

Rappel

Après avoir compris que **la lumière est faite de quanta et que ces quanta peuvent se comporter comme des particules** (p.e. dans l'effet Compton), on s'est posé naturellement la question **si la matière peut manifester un comportement ondulatoire**.

Louis de Broglie a postulé qu'une particule d'énergie E et impulsion p **serait caractérisée par une onde de fréquence $f=E/h$ et longueur d'onde $\lambda=h/p$** .

Avec une série d'expériences effectuées entre 1923 et 1927, Davisson et Germer montrent que **des électrons à haute énergie envoyés sur la surface d'un solide cristallin sont diffractés et produisent une figure d'interférence** caractéristique de la diffraction des ondes.

On montre ainsi que lumière et matière peuvent avoir un comportement ondulatoire ou corpusculaire selon les conditions de l'expérience.

On commence à se poser la question de savoir quelles sont les principes et les lois qui déterminent ces comportements.

Cours 04

L'expérience des deux fentes de Young avec objets quantiques

Le principe de complémentarité

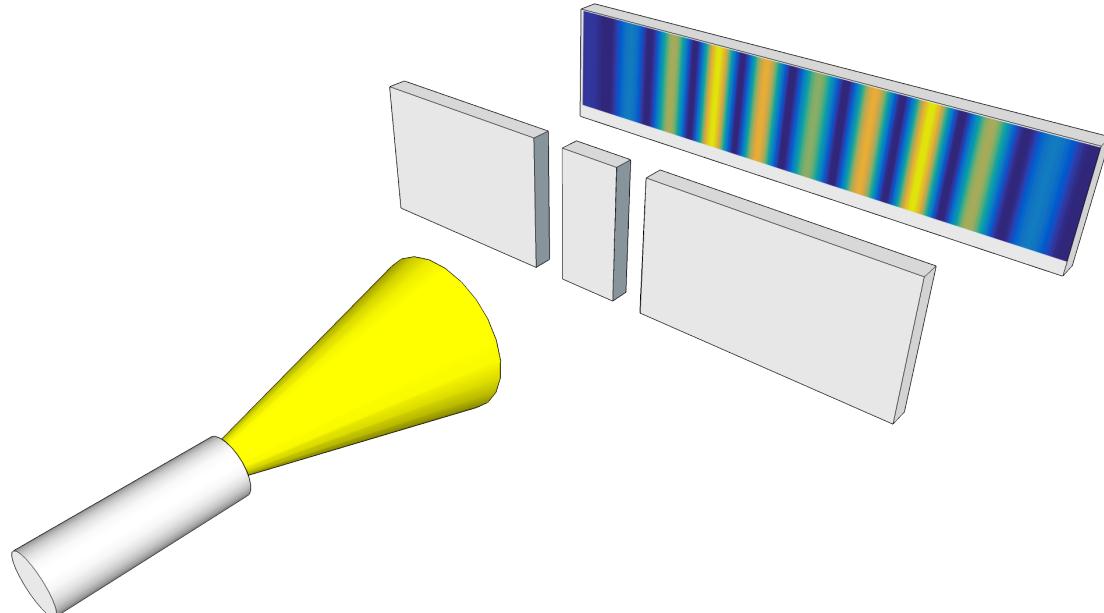
Le principe d'incertitude de Heisenberg

L'expérience à deux fentes de Young

En 1801 Thomas Young a conçu et effectué cette expérience pour démontrer que la lumière est un phénomène ondulatoire. A l'époque, c'était une question ouverte.

La lumière est envoyée sur deux fentes (suffisamment petites et proches). A la sortie, chaque fente se comporte comme une source d'ondes sphériques (à cause de la diffraction), et **les deux sources sont mutuellement cohérentes** (c.-à-d. leur phase relative ne varie pas avec le temps).

Si on récolte la lumière sur un écran, on observe des **franges d'interférence**. Les maxima et minima d'intensité correspondent aux régions où les amplitudes des deux ondes se combinent avec les mêmes signes ou avec signes opposés.



L'expérience de Young: ondes

Le but est maintenant de **définir les concepts d'onde et de particule** en utilisant l'expérience de Young

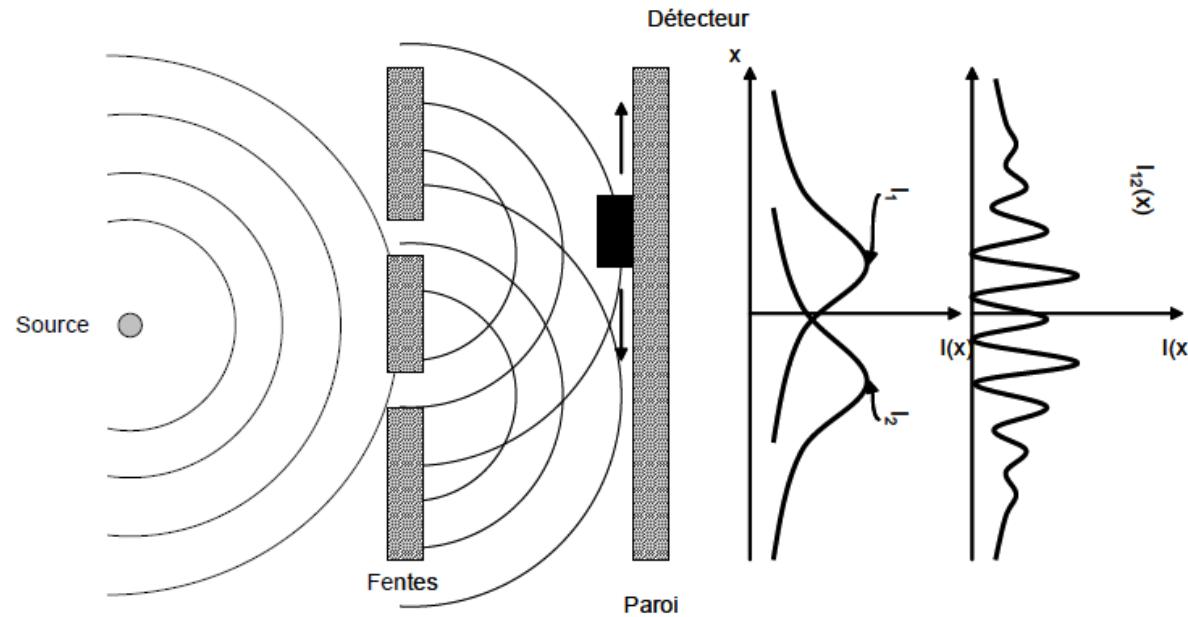
Une onde est un phénomène continu. Imaginez les ondes à la surface de l'eau. Le détecteur à une position donnée mesure une variation continue dans le temps de la hauteur de l'eau.

