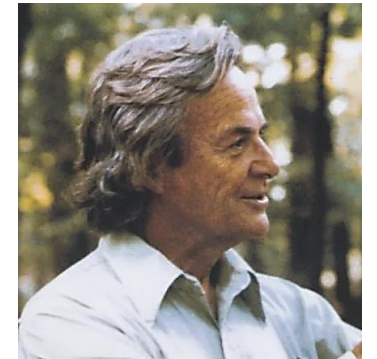
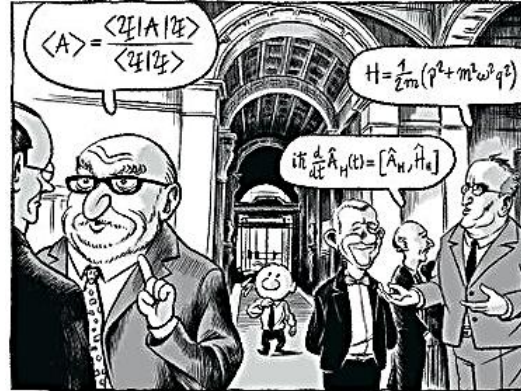


# Physique quantique



*Je pense pouvoir dire sans trop me tromper que personne ne comprend la physique quantique.*

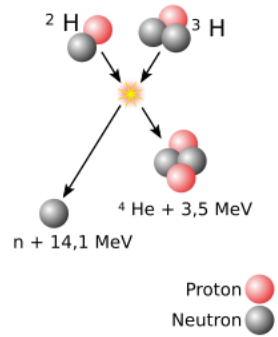
Richard Feynman 1918-1988 Prix Nobel 1965 (électrodynamique quantique)



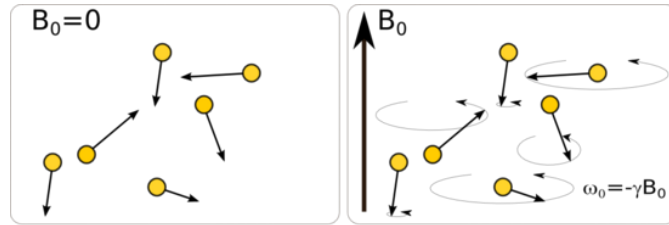
*Quiconque n'est pas choqué par la théorie quantique ne la comprend pas.*

Niels Bohr 1885-1962 Prix Nobel 1922 (mécanique quantique)

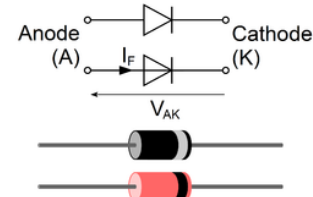
# Les révolutions quantiques



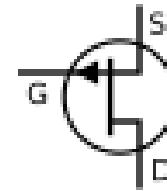
Energie nucléaire



Imagerie médicale (RMN)



Diode



Transistor



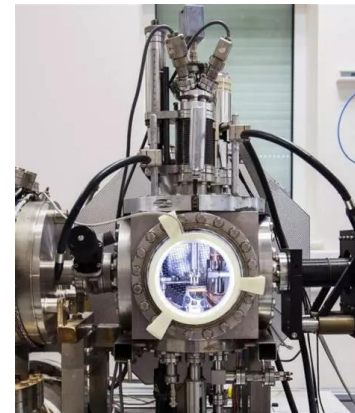
Circuits intégrés



Microscope électronique



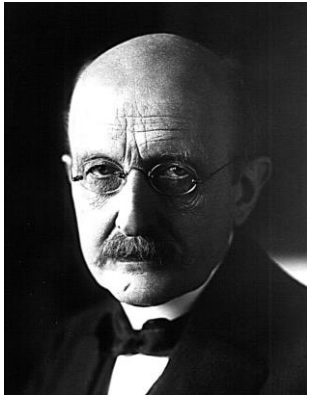
Laser



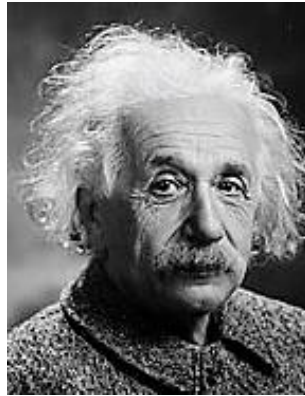
Microscope à effet tunnel



# 27 premières années de la physique quantique



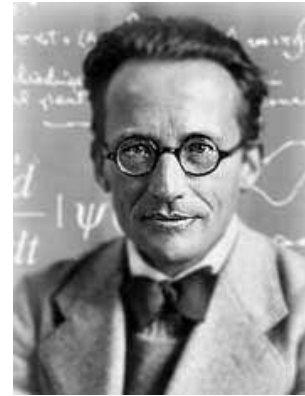
Max Planck



Albert Einstein



Louis de Broglie



Erwin Schrödinger



Max Born

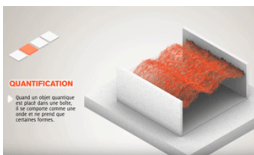


Werner Heisenberg

1900

Hypothèse des quantas  
(corps noir)  
 $E = h \nu$

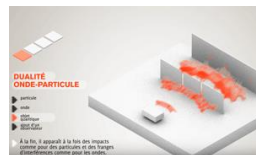
Quantification



1905

Hypothèse des photons  
(effet photoélectrique)  
Dualité pour la lumière

Dualité onde corpuscule



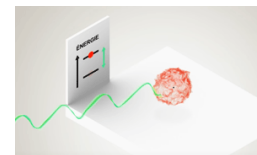
1923

Dualité pour la matière  
 $\lambda = \frac{h}{p}$

1925

Équation de ...  
 $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \psi + V \psi$

