

Rappel

Pour expliquer le spectre du corps noir, on introduit la notion de quanta d'énergie pour le rayonnement. On se pose naturellement la question: **la quantification de l'énergie est-elle une propriété fondamentale de la lumière?**

Les expériences sur l'effet photoélectrique et la théorie développée par Einstein montrent clairement que c'est le cas. **La lumière de fréquence ν possède une énergie qui est quantifiée par unités $E=h\nu$.** On appelle ces quanta d'énergie «**photons**».

L'effet photoélectrique consiste en l'émission d'électrons de la surface d'un métal soumis à un rayonnement électromagnétique. La lumière cède son énergie aux électrons qui sont arrachés du métal. Les caractéristiques observées dans les expériences sont en contradiction avec la théorie classique, mais en parfait accord avec la théorie du photon.

La notion de quanta d'énergie mène naturellement à se poser la question, **si ces quanta sont des vraies particules élémentaires**. La réponse positive à cette question vient de l'expérience sur la diffusion Compton.

Dans l'effet Compton, la lumière diffusée par un électron change de longueur d'onde en fonction de l'angle de diffusion. Ce phénomène n'est pas prévu par la théorie classique mais il est expliqué très bien par les lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion pour un processus de collision entre particules.

Un photon de fréquence ν et longueur d'onde λ , possède une énergie $E=h\nu$ et une impulsion $p=h/\lambda$.

Cours 03

La nature corpusculaire de la lumière

La nature ondulatoire de la matière et l'expérience de Davisson-Germer

L'expérience des deux fentes de Young

Le principe de complémentarité

Le photon comme particule

L'effet Compton montre pour la première fois que **la lumière peut avoir une comportement corpusculaire** sous certaines conditions.

Pour un rayonnement de fréquence ν et longueur d'onde $\lambda=c/\nu$, les particules élémentaires qui le composent – les photons – ont une énergie et une impulsion données par

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

Ce sont les **relations de Einstein**.

A remarquer que le photon est une particule de masse zéro, il a toujours la vitesse de la lumière, et doit donc être décrit avec les lois de la relativité.

La lumière: ondes ou particules?

La lumière montre un comportement ondulatoire sous certaines conditions, alors que sous d'autres conditions, comme dans l'effet photoélectrique et l'effet Compton, elle montre un comportement corpusculaire.

Le rayonnement électromagnétique est-il onde ou particule?

...ou bien, peut-être, ces deux notions d'onde et de particule, très intuitives pour nous, ne sont pas suffisantes pour décrire correctement la réalité physique.

La nature ondulatoire de la matière

En 1923, Louis de Broglie proposa l'idée que **les particules élémentaires qui forment la matière peuvent aussi avoir un comportement ondulatoire ou corpusculaire selon les conditions.**

Cette hypothèse à l'époque n'avait aucun soutien expérimental. Cependant, associer une onde à une particule élémentaire est une conclusion très naturelle si on fait une analogie entre les lois de l'électromagnétisme de Maxwell et les lois de la mécanique relativiste de Einstein.

Louis de Broglie postule que une particule avec énergie E et impulsion p est caractérisée par une onde avec une fréquence et une longueur d'onde données respectivement par