Si on bloque la première fente, le profil d'intensité mesuré ne montre pas de franges d'interférence. Même chose si on bloque la deuxième fente.

Si on ouvre les deux fentes, une figure d'interférence est mesurée.

Les ondes sont caractérisées par:

- 1. Phénomène continu**
- 2. Interférence**



L'expérience de Young: particules

Faisons la même expérience avec des particules. Richard Feynman, dans ses fameuses «lecture notes» imagine d'utiliser une mitrailleuse qui envoie des balles un peu dans toutes les directions.

Les fentes sont assez étroites que la plupart des balles vont rebondir sur les bords.

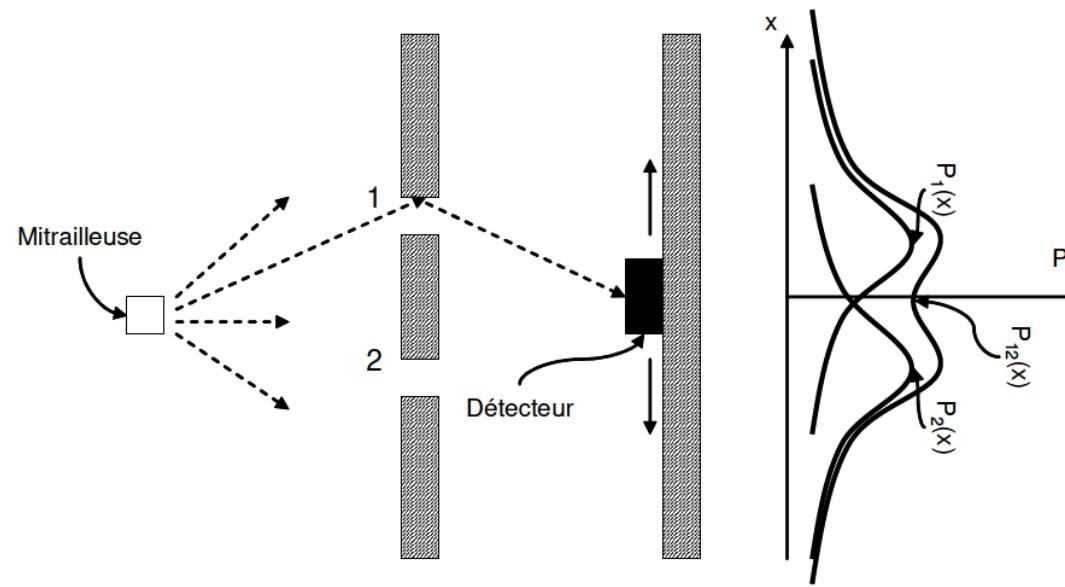
Si on bloque la première fente on observe un certain profil de densité dans l'arrivée des balles. Si on bloque la deuxième, on observe un autre profil.

Si on ouvre les deux fentes, tout simplement le profil observé est la somme des deux profils.

Une particule est un phénomène discret. **Elle passe ou bien par la première fente, ou bien par la deuxième.** C'est pourquoi le résultats est simplement la somme des deux résultats obtenus avec une fente bloquée.

Les particules sont caractérisées par:

- 1. Phénomène discret**
- 2. Pas d'interférence**



L'expérience de Young: objets quantiques

On pense maintenant d'avoir un vocabulaire qui nous permet d'identifier les ondes et les particules. Faisons maintenant l'expérience avec des électrons (il faudra des conditions spéciales, que nous n'allons pas discuter).

Une source d'électron (par exemple un photocathode) envoie les électrons sur les deux fentes. Les électrons, comme les balles, rebondissent et partent dans plusieurs directions.

Le détecteur fait un clic à l'arrivée de chaque électron. On peut les compter. C'est un phénomène discret.

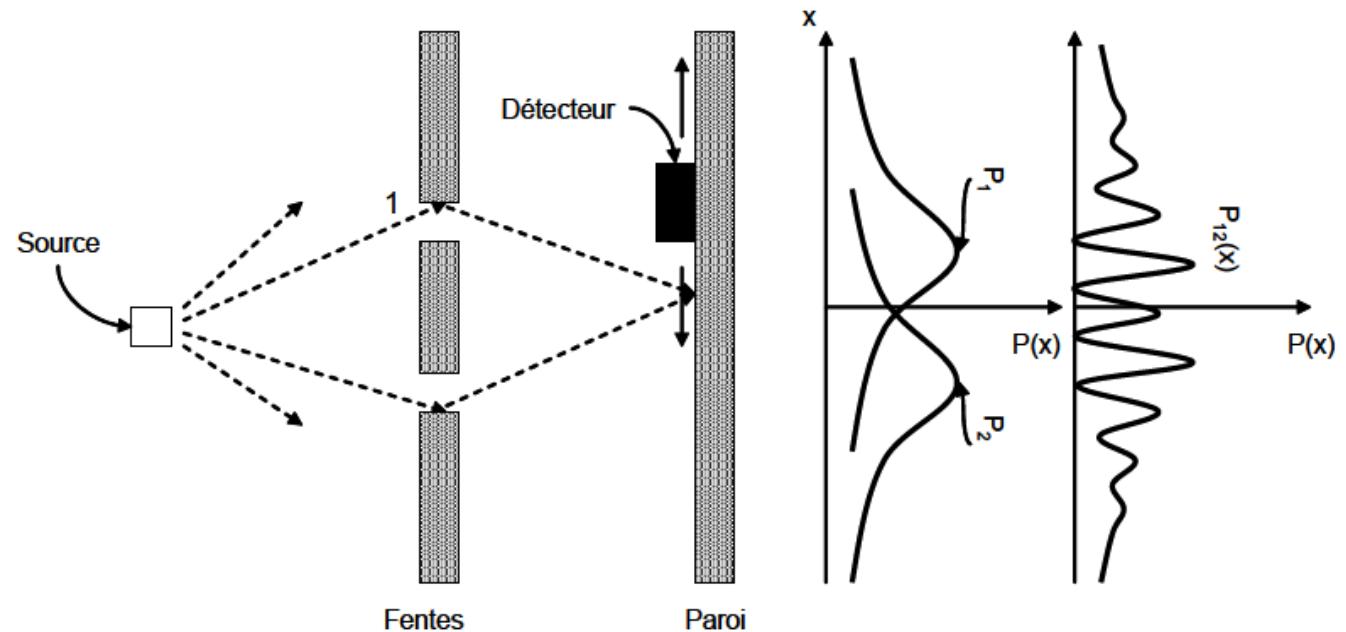
Si on bloque une fente, les profils de densité des électrons détectés ne montre pas de franges.