Superposition quantique



1926

Interprétation de  $\psi$   
 $\frac{dP}{d\tau} = |\psi(M, t)|^2$

Probabilités

1927

Principe d'incertitude  
 $\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$   
 $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

Principe d'indétermination



# Que représente $\psi$ ?



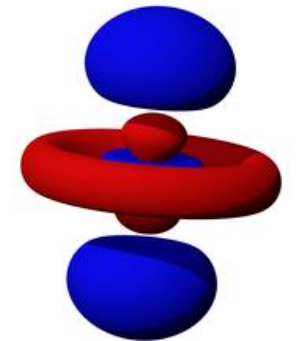
Max Born

« La prouesse de Schrödinger se réduit à quelque chose de purement mathématique, sa physique est lamentable. »

1926

Max Born comprend que  $\psi$  est liée à la **probabilité de présence** d'une particule.

La densité de probabilité volumique est : 
$$\frac{dP}{d\tau} = |\psi(M, t)|^2$$



Interprétation acceptée par tous les physiciens ou presque... Einstein refusait ce point de vue.

« De toute façon, je suis convaincu que Dieu ne joue pas aux dés » (lettre de Einstein à Born)

Après 100 ans de tests, la fonction d'onde se comporte bien comme Born l'a interprétée.

# Incertitude ou indétermination ?



Werner Heisenberg

1927 Principe d'incertitude ou plutôt **Principe d'indétermination**

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

Cette relation exprime *l'impossibilité* de mesurer *simultanément* ces deux grandeurs avec une *précision arbitraire*.

L'interprétation de cette limitation réside dans le fait qu'une particule quantique n'est pas un corpuscule matériel et donc que les concepts attachés aux corpuscules matériels (position et vitesse) sont inopérants car inadaptés.

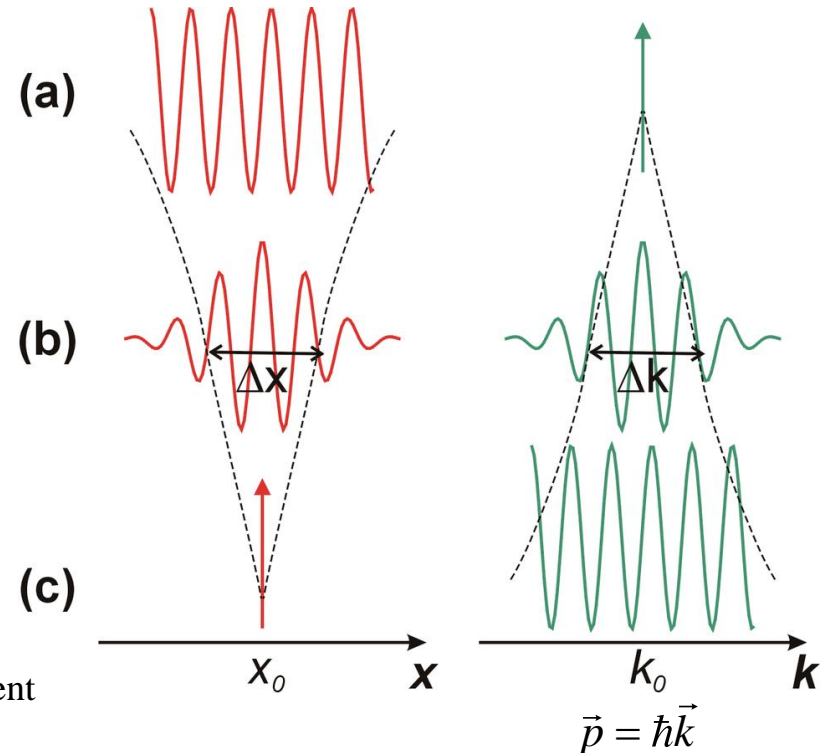
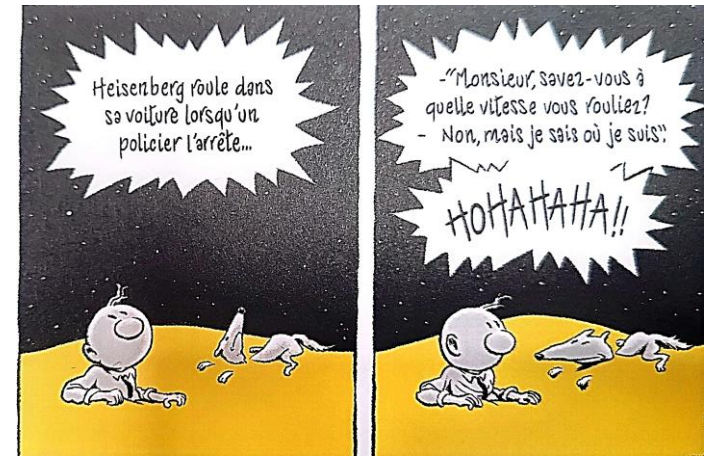
Ce principe oblige à une forme de compromis et impose une limite intrinsèque qui n'est liée ni à la précision des mesures ni à un manque d'information sur le système.