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

Ensemble avec les deux autres relations pour la lumière,

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

elles sont connues comme **les relations de Einstein-de Broglie.**

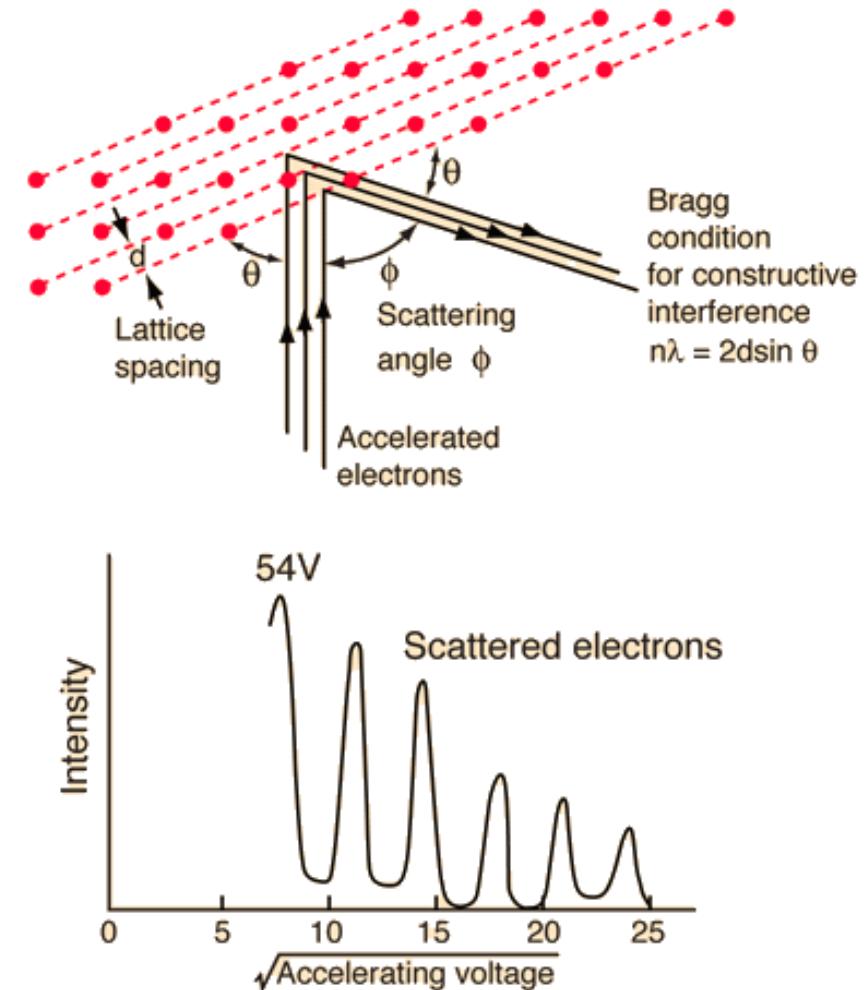
L'expérience de Davisson-Germer (1923-27)

Davisson et Germer ont découvert par hasard en 1923 que l'hypothèse de de Broglie était correcte.

Ils ont mesuré une figure de diffraction en faisant diffuser des électrons à haute énergie sur la surface cristalline d'un métal.

Les électrons avec une énergie cinétique de 100 eV sont caractérisés par une courte longueur d'onde de de Broglie, ce qui a comme conséquence que l'espacement entre atomes est suffisamment petit pour produire des figures de diffraction.

C'était la première preuve que la matière peut avoir un comportement ondulatoire.