Si on ouvre les deux fentes, on observe des franges d'interférence!!!

Comportement des électrons:

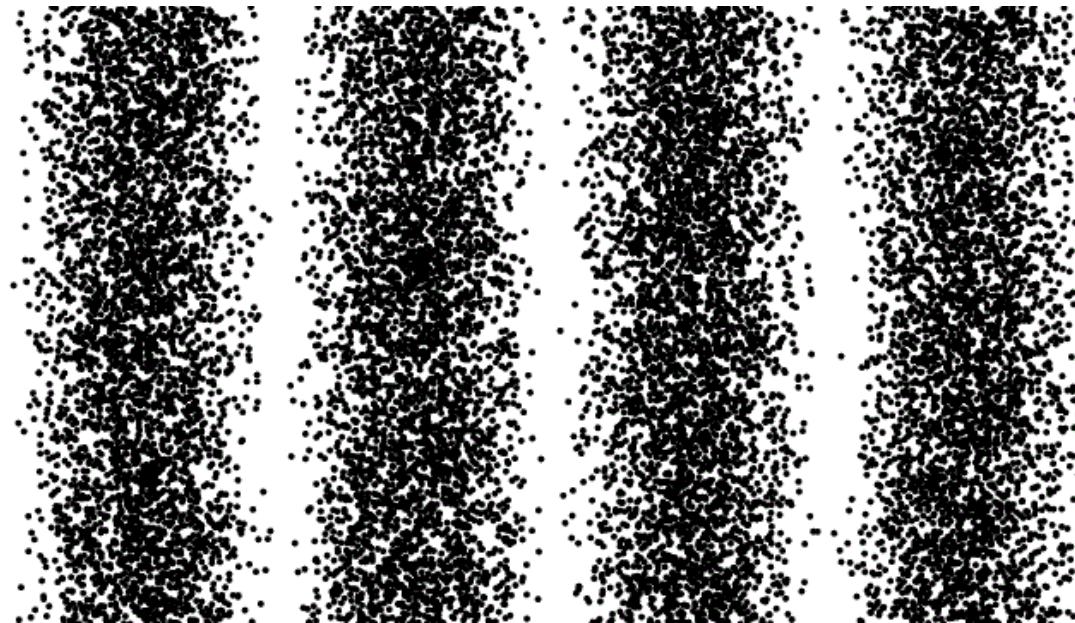
1. Phénomène discret
2. Interférence!

Selon notre vocabulaire, ce ne sont ni des ondes, ni des particules!



L'expérience de Young: objets quantiques

Ce qu'on observerait sur l'écran au fil du temps:



L'expérience avec des électrons uniques a été menée pour la première fois en 1974:

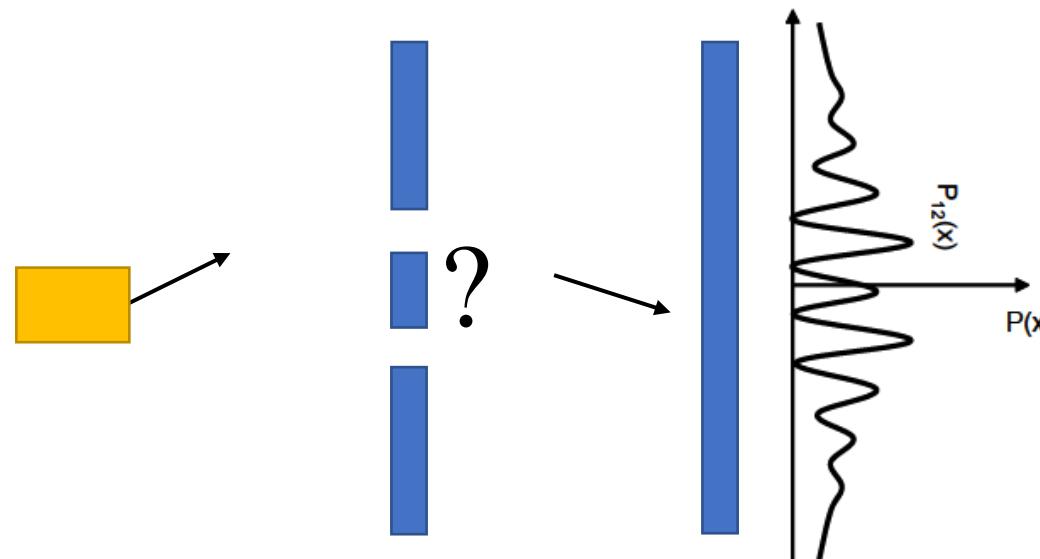
P. G. Merli, G. F. Missiroli, and G. Pozzi, "On the statistical aspect of electron interference phenomena," American Journal of Physics **44**, 306 (1976).

L'expérience de Young avec particules uniques

L'expérience de Young avec objets quantiques (électrons, photons ou autres particules) montre les franges d'interférence même si le débit de particules est si bas qu'il n'y a jamais plus qu'une particule dans l'espace occupé par l'expérience.

Puisque l'interférence apparaît seulement quand les deux fentes sont ouvertes, il est raisonnable de penser que les franges d'interférence sont le résultat d'un effet combiné des deux fentes.

Mais si on n'a jamais plus qu'une particule dans l'expérience, et si on garde la notion classique de particule, on est alors menés à penser que chaque particule passe par une et une seule fente avant d'atteindre l'écran.

