begin{aligned} \frac{p^2}{2m} + \frac{kx^2}{2} &= \frac{1}{2} (A^2 \omega^2 m \sin^2(\omega \cdot t + \phi) + kA^2 \cos^2(\omega \cdot t + \phi)) \\ &= \frac{1}{2} A^2 \omega^2 m (\cos^2(\omega \cdot t + \phi) + \sin^2(\omega \cdot t + \phi)) = \\ \frac{\omega}{2\pi} \cdot \pi \cdot A^2 m\omega &= \frac{\omega}{2\pi} \cdot n \cdot h = n \cdot \hbar \cdot \omega = n \cdot h \cdot \nu \text{ où } n \text{ est un entier positif ou nul.} \end{aligned}$$

$$E = nh\nu \quad \text{où } n \in \mathbb{N}$$

## Quantification semi-classique.

- On en est là au début des années 20: les règles de quantification sont greffées sur la mécanique classique, avec plus ou moins de succès selon les cas.
- Même si la “recette” de quantification semi-classique semble bien coller aux données empiriques, la raison profonde de la quantification reste mystérieuse.
- En outre on sent bien qu'il est nécessaire de développer une nouvelle mécanique qui tienne compte des quanta, une mécanique véritablement quantique.
- Dirac, Heisenberg, Pauli, Bohr, Jordan et autres tatonnent dans cette direction de leur côté, mais selon les mots d'Einstein, c'est Louis de Broglie qui soulèvera un coin du voile...

# Dualité onde-corpuscule: relations de de Broglie

de Broglie, dans sa thèse, considère les postulats suivants:

1. A toute particule, même massive, on peut associer une onde, appelée onde de matière.
2. A une particule libre on peut associer un paquet d'ondes caractérisé par une fréquence temporelle et une fréquence spatiale (longueur d'onde) données.
3. L'onde se transforme comme une fonction scalaire sous les transformations de Lorentz.

**de Broglie généralise alors les relations d' Einstein pour le photon et montre que l' énergie et l' impulsion de la particule sont fonctions de la longueur d' onde et de la fréquence de l' onde associée selon les relations (dites de deBroglie)**

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

- de Broglie considère dans un premier temps une particule au repos, dans un référentiel inertiel de coordonnées spatio-temporelles  $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{t})$ .
- En vertu de son premier postulat on peut lui associer une onde de matière stationnaire

$$\Psi(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}, \tilde{t}) = F(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z}) \cdot \Phi(\tilde{t}),$$

où  $\Phi$  est une fonction périodique du temps  $\tilde{t}$  (de période  $\tilde{\tau} = \frac{1}{\nu}$ ).

# Dualité onde-corpuscule: relations de de Broglie

Afin de considérer une particule en mouvement il suffit de passer à un référentiel en mouvement par rapport au premier, à vitesse  $-v$  selon l'axe  $X$ , dans lequel la particule semblera être animée d'un mouvement uniforme selon  $X$ , à vitesse  $+v$ . Le passage aux nouvelles coordonnées spatio-temporelles  $(x, y, z, t)$  obéit à la transformation de Lorentz:

$$\begin{cases} t = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \left( \tilde{t} + \frac{v\tilde{x}}{c^2} \right) \\ x = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} (\tilde{x} + v\tilde{t}) \\ y = \tilde{y} \\ z = \tilde{z} \end{cases}$$
$$\begin{cases} \tilde{t} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \left( t - \frac{vx}{c^2} \right) \\ \tilde{x} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} (x - vt) \\ \tilde{y} = y \\ \tilde{z} = z \end{cases}$$

Où  $\beta = \frac{v}{c}$

# Dualité onde-corpuscule: relations de de Broglie

On suppose aussi que  $\Psi$  se transforme comme un scalaire sous le groupe de Lorentz-Poincaré, ce qui impose

$$\begin{aligned}\Psi(x, y, z, t) &= \Psi\left(\tilde{x}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}, \tilde{y}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}, \tilde{z}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}, \tilde{t}\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ t \end{pmatrix}\right) \\ &= F\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}(x-vt), y, z\right)\Phi\left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}\left(t-\frac{vx}{c^2}\right)\right)\end{aligned}$$