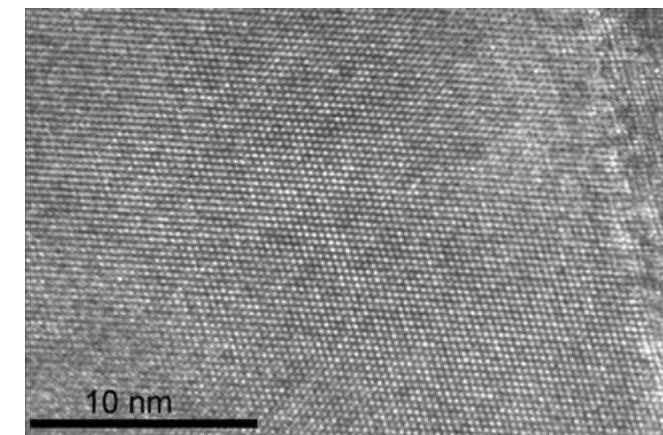
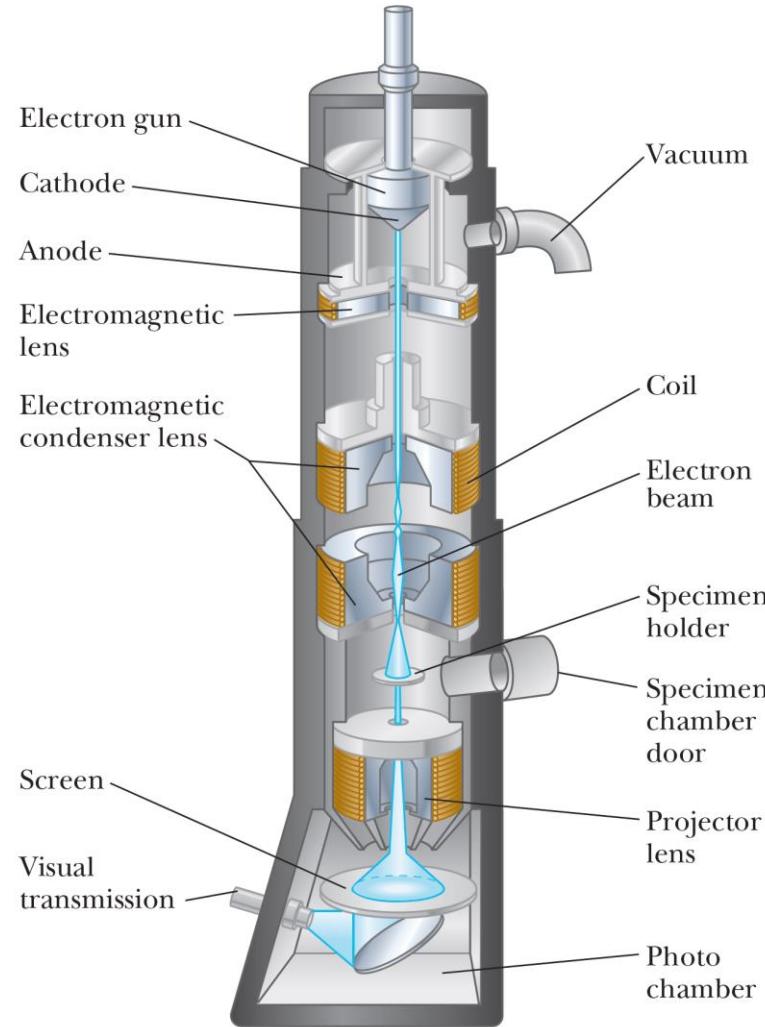
Application: le microscope électronique

La microscopie électronique utilise le comportement ondulatoire des électrons.

Puisque dans la microscopie, la résolution est limitée par la longueur d'onde (limite de diffraction), la courte longueur d'onde de de Broglie des électrons permet d'atteindre des résolutions très élevées.

En particulier, le microscope électronique à transmission, utilisant des électrons avec énergies de 40 à 400 keV, atteint une résolution de 0.5 Angstrom, et peut résoudre les atomes.

Exercice: calculer la longueur d'onde pour une énergie de 400 keV (à cette énergie, on peut encore utiliser les lois de la mécanique non relativiste)