***L'ordre dans lequel on effectue la mesure importe !***

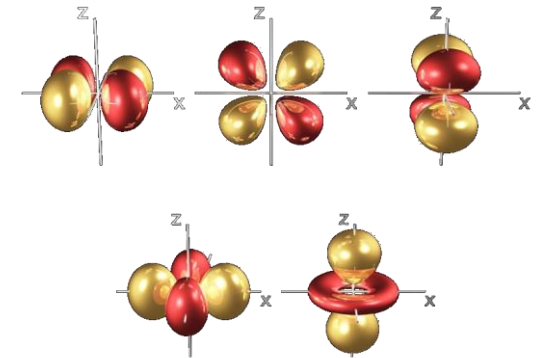
***La notion de trajectoire disparaît.***

Fonctions d'onde décrivant la position  $x_0$  ou la quantité de mouvement  $k_0$  :

- (a) une onde pure (fréquence unique donc ~~particule~~ non localisée dans l'espace)
- (b) un paquet d'onde
- (c) un corpuscule parfaitement localisé dans l'espace mais pas de quantité de mouvement déterminée.



# Une physique incertaine ?



La physique quantique n'offre-t-elle qu'une vision imprécise et floue ?

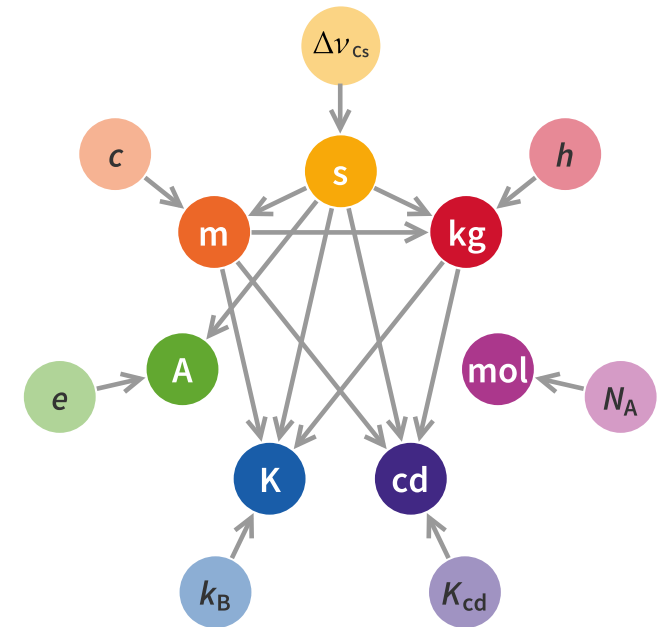
L'équation de Schrödinger est déterministe, elle permet de prédire avec une précision remarquable la forme de la fonction d'onde et son évolution au cours du temps.

C'est seulement l'étape finale, la mesure, qui fait intervenir le hasard.

La physique quantique n'est pas le règne du flou, elle est plus précise que la mécanique ou l'optique. Il faut seulement bien choisir ce qu'on veut déterminer.

**2018** La conférence générale des poids et mesures (CGPM) fixe 7 constantes fondamentales et définit un nouveau système d'unités, en particulier le kilogramme qui est défini via la mesure d'une force qui est déterminée par deux phénomènes purement quantiques.

Bureau  
International des  
Poids et  
Mesures



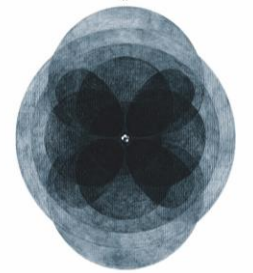
# Conséquences du principe d'indétermination

## 1 – Rien n'est immobile, le repos est impossible

Si une particule était fixe, sa position et sa vitesse serait parfaitement connues ce qui viole le principe.

## 2 – Taille des atomes

Electron très près du noyau  $\Rightarrow$  position précise  $\Rightarrow$  vitesse très incertaine  $\Rightarrow$  assez rapide pour échapper au noyau  
Electron très délocalisé  $\Rightarrow$  force électrique trop faible  $\Rightarrow$  pas retenu par le noyau  
 $\Rightarrow$  il existe une taille optimale pour l'atome déterminée par la physique quantique



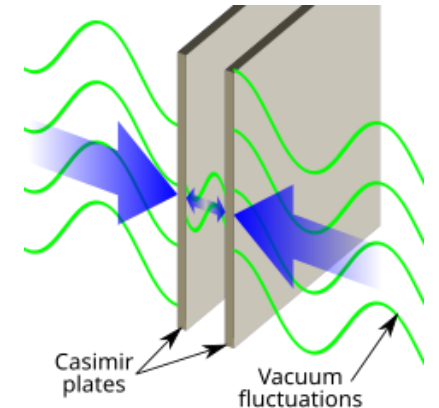
## 3 – Mort du Soleil

En fin de vie, l'agitation thermique au sein d'un astre ne compense plus la gravité : l'astre s'effondre sur lui-même et peut finir en trou noir ou en étoile à neutron. Mais les électrons détachés des atomes sont de plus en plus compressés... or ils ne peuvent coexister au même endroit car ce sont fermions qui obéissent au principe d'exclusion de Pauli (conséquence de l'indiscernabilité, elle-même conséquence du principe d'indétermination : la notion de trajectoire n'ayant pas de sens, il est impossible de distinguer les électrons). L'agitation thermique des électrons doit donc augmenter. Dans le cas du Soleil, sa taille va se stabiliser en une boule chaude très dense de la taille de la Terre, une naine blanche... dans 5 milliards d'années.