Où  $\Phi$  est une fonction périodique de  $t$ , de période

$$\tau = \sqrt{1-\beta^2}\tilde{\tau}$$

mais est aussi périodique en  $x$  avec une période spatiale ou longueur d'onde

$$\lambda = \frac{\sqrt{1-\beta^2}c^2}{v}\tilde{\tau}$$

# Dualité onde-corpuscule: relations de de Broglie

- On a alors

$$\frac{\lambda}{\tau} = \frac{c^2}{v} \quad \Rightarrow \quad \lambda\nu = \frac{c^2}{v}$$

On peut combiner  $\tau$  et  $\lambda$  afin de construire une quantité indépendante de  $v$  c'est-à-dire un invariant sous le groupe de Lorentz

$$\frac{1}{\tilde{\tau}^2} = \tilde{\nu}^2 = \nu^2 - \frac{c^2}{\lambda^2}$$

- Par ailleurs on sait que toute particule de masse  $m$  possède une quantité invariante de Lorentz, qui est l'énergie au repos de la particule,  $mc^2$ , en vertu de l'identité relativiste

$$E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$$

# Dualité onde-corpuscule: relations de de Broglie

- On peut facilement construire d'autres invariants de Lorentz en multipliant l'invariant  $mc^2$  par une constante arbitraire  $K$  à condition que  $K$  soit elle-même un scalaire (invariant) sous le groupe de Lorentz-Poincaré. Il est tentant d'égaliser les deux invariants obtenus précédemment, dont l'un ( $\tilde{\nu}^2$ ) est lié à une propriété ondulatoire (fréquence au repos de l'onde de matière) et l'autre ( $Kmc^2$ ) à une propriété corpusculaire (énergie au repos) de la même particule

$$\tilde{\nu}^2 = K^2 m^2 c^4$$

- On a alors

$$\begin{aligned} K^2 E^2 - K^2 p^2 c^2 &= K^2 m^2 c^4 \\ &= \nu^2 - \frac{c^2}{\lambda^2} = \tilde{\nu}^2 \end{aligned}$$

# Dualité onde-corpuscule: relations de de Broglie

- En identifiant terme à terme on obtient

$$\begin{aligned} KE &= \nu \\ p &= \frac{1}{K\lambda} \end{aligned}$$

- On sait par ailleurs que dans la limite où la masse au repos devient nulle  $m \rightarrow 0$  (par exemple dans le cas du photon) on doit retrouver les relations d' Einstein

$$E = h\nu, \quad p = \frac{h}{\lambda}$$

ce qui fixe la valeur de la constante  $K$ :  $K = \frac{1}{h}$ .

- C' est ainsi que de Broglie déduit deux relations universelles (valides pour tout objet de masse arbitraire), dites "relations de de Broglie":  $\nu = \frac{E}{h}$ ;  $\lambda = \frac{h}{p}$ ; qui relient les propriétés corpusculaires (Energie  $E$  et impulsion  $p$ ) de toute particule ou objet matériel de masse non-nulle à ses propriétés ondulatoires  $\nu$  et  $\lambda$ .

# Dualité onde-corpuscule: paquet d' onde quantique et vitesse de groupe

- Comme nous allons le montrer ici, de Broglie prouve par ailleurs que aux yeux d' un observateur relativiste en mouvement à vitesse  $-v$  par rapport à la particule au repos, la vitesse de groupe du paquet d' onde quantique qui lui est associé vaut bien  $v$ , ce qui montre qu' en effet, ce paquet d' onde se déplace bien à vitesse  $v$  par rapport au dit observateur.