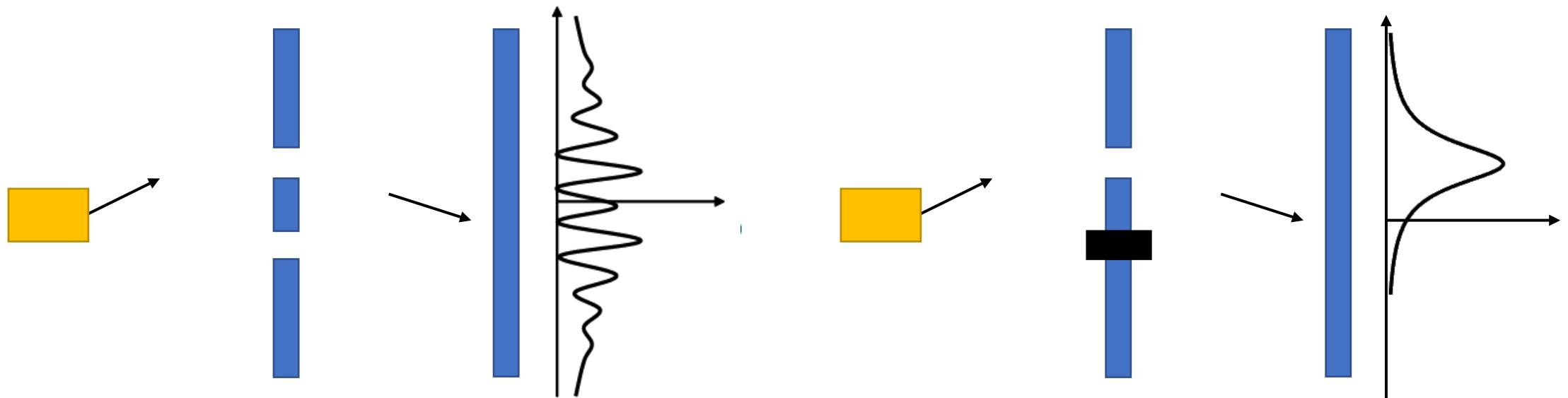


L'expérience de Young avec particules uniques

Si une particule passe par une fente, le fait que l'autre est ouverte ou bloquée ne devrait avoir aucun effet sur le résultat de l'expérience. Cela mène à une contradiction, car le résultat est différent dans les deux cas où une seule fente est ouverte (pas d'interférence) ou les deux sont ouvertes (interférence).

La seule explication possible est que **les concepts classiques d'onde et de particule ne sont pas suffisants pour décrire l'objet quantique utilisé dans l'expérience. Ils ne sont que des descriptions partielles de la vraie nature des objets quantiques.**

Pour ces objets, la question «par où est passée la particule?» (appelée «which-path information» dans la littérature) n'a simplement pas de sens!

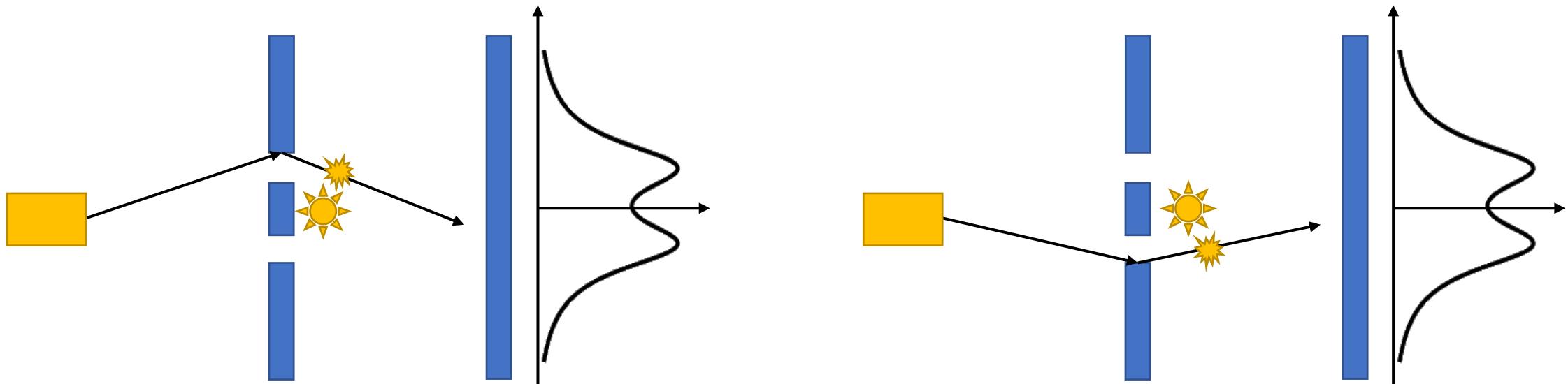


Par quelle fente est-il passé l'électron?

Feynman propose une variante de l'expérience, où une ampoule placée derrière les fentes produit de la diffusion de photons sur les électrons qui passent. On verra ainsi un flash de lumière là où elle est diffusée par l'électron. Cela nous permet de connaître la «which-path information» pour chaque passage d'électron.

On suppose la lumière assez intense pour qu'aucun électron n'échappe au système de détection: chaque passage d'un électron produit un flash.

Le résultat est surprenant. **Dans la même expérience, si on acquiert la «which-path information» les franges d'interférence disparaissent!!!** (l'expérience est conçue de façon à exclure tout effet important de la lumière sur les électrons).