## 4 – Le vide n'est pas vide

$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2 \Rightarrow$  pendant des intervalles de temps très courts, l'énergie devient indéterminée, elle fluctue énormément : c'est la fluctuation quantique du vide.

Cette énergie se manifeste dans l'effet Casimir (force attractive entre deux plaques métalliques dans le vide).



# Probabilités et effet tunnel

Une particule est envoyée sur un « mur », i.e. une barrière d'énergie potentielle.

La « particule » (une balle de tennis et une fonction d'onde sur l'illustration ci-contre) arrivent vers le mur avec une certaine énergie (cinétique).

Dans le domaine de la physique classique, la balle de tennis repart en arrière.

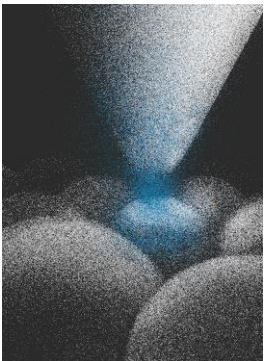
En physique quantique, une « petite partie » de la fonction d'onde parvient à traverser la barrière.

## Interprétation

La particule quantique ne se sépare pas en deux. Si la particule est mesurée, elle se manifeste soit à gauche soit à droite et les probabilités associées sont fournies par l'équation de Schrödinger.

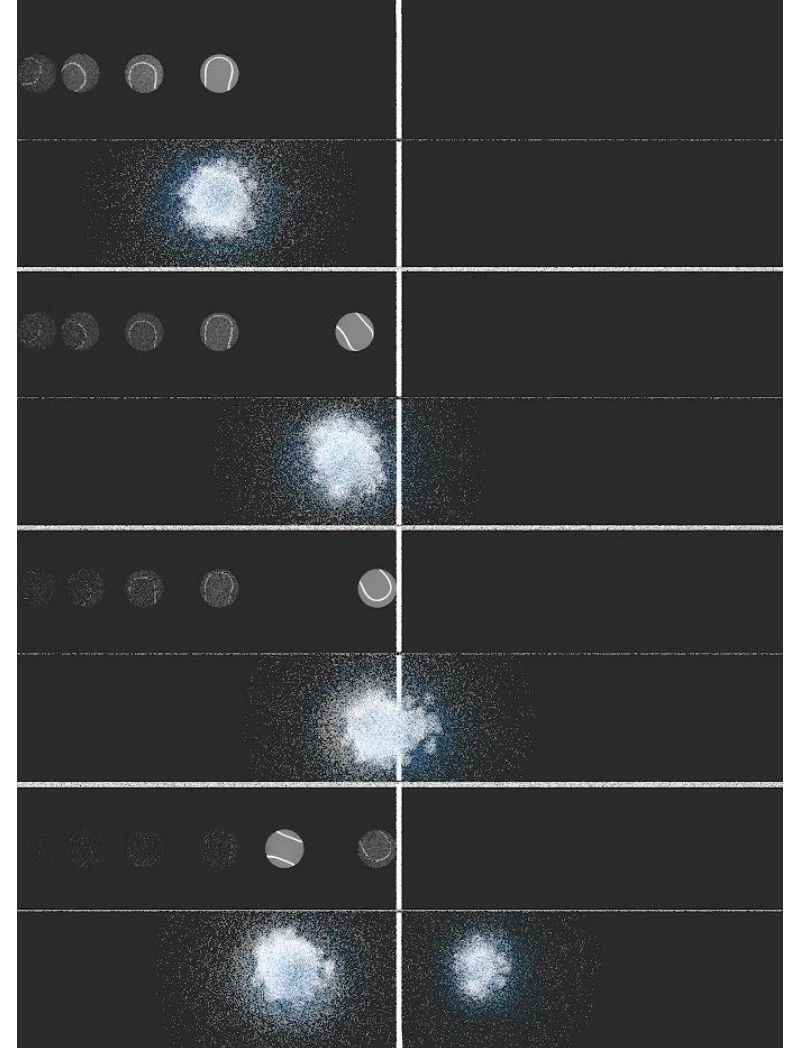
L'obstacle est d'autant plus difficile à franchir que la barrière est élevée et épaisse, que la particule est lourde ou qu'elle a peu d'énergie.

Mais une particule légère et rapide a une probabilité non nulle de traverser un obstacle infranchissable au sens de la mécanique classique : c'est l'*effet tunnel*.



L'effet tunnel est responsable de la *radioactivité alpha*, de la fusion des protons en noyau d'Hélium dans le Soleil.

Les physiciens ont mis à profit l'effet tunnel dans le *microscope à effet tunnel* qui permet de repérer la position des atomes à la surface de la matière et de les déplacer pour les déposer ailleurs et réaliser des structures à l'échelle atomique.