# Dualité onde-corpuscule: paquet d' onde quantique et vitesse de groupe

- Toute onde, solution d'une équation d' ondes linéaire et ayant des ondes planes pour solutions (avec la relation dite de dispersion  $\omega = \omega(k)$ ), peut s' écrire comme une superposition linéaire d' ondes planes (ici à une dimension d' espace, pour simplifier)

$$\Psi(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} dk f(k) \cdot \exp(i(k \cdot x - \omega(k) \cdot t)),$$

où les amplitudes  $f(k)$  sont fixées par les conditions initiales.

- Un **paquet d' onde** s' obtient en superposant des ondes planes de fréquences proches afin d' obtenir une onde quasi-monochromatique (de longueur d' onde “piquée” autour de la longueur d' onde centrale  $\lambda_0$ ), mais localisée dans une région de l' espace bien délimitée (exemple dans le labo., où le long d' une ligne de transmission). De telles ondes sont réalisables physiquement et il est naturel dans l' approche de de Broglie visant à associer une onde physique à une particule localisée de le faire à l' aide d' un paquet d' ondes.

# Dualité onde-corpuscule: paquet d' onde quantique et vitesse de groupe

- L' expression de l' onde peut alors se réécrire comme suit:

$$\Psi(x, t) \approx \frac{\exp(i(k_0 \cdot x - \omega(k_0) \cdot t))}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} dk \Psi^F(k, 0) \cdot \exp(i(k - k_0) \cdot (x - \frac{d\omega}{dk}(k_0) \cdot t)),$$

- que l' on peut enfin réécrire de la façon suivante,

$$\Psi(x, t) \approx \frac{\exp(i(k_0 \cdot x - \omega(k_0) \cdot t))}{\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} d(\delta k) \Psi^F(k_0 + \delta k, 0) \cdot \exp(i\delta k \cdot (x - v_g \cdot t)),$$

où  $(k - k_0) = \delta k$  tandis que la vitesse de groupe  $v_g$  est définie par  $v_g = \frac{d\omega}{dk}(k_0)$ .

# Dualité onde-corpuscule: paquet d' onde quantique et vitesse de groupe

- On voit donc qu' un paquet d' onde se comporte<sup>7</sup> comme une onde solitaire<sup>8</sup> se déplaçant à la vitesse de groupe  $v_g = \frac{d\omega}{dk}(k_0)$ .

---

<sup>7</sup>A une modulation globale par une onde plane de type  $\exp(i(k_0 \cdot x - \omega(k_0) \cdot t))$  près.

<sup>8</sup>A la différence d' une onde stationnaire qui se déforme sans se déplacer, une onde solitaire se déplace sans se déformer.

# Dualité onde-corpuscule: paquet d' onde quantique et vitesse de groupe

- La relation de dispersion de de Broglie peut se réécrire comme suit

$$\omega^2 = c^2 k^2 + c^2 k^2,$$

et donc  $2\omega \frac{d\omega}{dk} = 0 + c^2 2k$ , d' où l' on dérive la vitesse de groupe

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = c^2 \frac{k}{\omega} = \frac{c^2}{\lambda \nu} = \frac{c^2}{c^2/\nu} = \nu,$$

en accord avec l' interprétation de de Broglie initiale selon laquelle on a affaire à un paquet d' ondes se propageant à vitesse  $\nu$ .

# Dualité onde-corpuscule: paquet d' onde quantique et vitesse de groupe

Quant à la vitesse de phase en ce cas, celle-ci vaut

$$v_{phase} = \lambda\nu = \frac{c^2}{v}$$

Non seulement, la vitesse de phase diffère de la vitesse de groupe,

$$v_{paquetd'onde} = v_g = \frac{d\omega}{dk} \quad (\neq v_{phase} = \frac{\omega}{k}),$$

mais elle est plus élevée que la vitesse de la lumière en général<sup>9</sup>, ce qui n' est pas tellement dérangent vu qu' elle caractérise des ondes planes qui ne se rencontrent pas dans la nature.