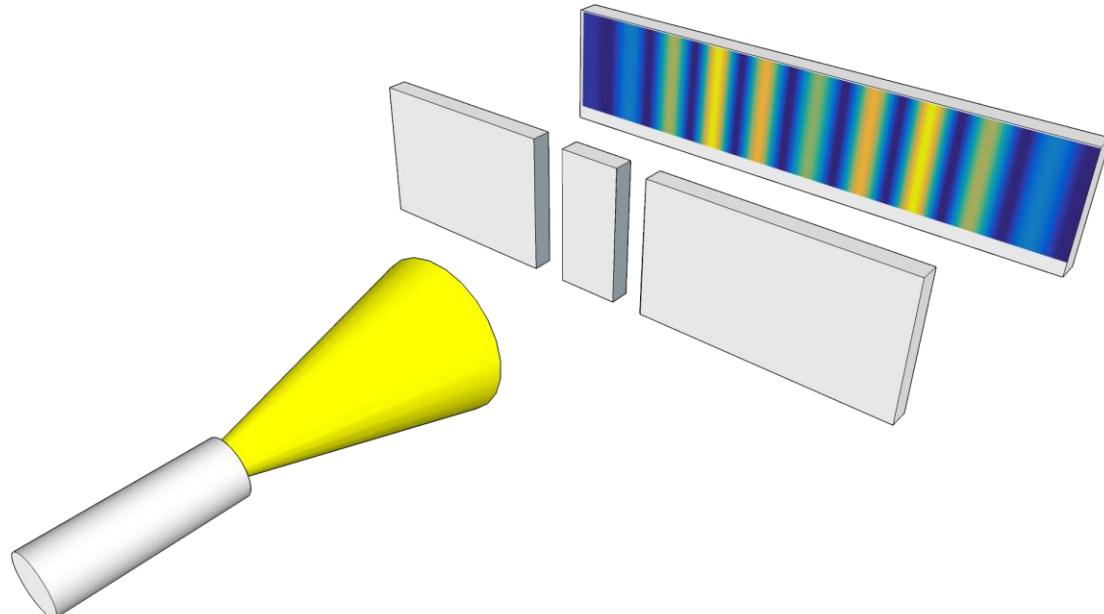


L'expérience à deux fentes de Young

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

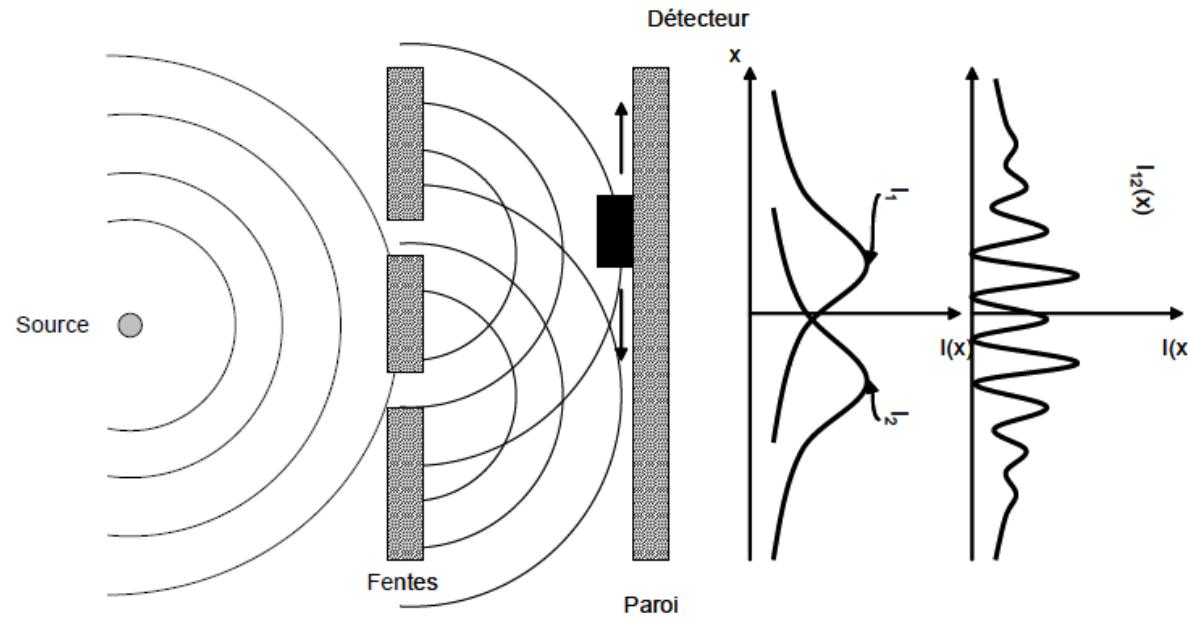
Une onde est un phénomène continu. Imaginez les ondes à la surface de l'eau. Le détecteur à une position donnée mesure une variation continue dans le temps de la hauteur de l'eau.

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.