# Particules, interférences et superposition

Controlled double-slit electron diffraction Herman Batelaan & All. 2013 <https://arxiv.org/abs/1210.6243>

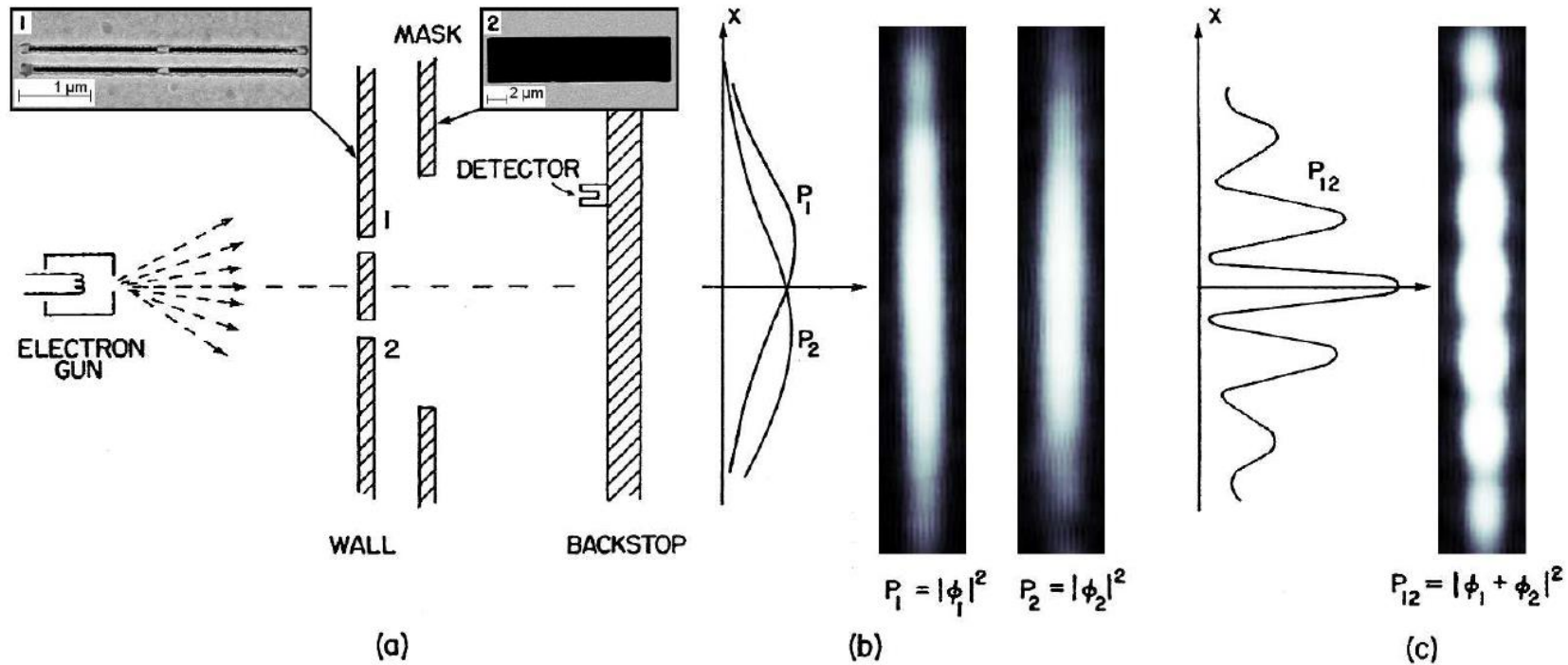


Figure 1. Simplified setup. a, An electron beam passes through a wall with two slits in it. A movable mask is positioned to block the electrons, only allowing the ones traversing through slit 1 ( $P_1$ ), slit 2 ( $P_2$ ), or both ( $P_{12}$ ) to reach the backstop and detector.

b,c, Probability distributions are shown, (Experimental in false-colour intensity) for electrons that pass through a single slit (b), or the double-slit (c). Inset 1,2, Electron micrographs of the double-slit and mask are shown. The individual slits are  $50 \text{ nm}$  wide  $\times$   $4 \text{ }\mu\text{m}$  tall with a  $150 \text{ nm}$  support structure midway along it's height, and separated by  $280 \text{ nm}$ . The mask is  $5 \text{ }\mu\text{m}$  wide  $\times$   $20 \text{ }\mu\text{m}$  tall.

Figure 2. Mask movement.

A mask is moved over a double-slit (inset) and the resulting probability distributions are shown.

The mask allows the blocking of one slit, both slits, or neither slit in a non destructive way.

The individual slits are 50 nm wide and separated by 280 nm.

The mask has a 5  $\mu\text{m}$  wide opening.

The labeled dimensions are the positions of the center of the mask.  $P_1$ ,  $P_2$ , and  $P_{12}$  are the probability distributions shown in figure 1.