Les paquets d' ondes sont par contre couramment produits en laboratoire, et la vitesse de groupe est une quantité physique mesurable...

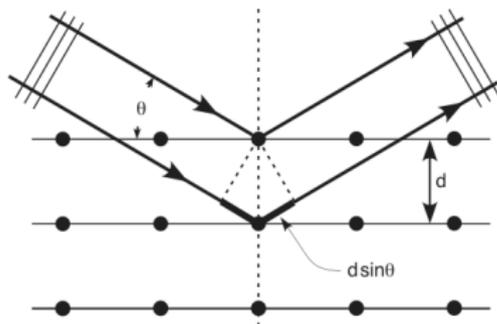
<sup>9</sup>Sauf dans le cas des particules de masse nulle pour lesquelles la relation de dispersion  $\omega = c \cdot k$  est linéaire.

## Quantification des niveaux d'énergie et ondes stationnaires.

- Last but not least, de Broglie comprend que la quantification des niveaux d'énergie, qui se ramène à une quantification des fréquences via la relation  $E = h\nu$ , s'explique en termes d'ondes stationnaires.
- Il est en effet bien connu que les fréquences des ondes stationnaires sont quantifiées, comme on le voit en musique par exemple où les fréquences (notes) sont entre elles dans des rapports entiers.
- Tout ceci fera dire à Einstein que *...de Broglie a soulevé un coin du voile...*

# Dualité onde-corpuscule: confirmations expérimentales

- La première confirmation expérimentale des idées de de Broglie, dûe à Davisson et Germer (1927), a été réalisée avec des électrons.
- Lors de telles expériences on observe des interférences constructives et destructives à la sortie du cristal périodique sur lequel on envoie les ondes.
- Les angles auxquels on observe ces interférences dépendent de la longueur d'onde, en accord avec la théorie de Bragg en optique (cfr figure ci-dessous).



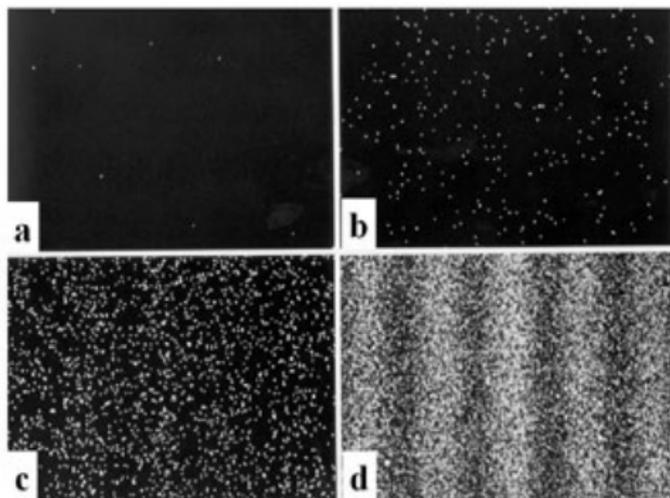
- Lors de l'expérience de Davisson et Germer (1927), on a pu vérifier que les électrons étaient diffractés par un cristal exactement de la même manière que des rayons X, en accord avec les prédictions de de Broglie concernant le lien entre longueur d'onde et impulsion<sup>10</sup> ...
- de Broglie recevra le prix Nobel en 1929, ainsi que Davisson et Germer.

---

<sup>10</sup>Selon laquelle, le cas échéant, la longueur d'onde de de Broglie associée à des électrons "lents" d'énergie  $54\text{eV} = 1,610^{-19} \cdot 54$  Joule était de l'ordre de 1,6 Angstroem, ce qui correspond dans le cas de la lumière au domaine des rayons X. 

# Ondes de matière: développements technologiques.

- Depuis lors, la technologie a progressé et l'on a pu observer des interférences dont le motif se construit par accumulation de détections de particules individuelles (“clics”).
- Ci-dessous, un patron d'interférence électronique obtenu avec des électrons par Tonomura (Hitachi).