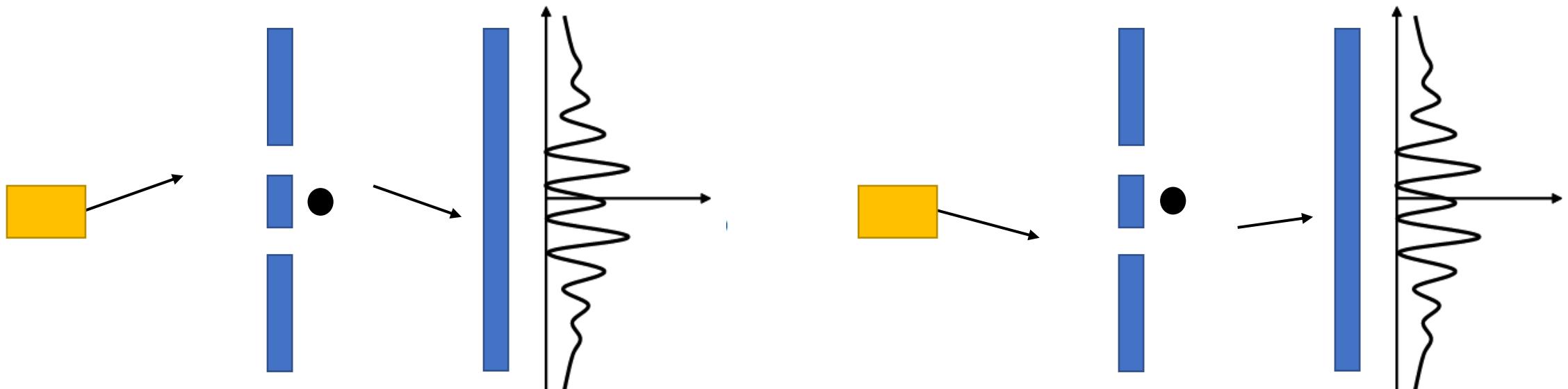


Par quelle fente est-il passé l'électron?

Si par contre on éteint la lumière sans rien changer d'autre, les franges réapparaissent!!!

Il semblerait que toutes tentatives de connaître la «which-path information» (boucher une fente ou allumer l'ampoule) détruisent les franges d'interférence. **La «which-path information», qui est caractéristique de la nature corpusculaire de la matière, semble être incompatible avec la figure d'interférence, qui par contre est caractéristique de la nature ondulatoire de la matière.**

Et si la disparition de l'interférence était simplement due à un effet physique de la lumière qui modifie l'état de l'électron?

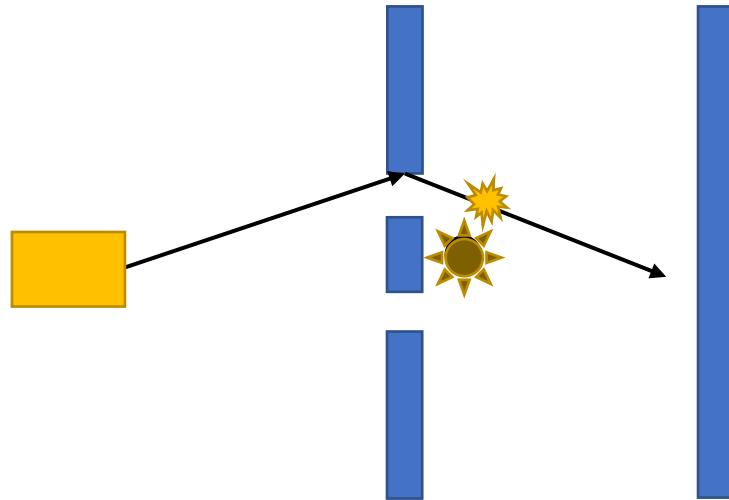


Par quelle fente est-il passé l'électron?

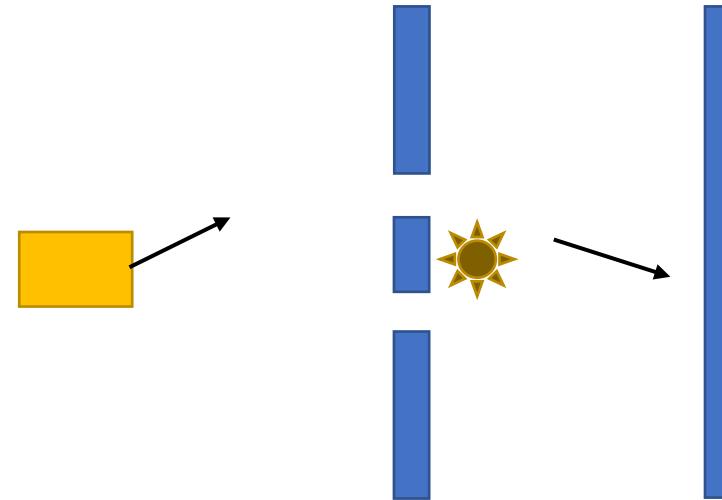
Essayons d'exclure cette hypothèse. On peut s'imaginer une expérience avec une ampoule de plus faible intensité.

Le résultat attendu est celui prévu par la théorie du photon. Il y aura un plus bas débit de photon. Par conséquent, certains électrons arriveront à passer sans produire un flash.

Passage avec flash



Passage sans flash



Par quelle fente est-il passé l'électron?

Le résultat est encore plus surprenant!