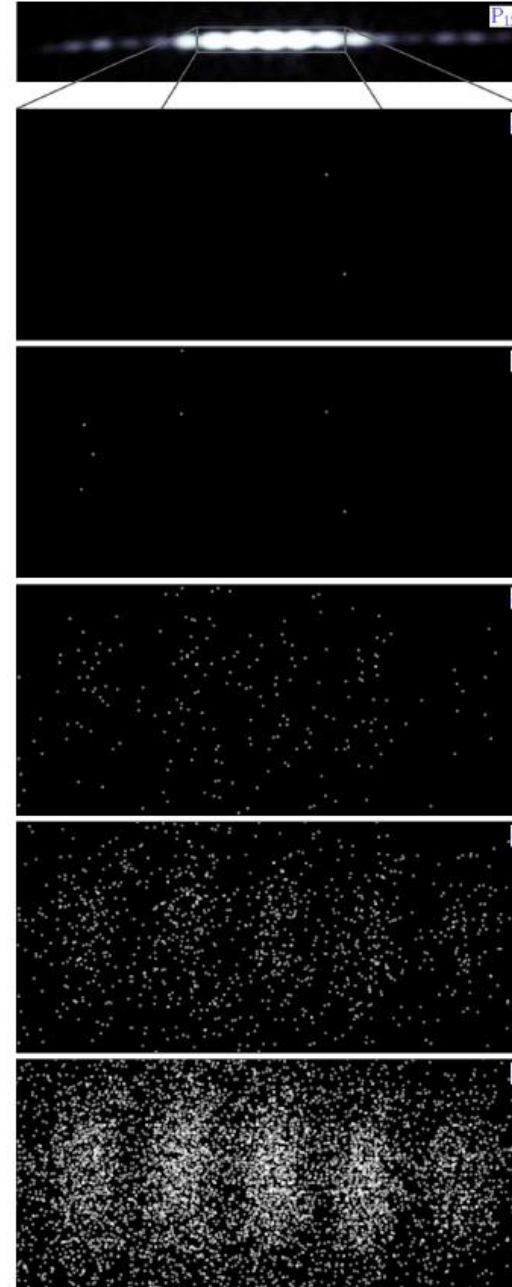
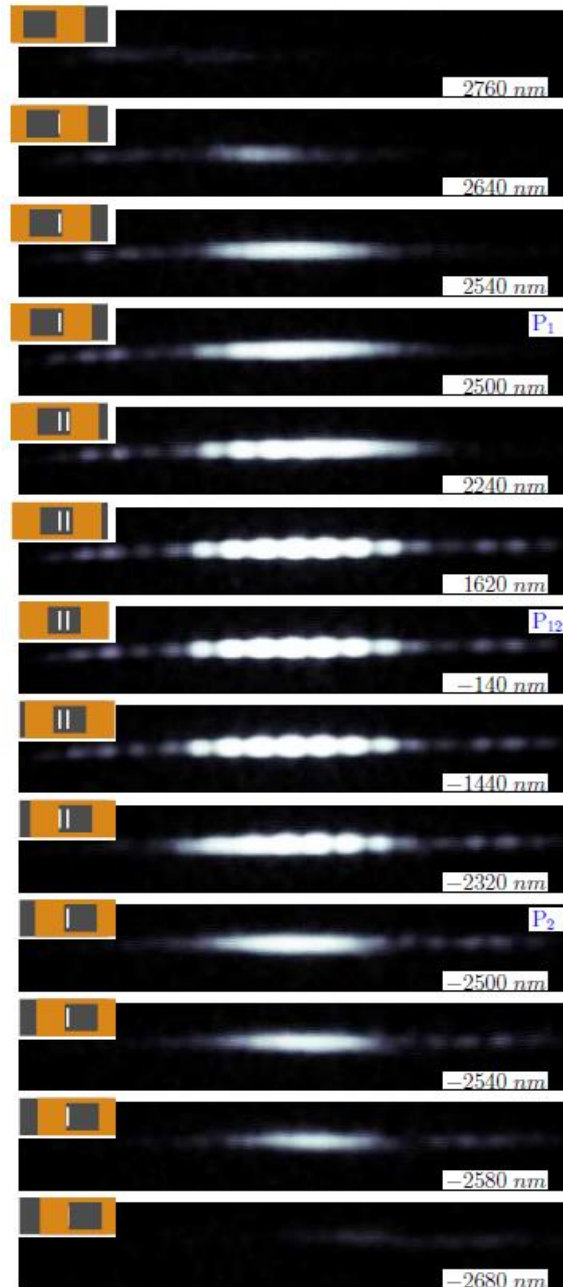


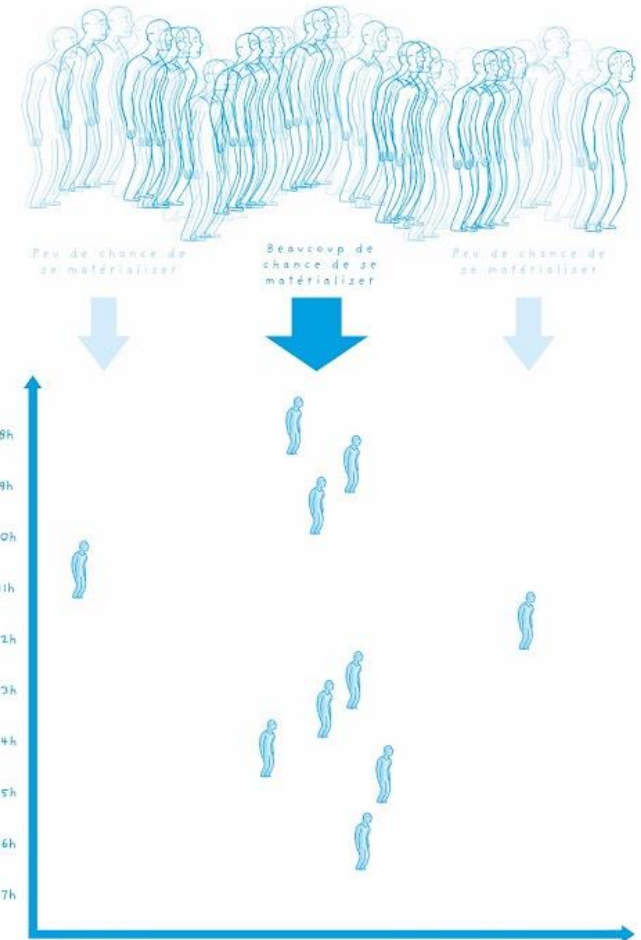
Figure 3. Buildup of electron diffraction.