Single-electron Build-up of Interference Pattern

# Ondes de matière: développements technologiques.

- Plus récemment on a fait interférer des neutrons, envoyés un par un dans l'interféromètre.

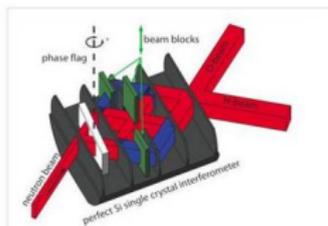


Figure 1

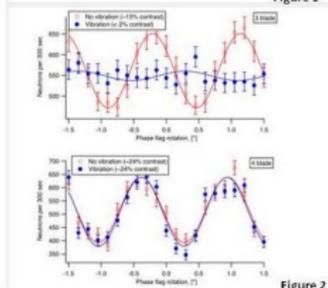


Figure 2

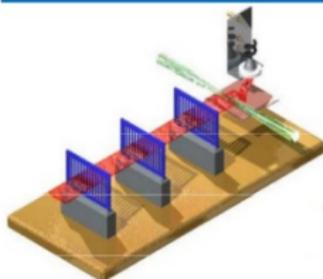
# Ondes de matière: développements technologiques.

- Dans ces expériences “tout se passe comme si” les neutrons dont la taille (longueur de cohérence) est d'environ  $10^{-10}$  mètre passaient simultanément dans les deux bras de l'interféromètre séparés de 30 cm.
- Si on extrapolait ces résultats à l'échelle d'une personne de taille 1,80 mètre on trouverait que la personne est délocalisée entre deux régions distantes de  $1,8 \cdot 10^{10} \cdot 0,3 \text{ mètre} = 5,4 \cdot 10^9 \text{ m}$  environ 14 fois la distance Terre-Lune.

# Ondes de matière: développements technologiques.

- On est capable aujourd'hui de faire interférer des atomes, des molécules et même des macromolécules avec elles-mêmes, toujours en accord avec les relations de de Broglie.
- Des interféromètres atomiques montés sur des camions permettent par exemple de cartographier les variations de la constante de gravité  $g$  à la surface de la Terre, ce qui donne des informations sur le sous-sol et l'éventuelle présence de nappes de pétrole dans celui-ci.

First realization of Talbot Lau interferometry for molecules

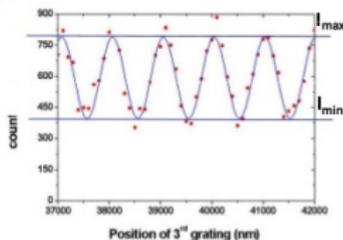


$g = 990 \text{ nm}$  (period)  
 $d = 450 \text{ nm}$  (slit opening)  
 $b = 500 \text{ nm}$  (membrane thickness)



Def. Visibility:

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$



# Ondes de matière: développements théoriques.

- Dans sa thèse, de Broglie n'a pas écrit explicitement quelle est l'équation d'onde régissant l'évolution temporelle des paquets d'onde quantiques.
- C'est Schrödinger qui écrira cette équation en 1925-1926.
- Il en déduira dans un premier temps le spectre de Planck pour l'oscillateur harmonique, et le spectre de Bohr pour l'atome d'hydrogène.
- Il expliquera aussi la structure périodique des éléments.
- Cette équation est l'équation la plus citée et la plus appliquée dans la physique du 20ème siècle, avec de multiples applications en physique du solide, chimie quantique, physique des particules, physique atomique, optique quantique, information quantique etcetera etcetera.

- **Remarque:**

L'équation de Schrödinger est non-relativiste, mais c'est la limite d'une équation relativiste, l'équation dite de Klein-Gordon qui a été "découverte" simultanément par de Broglie, Schrödinger Klein et Gordon en 1926<sup>11</sup>.

---

<sup>11</sup>H. Kragh: Equation with the many fathers. The Klein-Gordon equation in 1926. *Am. J. Phys.* , **52**, 1024, (1984).