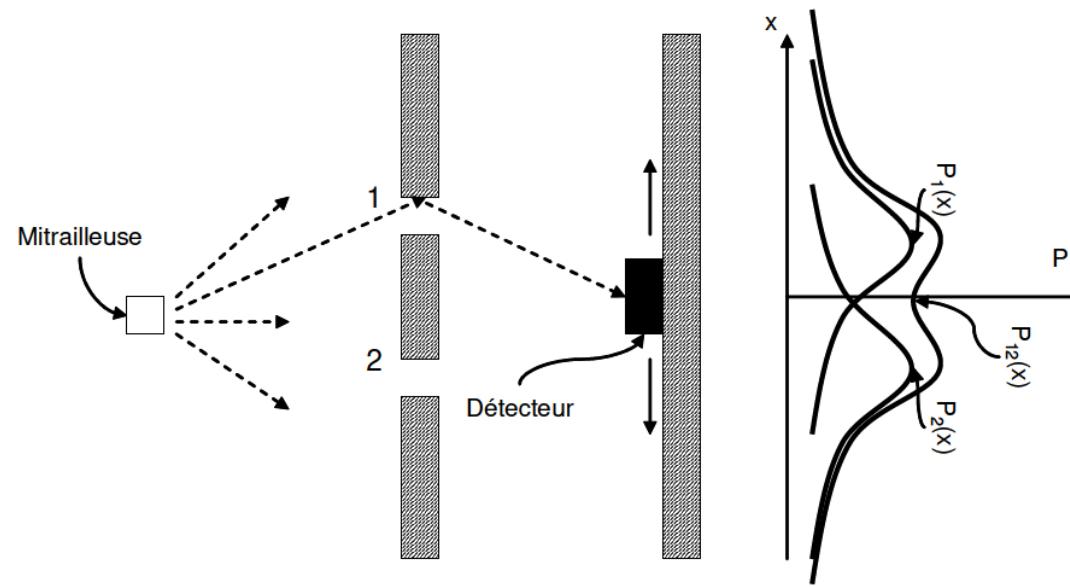
Si on bloque la première fente on observe un certain profil de densité dans l'arrivée des balles. Si on bloque la deuxième, on observe un autre profil.

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.

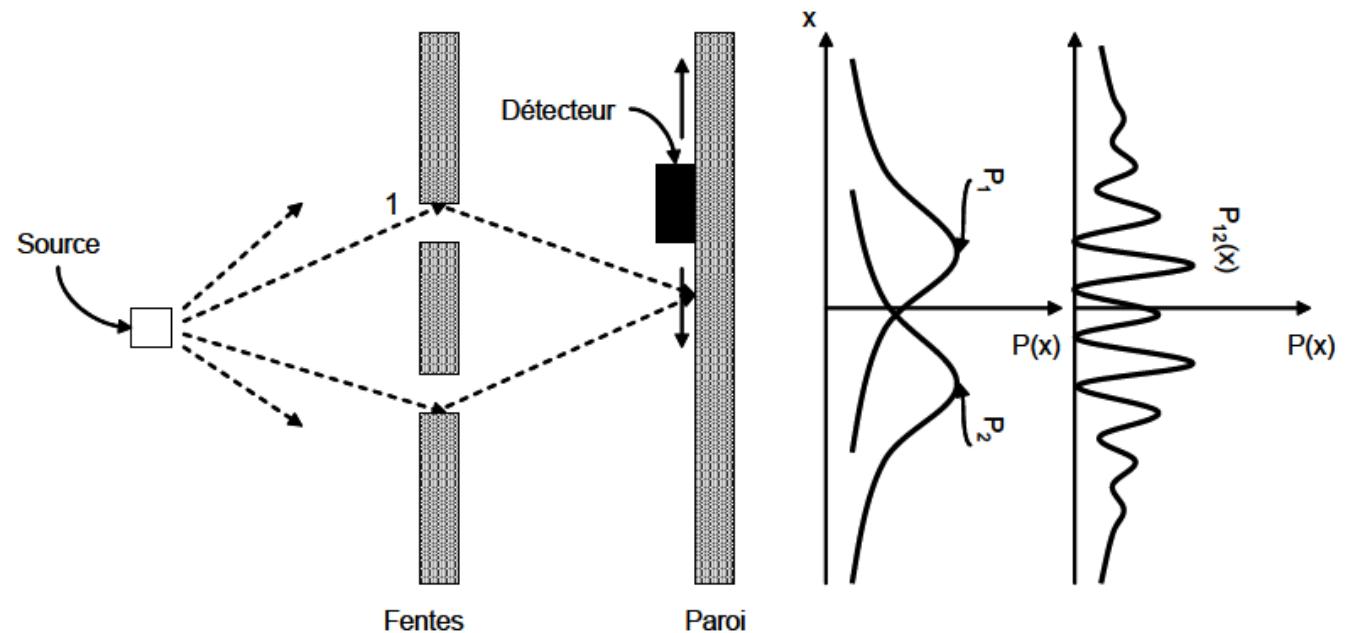
Si on bloque une fente, les profils de densité des électrons détectés ne montre pas de franges.