“Blobs” indicate the locations of detected electrons. Shown are intermediate build-up patterns from the central five orders of the diffraction pattern ( $P_{12}$ ) magnified from figure 2, with 2, 7, 209, 1004, and 6235 electrons (a-e).



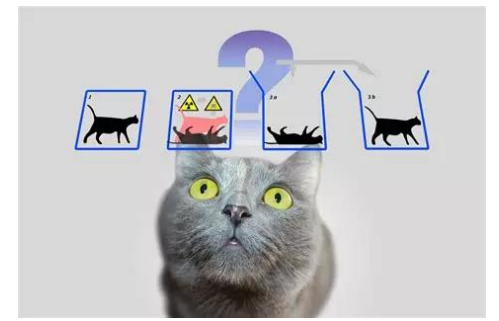
# Double fente - Conséquences

- L'électron semble se comporter comme une *onde* tout au long de son parcours jusqu'à sa mesure au cours de laquelle il s'est alors, et alors seulement, réduit en une *particule*.
- Les électrons sont envoyés *un par un* (le suivant est envoyé quand le précédent a atteint l'écran) : ce n'est pas tous ensemble que les électrons forment une onde mais bien chacun *individuellement*.
- Comme la fonction d'onde n'est pas une onde réelle (c'est une amplitude de probabilité), cette expérience peut également s'interpréter en termes de *superposition de chemins suivis par la particule*.



La fonction d'onde s'étale et se matérialise en un endroit, différent à chaque mesure,

# Superposition



➤ Peut-on considérer que la particule elle-même est passée physiquement par les deux fentes à la fois ? Les physiciens ne sont pas tous d'accord (cf. plus loin, interprétations de la physique quantique).

➤ Le chat de Schrödinger : jusqu'à quelle échelle la superposition se produit-elle ?

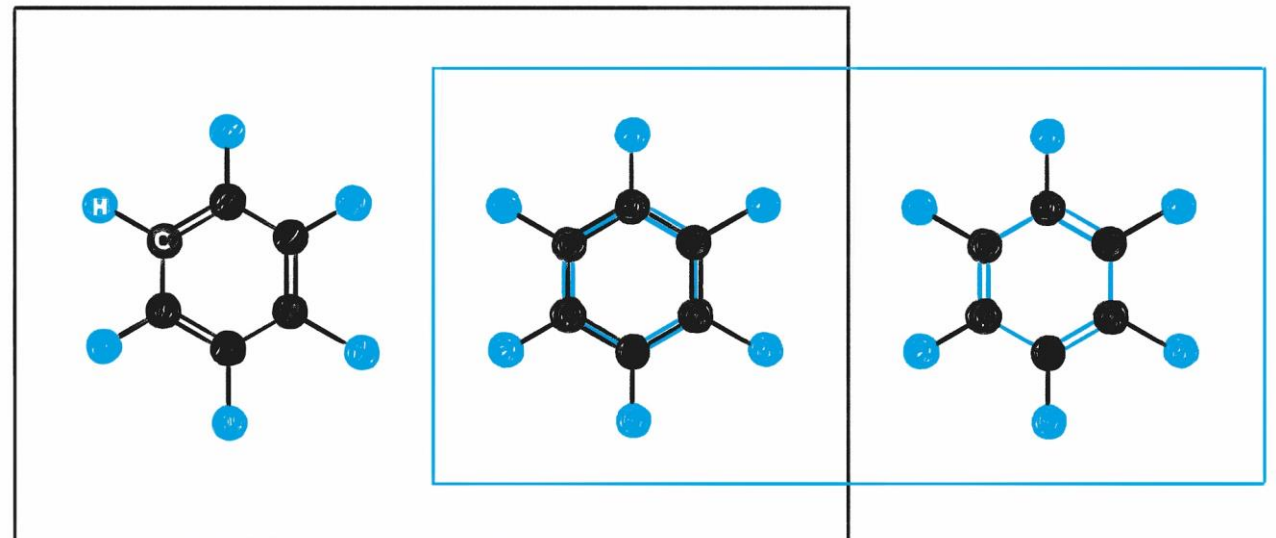
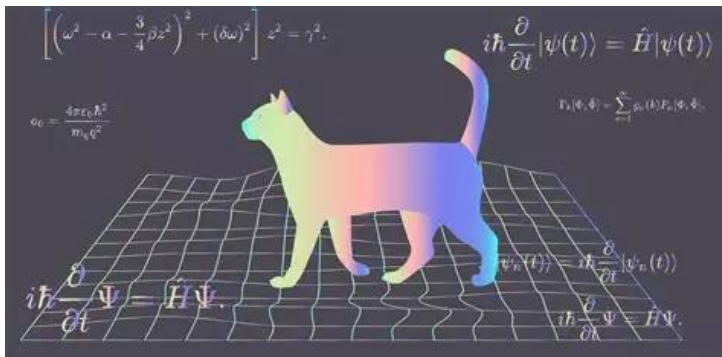
Double fente : 1980 neutron puis atome, 1999 C<sub>60</sub>, 2019 molécule

2000 : boucle conductrice micrométrique parcourue par des électrons superposés parcourant la boucle en sens inverses.