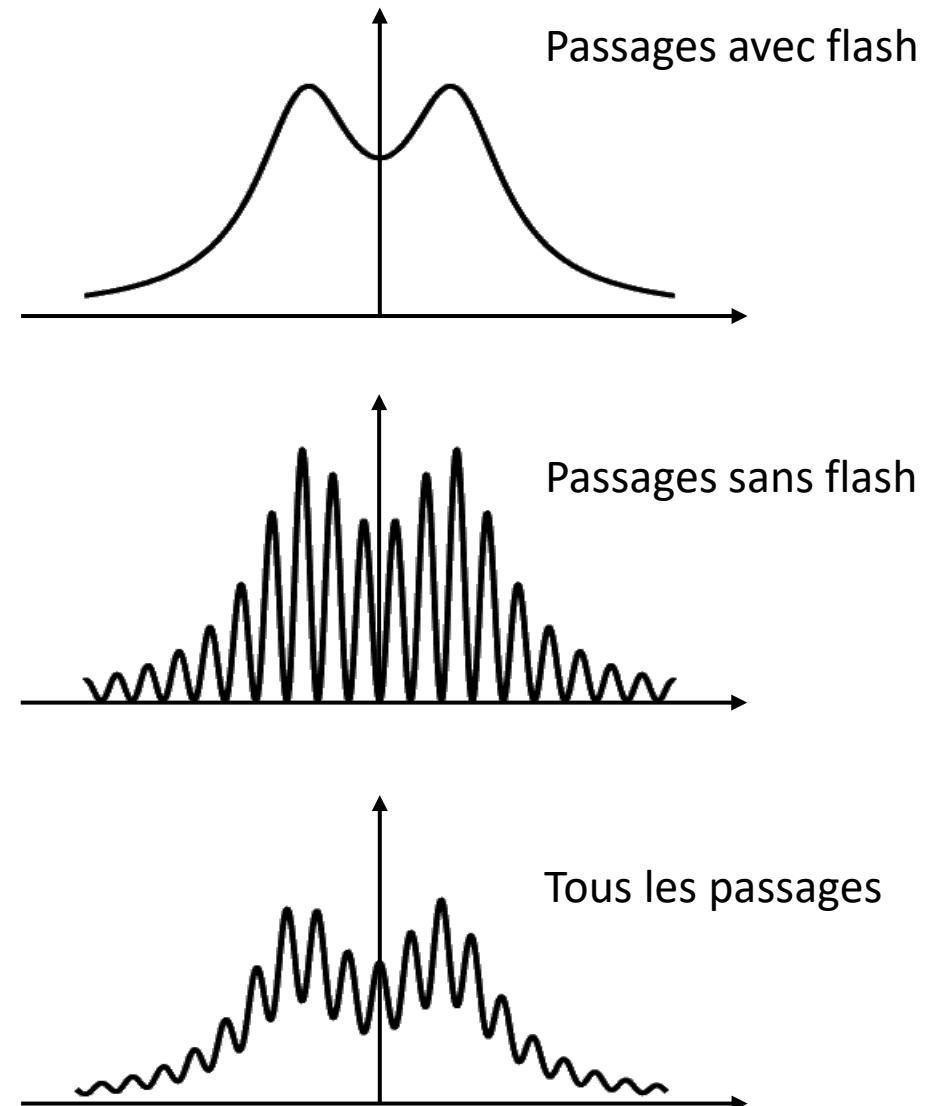
Si on compte seulement les passages avec flash et on met sur un graphique le profil mesuré, on observe le résultat attendu pour des particules: **pas d'interférence!**

Si on ne compte que les passages sans flash, alors on observe le comportement attendu pour des ondes: **interférence totale!**

Si on compte tous les électrons, avec ou sans flash, on trouve un profil où les franges d'interférence n'ont **pas un contraste maximal** comme dans le cas des ondes.

Cela confirme notre hypothèse: **la connaissance du chemin de l'électron et l'apparition de franges d'interférence sont deux phénomènes mutuellement exclusifs.**

C'est le principe de complémentarité.



Par quelle fente est-il passé l'électron?

On a appris que l'énergie de chaque photon est proportionnelle à sa fréquence, alors qu'elle ne dépend pas de l'intensité de la lumière.

On pourrait penser que, **même avec une ampoule de faible intensité, chaque photon qui fait une collision avec un électron arrive à modifier son état** (et finit par rendre la «which-path information» manifeste).

Pour réduire l'énergie des photons, on peut alors s'imaginer de réduire leur fréquence. Mais en réduisant la fréquence on augmente la longueur d'onde.

Ce qui va se passer est qu'on atteint une longueur d'onde suffisamment grande à être comparable avec la distance entre les fentes. **Alors les flashes vont avoir une taille qui ne nous permet plus de distinguer par quelle fente est passée la particule.**

Au fur et à mesure que des longueurs d'onde de plus en plus grandes sont utilisées dans l'expérience, les franges d'interférence vont graduellement apparaître, avant avec un contraste partiel et puis, dans la limite de grande longueur d'onde de l'ampoule, avec contraste 100%

Encore une fois il est impossible de contourner le principe de complémentarité. **Pour avoir des franges d'interférence il faut renoncer à la connaissance de la trajectoire de la particule.**

Le principe de complémentarité (1928)

Après des longues réflexions par toute la communauté des physiciens, **Niels Bohr énonce en 1928 le principe de complémentarité:**

Les comportements d'onde et de particules ne sont que des aspects partiels de la réalité physique. Chaque objet quantique peut manifester un comportement d'onde ou de particule, selon les conditions.

Le principe de complémentarité cependant affirme que **les deux comportements se manifestent de manière mutuellement exclusive**: ou bien on voit un comportement ondulatoire, ou bien on en voit un de particule.

Dans l'expérience de Young avec l'ampoule, **la «which-path information» – qui est une caractéristique des particules – ne se manifeste jamais dans les mêmes conditions qui produisent des franges d'interférence – qui sont une caractéristique des ondes.**

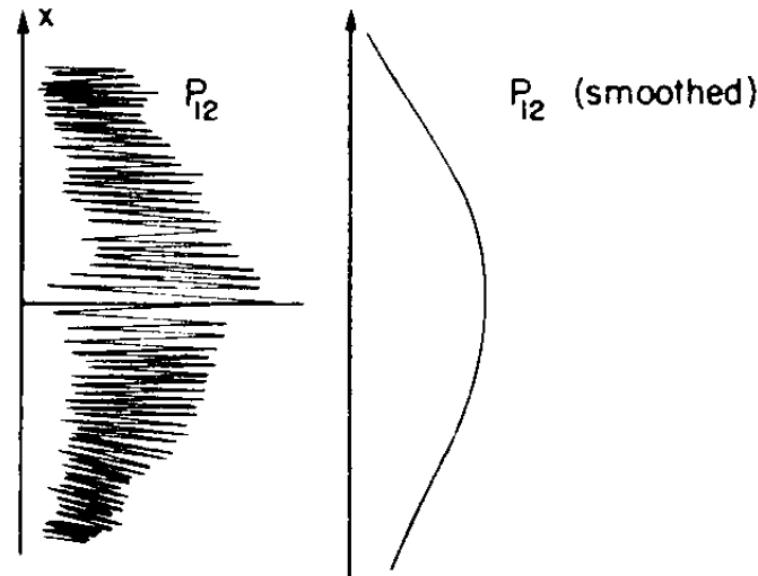
Le principe de complémentarité est un des fondements de la physique quantique.

Le principe d'incertitude de Heisenberg (qu'on verra par la suite) en est un cas particulier: la connaissance de la position de la particule (which-path) et la connaissance de son impulsion (onde, car $p=h/\lambda$) sont mutuellement exclusifs.

Qu'en est-il de la mitrailleuse?

Si les particules doivent manifester un comportement ondulatoire dans l'expérience de Young, pourquoi on ne voit pas de franges d'interférence pour les balles de mitrailleuse.