## Equation de Schrödinger.

- L'équation de Schrödinger décrit la dynamique des ondes de matière de de Broglie; elle s'écrit comme suit:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(x, t) + V(x, t) \Psi(x, t),$$

- C'est la première équation fondamentale dans laquelle le nombre imaginaire  $i$  (la racine de -1) apparaît explicitement.
- La fonction d'onde  $\Psi$  est une fonction à valeur complexe, ce qui rend l'interprétation de l'équation difficile.



## Interprétation de Born.

- L'on peut exprimer la fonction d'onde sous forme polaire:

$$\Psi(x, t) = R(x, t)e^{i\varphi(x, t)},$$

où  $R(x, t)$  et  $\varphi(x, t)$  sont deux fonctions réelles.

- La quantité  $R(x, t)^2$  est conservée en vertu de l'équation

$$\frac{\partial R(x, t)^2}{\partial t} + \nabla \cdot \left( R(x, t)^2 \frac{\hbar \nabla \varphi(x, t)}{m} \right) = 0,$$

ce qui amène Schrödinger à interpréter  $R^2$ , dans un premier temps, comme une densité de charge électronique.

## Interprétation de Born.

- En 1926, Born propose d'interpréter cette densité comme une densité de probabilité, interprétation encore communément admise aujourd'hui.
- Selon cette interprétation (aussi appelée Born rule),  $R(x, t)^2$  représente la probabilité de trouver, à l'instant  $t$ , la particule à la position  $x$ .



## **Le concept de trajectoire: interprétations divergentes.**

- Aujourd'hui encore il n'y a pas de consensus quant à l'interprétation de la théorie quantique, en particulier pour ce qui concerne le concept de trajectoire.
- Nous distinguerons ici l'interprétation orthodoxe (dite de Copenhague: Bohr, Heisenberg, Pauli, Rosenfeld et bien d'autres) de l'interprétation réaliste (Einstein, de Broglie, Bohm et quelques autres).

## Ecole réaliste: onde **PLUS** particule.

- Selon l'interprétation réaliste, les particules ont à tout instant une trajectoire bien définie.
- Mathématiquement cela signifie qu'elles ont à tout instant une position et une vitesse bien définies.
- L'on peut donc leur associer à tout instant 6 nombres réels (les coordonnées de la position et de la vitesse).
- L'état du système est dans cette approche défini par ces 6 coordonnées **PLUS** la fonction d'onde du système  $\Psi(x, t)$ .

## Ecole réaliste: équation de guidance de de Broglie.

- En 1926, de Broglie suggère, en se basant sur une analogie avec la dynamique des fluides, que la vitesse des particules quantiques obéit à l'équation suivante (formule du guidage):

$$\frac{dx(t)}{dt} = v(x, t) = \frac{\hbar}{m} \nabla \varphi(x, t) \Big|_{x=x(t)}, \quad (2)$$

- Dans cette approche l'onde de Schrödinger guide la particule quantique.



## **Ecole réaliste: équation de guidance de de Broglie.**

- Cette dynamique est aujourd'hui appelée dynamique de de Broglie-Bohm.
- Dans cette approche, les objets quantiques se conduisent comme des corpuscules (points matériels) et possèdent à chaque instant une position et une vitesse bien définies.
- Par contre l'onde de matière influence leur dynamique...

## Copenhague: onde OU particule.

- selon l'interprétation orthodoxe, il n'y a pas de raison de supposer que les objets quantiques possèdent une trajectoire bien définie, et cette idée contredirait même la théorie quantique.
- Ceci est illustré par la relation d'incertitude de Heisenberg:

$$\delta x \delta v_x \geq \frac{\hbar}{2m} \quad (3)$$

- En particulier, lorsque la position est bien définie, l'incertitude est petite sur la position et, du fait de la relation d'incertitude, l'incertitude ou imprécision sur la vitesse est grande, et vice versa.
- Dans cette approche le concept même de trajectoire est considéré comme obsolète et mal défini.
- Il est donc "interdit" d'associer des trajectoires aux objets quantiques.