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

Comportement des électrons:

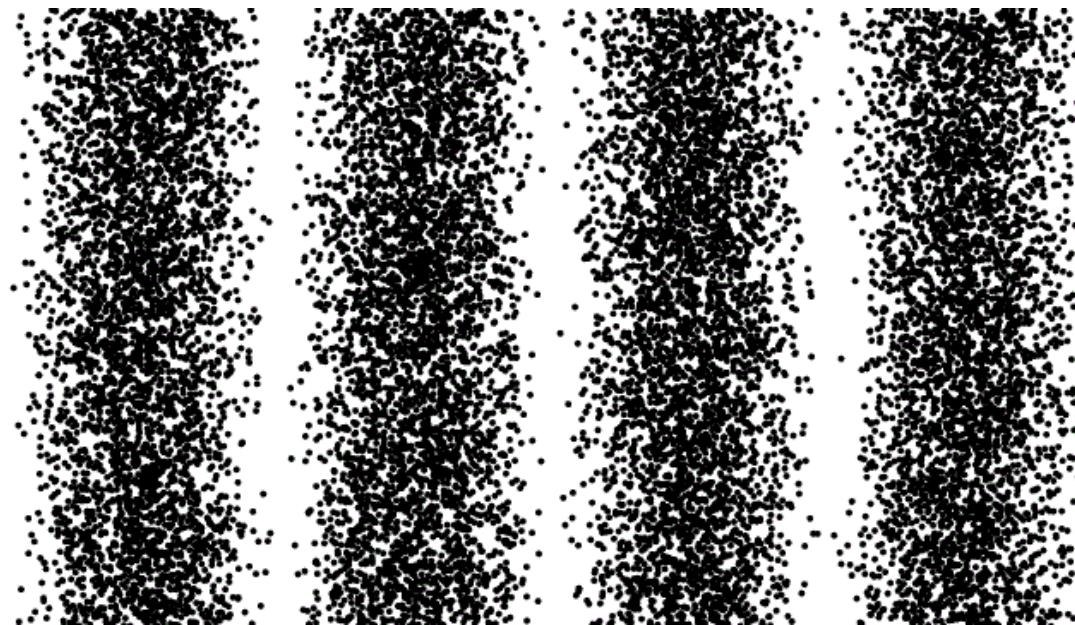
1. Phénomène discret
2. Interférence!

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).

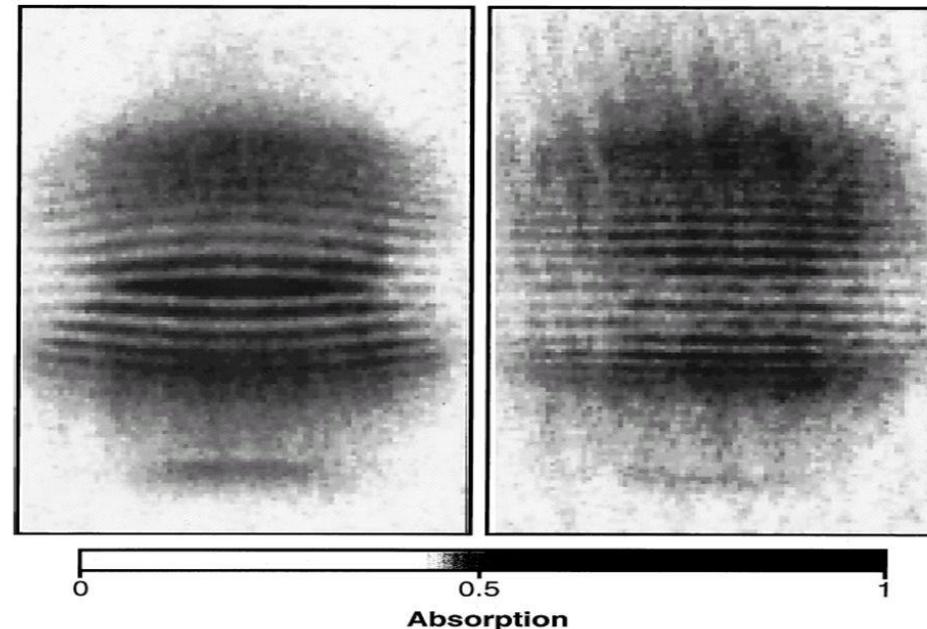
Interférence de deux condensats de Bose-Einstein

Un condensat de Bose-Einstein est un gaz d'atomes où tous les atomes se comportent collectivement comme une seule onde quantique.