Une réponse simple est que **les franges en réalité sont présentes**. Cependant, la grande masse des balles correspond à **une longueur d'onde de de Broglie tellement petite que les franges d'interférence seront extrêmement fines, et impossibles à détecter** même avec les instruments les plus précis.



Curiosité: Young avec grosses molécules

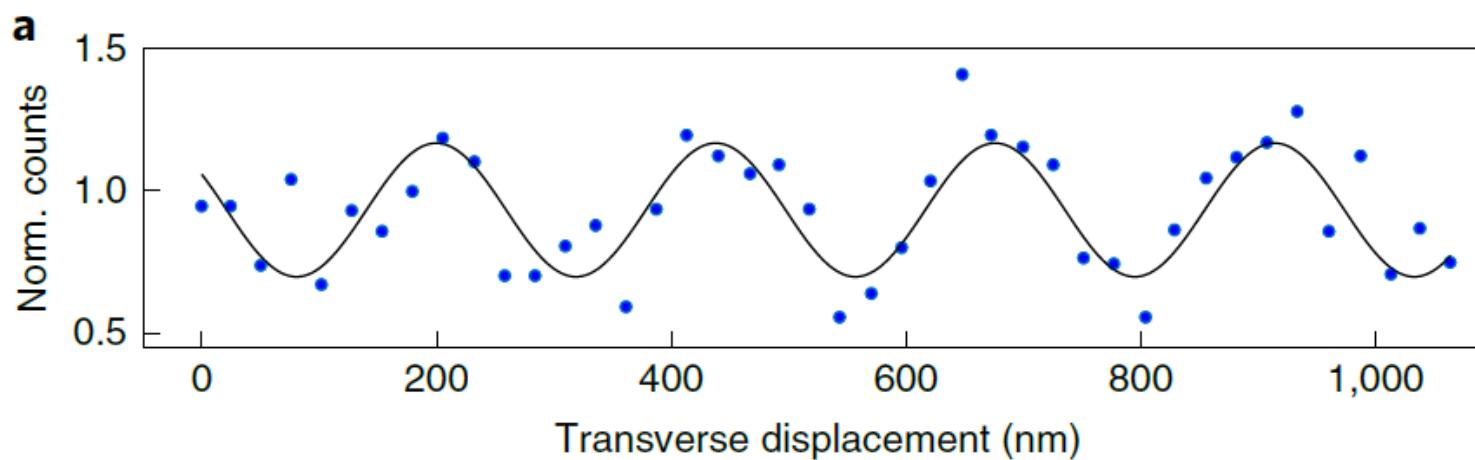
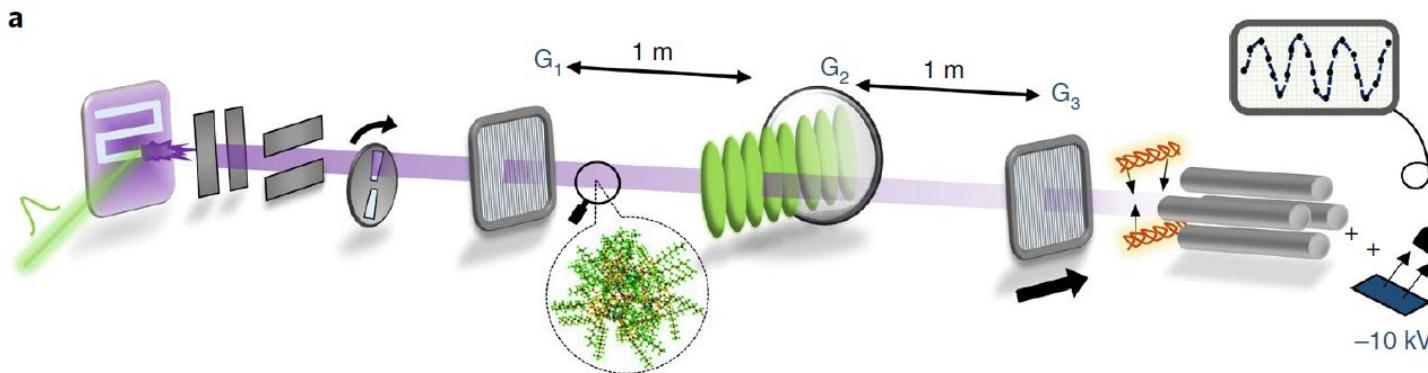
Le record d'interférence d'objets quantique macroscopiques est établi en 2019, avec des molécules de 2000 atomes.

Les «fentes» sont constitué par un réseau optique, où les barrières entre les fentes sont faites de lumière, pas de matière.

L'interféromètre est très long, 2m. L'avantage est que, même si les fentes sont beaucoup plus grandes que la longueur d'onde, une toute petite diffraction aura lieu et on pourra observer l'interférence à de très petits angles.

Matter-wave interference experiments provide a direct confirmation of the quantum superposition principle, a hallmark of quantum theory, and thereby constrain possible modifications to quantum mechanics¹. By increasing the mass of the interfering particles and the macroscopicity of the superposition², more stringent bounds can be placed on modified quantum theories such as objective collapse models³. Here, we report interference of a molecular library of functionalized oligo-porphyrins⁴ with masses beyond 25,000 Da and consisting of up to 2,000 atoms, by far the heaviest objects shown to exhibit matter-wave interference to date. We demonstrate quantum superposition of these massive particles by measuring interference fringes in a new 2-m-long Talbot-Lau interferometer that permits access to a wide range of particle masses with a large variety of internal states. The molecules in our study have de Broglie wavelengths down to 53 fm, five orders of magnitude smaller than the diameter of the molecules themselves. Our results show excellent agreement with quantum theory and cannot be explained classically. The interference fringes reach more than 90% of the expected visibility and the resulting macroscopicity value of 14.1 represents an order of magnitude increase over previous experiments².

Curiosité: Young avec grosses molécules



Le principe d'incertitude de Heisenberg

Le principe d'incertitude de Heisenberg est un cas spécial du principe de complémentarité.

L'analogie entre l'onde de de Broglie et l'onde électromagnétique nous indique que la forme d'une onde de de Broglie avec une longueur d'onde λ fixée, est une onde plaine:

$$\psi(x) \propto e^{\frac{2\pi i}{\lambda} x}$$

On remarque que cette onde existe dans tout l'espace! Elle est infiniment étendue!