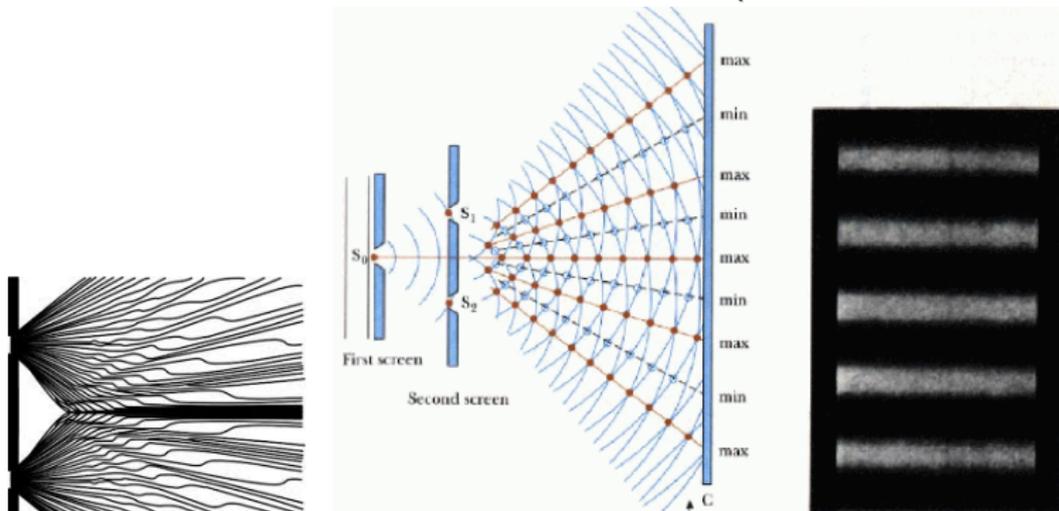


# Ondes de matière: interprétations divergentes.

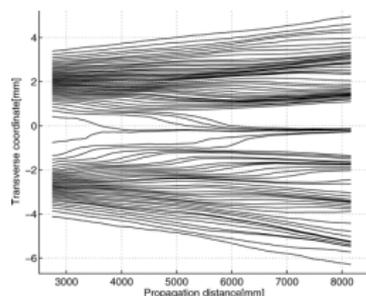
## Illustration: l'expérience de la double fente.

### Ecole réaliste: dynamique de de Broglie.

- Dans l'approche de de Broglie, lorsqu'une particule passe à travers l'interféromètre, elle passe à travers une des deux fentes mais en sortie sa trajectoire est guidée par l'onde de matière.
- L'onde par contre passe par les deux fentes en même temps et donc en sortie, on observe des interférences (cfr image ci-dessous).



## Illustration: l'expérience de la double fente.



**Résultats des reconstitutions des trajectoires de photons uniques sur base de données expérimentales par le groupe de E. Steinberg (Toronto, 2010).**

## **Illustration: l'expérience de la double fente.**

### **Ecole de Copenhague et complémentarité.**

- Selon l'interprétation orthodoxe, lorsque des interférences sont observées, le système se conduit comme une onde et non pas comme une particule.
- L'onde étant délocalisée tout se passe comme si l'objet passait simultanément à travers les deux fentes.
- Si par contre on mesure par quelle fente la particule est passée, l'interférence disparaît et l'objet se conduit comme une particule localisée.
- Dans cette approche, les comportements corpusculaires et ondulatoires sont complémentaires et mutuellement exclusifs.

## **Illustration: l'expérience de la double fente.**

### **Ecole de Copenhague et complémentarité.**

- On appelle parfois cette approche la “shut up and compute interpretation” ...
- L'onde  $\Psi$  est ici un outil de calcul permettant de calculer des probabilités, rien de plus.
- Dans cette approche, rien n'existe hors mesure, et on peut même aller jusqu'à dire que la mesure crée la réalité de l'objet quantique.