Si on envoie deux condensats l'un contre l'autre, le nuage résultant ne sera pas la somme des deux nuages, mais il montre des franges d'interférences. L'expérience a été menée en 1997.

Aux endroits clairs dans la figure, **un atome plus un atome ne fait pas deux atomes mais plutôt zéro atomes!**

Interference fringes



M. R. Andrews et al., Science **275**, 637 (1997)

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.

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).

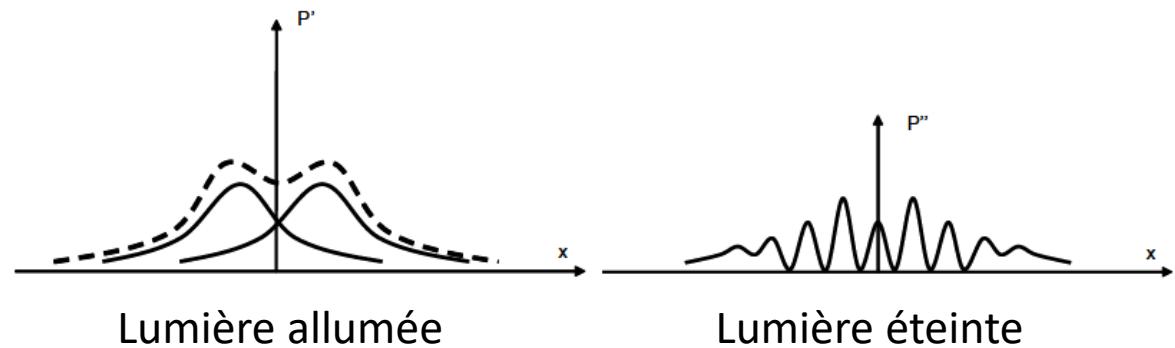
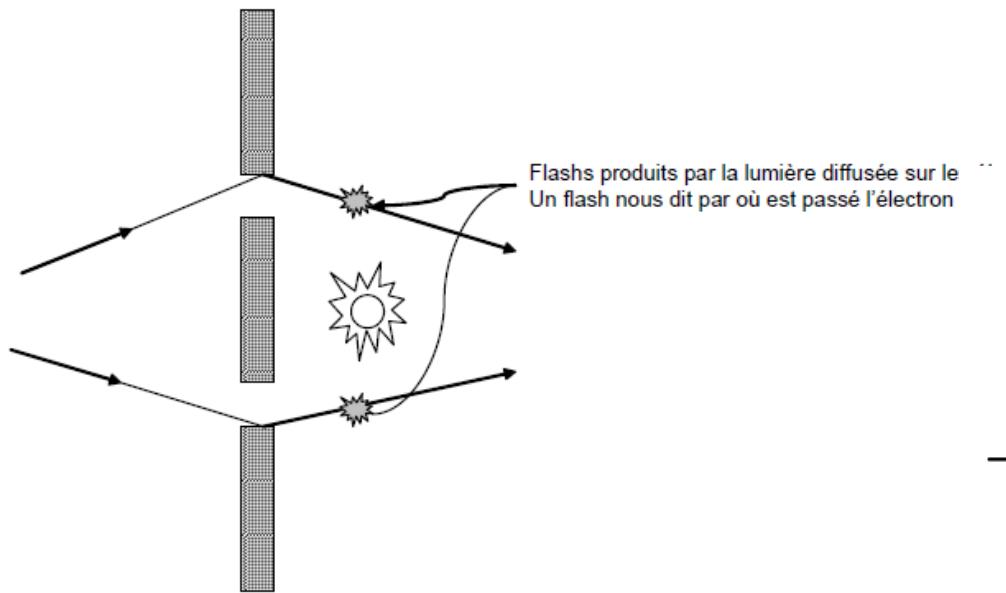
La seule explication possible est que les concepts classiques d'onde et de particule ne sont pas suffisants pour décrire l'objet quantique utilisé dans l'expérience. Ils ne sont que des descriptions partielles de la vraie nature des objets quantiques.

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.

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



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.

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.**