On verra plus tard que, **selon l'interprétation orthodoxe de la physique quantique, le module carré de cette onde exprime la (densité de) probabilité de trouver la particule à l'endroit x .**

Une onde de de Broglie donc a une impulsion bien définie, $p=h/\lambda$, mais la position est totalement indéterminée, car la probabilité est uniforme dans tout l'espace.

Le principe d'incertitude de Heisenberg

Nous pouvons aussi considérer le cas limite opposé, c.-à-d. **une onde qui est infiniment localisée à un endroit de l'espace.** Le seul instrument mathématique possible pour exprimer une telle onde est la fonction delta de Dirac:

$$\psi(x) \propto \delta(x - x_0)$$

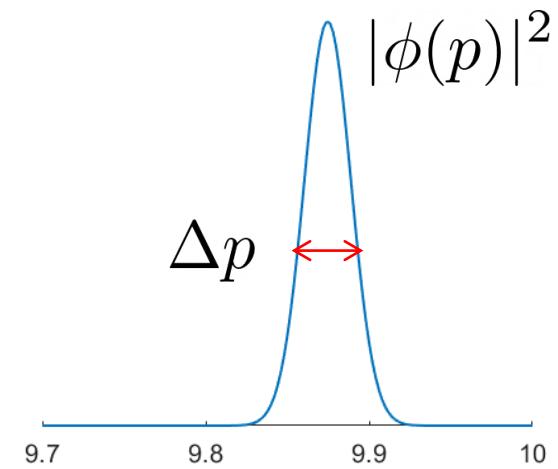
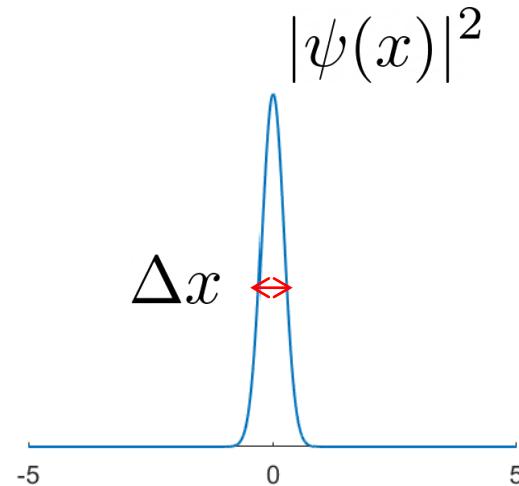
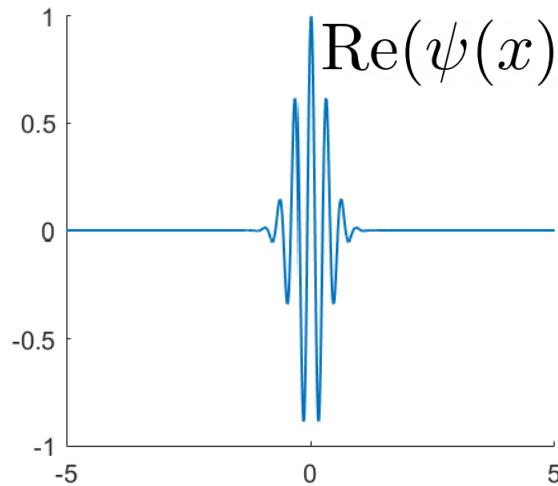
La transformée de Fourier de cette fonction généralisée nous dit qu'elle est faite **d'une superposition d'ondes de de Broglie avec toutes les possibles valeurs de la longueur d'onde, et donc de l'impulsion.**

Cet autre cas limite correspond à une position infiniment déterminée et une impulsion totalement indéterminée.

Le principe d'incertitude de Heisenberg

Les cas intermédiaires entre ces deux cas limites sont de loin les plus communs dans la réalité qui nous entoure.

La «fonction d'onde» d'une particule a la plupart des fois la forme d'un paquet d'onde.



$$\phi(p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\hbar}} \int_{-\infty}^{+\infty} \psi(x) e^{-i\frac{px}{\hbar}} dx$$

Le principe d'incertitude de Heisenberg

Le principe d'incertitude de Heisenberg affirme que les étendus des paquets d'onde en x et en p sont liés par:

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

On comprend ce principe de la façon suivante: **Il est impossible de connaître simultanément la position exacte et la quantité de mouvement exacte d'un objet quantique.**

Plus on cherche à connaître la position avec précision, plus on doit renoncer à l'information sur la quantité de mouvement, et vice-versa.

Le lien avec le principe de complémentarité vient du fait que la connaissance de la position est une caractéristique du comportement corpusculaire, alors que la connaissance de l'impulsion (et donc de la longueur d'onde) est une caractéristique du comportement ondulatoire.

Le principe d'incertitude n'est pas une simple conséquence des limites techniques des instruments de mesure. **Il est plutôt une propriété fondamentale des lois de la nature.**

Questions ouvertes

Que sont les ondes de de Broglie? Sont-elles associées à des quantités physiques, comme pour les ondes sonores (pression) ou les ondes électromagnétiques (champs électrique et magnétique)?

On verra que, contrairement à la plupart des phénomènes ondulatoires communs, **les ondes de de Broglie ne correspondent pas à des oscillations de quantités physiques**. Elles ne sont qu'une représentation mathématique qui permet d'expliquer le résultat des mesures selon le lois de la physique quantique.

Mais alors, **quelles sont les lois physiques?** Peut-on écrire une équation d'onde pour les ondes de matière, tout comme on peut écrire des équations d'onde pour les ondes électromagnétiques ou pour les ondes sonores?

On verra que **l'équation de Schrödinger décrit le comportement des ondes de de Broglie**. Elle ne peut pas être déduite de principes premiers, et dans la théorie formelle de la physique quantique elle intervient comme un axiome.

Plus en général, **quel est le lien entre ces ondes** (qui vraisemblablement sont étendues dans l'espace) **et les résultats des mesures de quantités locales**, comme par exemple la position d'une particule?

On verra que la mesure est un processus plus complexe en physique quantique que dans la physique classique. En particulier, on est obligé d'admettre **un caractère aléatoire fondamental pour les résultats de la plupart des mesures**.