## Epilogue: de 1924 à nos jours.

- Ni les objections philosophiques de de Broglie en 1926 et 1927, ni celles d'Einstein et Schrödinger en 1935 n'ont influencé à l'époque l'orientation de la recherche en physique fondamentale.
- Dans les années 30 et 40, les théoriciens ont développé la théorie quantique des champs (Quantum Field Theory), une formulation relativiste de la théorie quantique dans laquelle les problèmes d'interprétation sont pour l'essentiel mis de côté.
- LA QFT a fourni une clef de compréhension permettant de décrire les interactions fondamentales entre particules élémentaires (électro-magnétisme, interactions fortes et faibles).
- Il reste un nuage sombre dans le ciel de la QFT: à ce jour, on ne dispose pas, dans une approche QFT, d'une formulation satisfaisante de l'interaction gravitationnelle.

## Epilogue: de 1924 à nos jours.

- Après 1927, de Broglie a laissé en sourdine ses objections sur l'interprétation orthodoxe pendant 25 ans, jusqu'à ce que David Bohm ne relance le sujet en 1952.
- Ceci explique pourquoi on parle aujourd'hui de l'interprétation de l'onde pilote de de Broglie-Bohm.



## Epilogue: de 1924 à nos jours.

- Il n'a pas été possible de trouver une formulation relativiste satisfaisante de cette interprétation, cependant, entre autres parce que la dynamique à plusieurs ( $N$ ) particules doit se faire dans l'espace de configuration à  $N$  dimensions et non pas dans l'espace physique à 3 dimensions.
- Ce problème est lié à la non-localité quantique: tout se passe comme si bon nombre de systèmes quantiques étaient délocalisés dans l'espace, et comme si les corrélations entre ces systèmes se comportaient comme des actions à distance instantanées, ce qui contredit le principe de causalité relativiste cher à Einstein et de Broglie.

## Epilogue: de 1924 à nos jours.

- Le physicien John Bell se penchera à nouveau sur la question de la non-localité quantique en 1964, et inspirera de nouvelles expériences.
- A terme, ces questions stimuleront un nouveau domaine de la physique quantique: l'information quantique, avec de nouvelles applications en algorithmique, cryptographie, communication etc.

## Epilogue: de 1924 à nos jours.

- de Broglie restera opposé à l'idée même de non-localité durant toute sa vie.
- Il développera, avec de nombreux collaborateurs, de nouveaux domaines de recherche dont nous ne parlerons pas plus avant ici:
  - double solution (avec F.Fer, D.Fargue, M.Thiounn, JP Vigier, G.Petiau et autres)
  - théorie de la fusion (avec J.Geheniau, M-A Tonnelat, O. Costa de Beauregard, G.Lochak, J. Vassalo-Pereira et autres)
  - thermodynamique cachée (avec JP Vigier, G.Lochak et autres)
  - dynamique dans espace 3D plutôt que dans l' espace de configuration (avec A. Andrade de Silva)
- Ces travaux sont encore une source d'inspiration aujourd'hui, même si de Broglie a été considéré parfois comme un dissident (tout comme Einstein et Schrödinger), et s'est progressivement détaché de la recherche mainstream.

## Epilogue: de 1924 à nos jours.

- La théorie quantique a entretemps donné lieu à une foule d'innovations technologiques majeures.
- La QFT, et en particulier l'électro-dynamique quantique, est la théorie la plus précise à ce jour.
- Elle questionne cependant nos préconceptions et nos préjugés classiques sur la "réalité".

- Rien ne permet d'affirmer que la fin de la science a déjà eu lieu, et certains questionnements de de Broglie pourraient encore préfigurer des développements inattendus, comme cela a été le cas avec son travail révolutionnaire, prophétique et profondément original de 1923-1924.