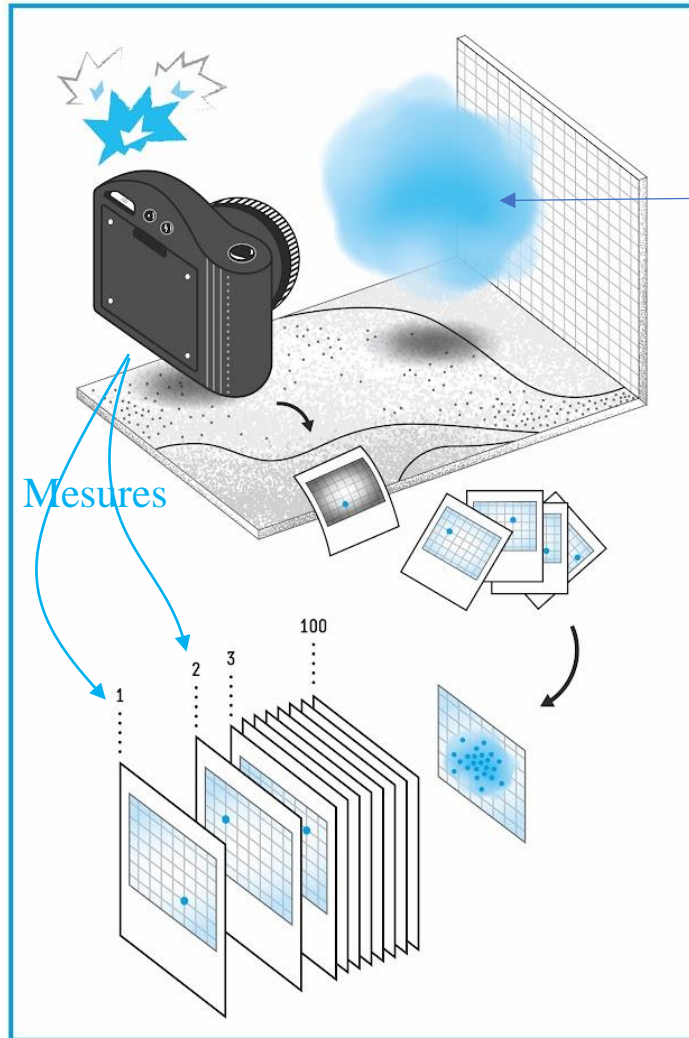
2010 : plaque métallique de 60 μm de longueur (épaisseur cheveu) dans un état superposé vibration/non vibration.

Le chat de Schrödinger est une image, *un objet macroscopique à température ambiante ne peut pas être dans un état superposé.*

➤ La superposition en chimie : benzène, H<sub>2</sub>O...



# Mesure



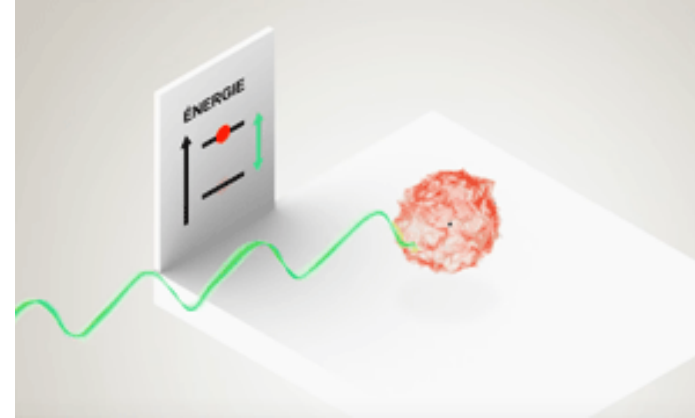
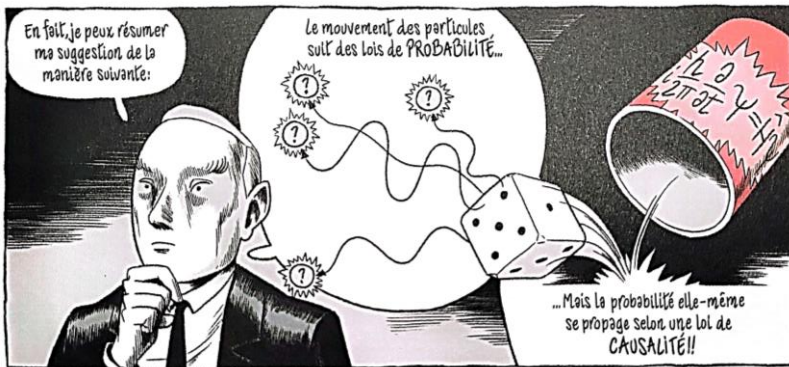
Mesure  $\Rightarrow$  *réduction instantanée* de la fonction d'onde en un *point*

$N$  mesures  $\Rightarrow N$  points *différents* qui « reconstituent la fonction d'onde »

Fonction d'onde

*En physique quantique, la mesure agit sur l'objet mesuré !*

# Superposition – Décohérence - Mesure



<https://toutestquantique.fr/superposition/>

## *Mesure*

- 1/Avant la mesure la fonction d'onde se comporte comme une onde régie par l'équation de Schrödinger. Il n'y a aucun aléa, l'évolution est déterministe et donc prévisible.
- 2/Lors de la détection, l'onde interagit avec un dispositif macroscopique. Cette interaction force l'onde à se réduire.
- 3/L'onde quantique « choisit » aléatoirement un état parmi tous les états possibles. Ce tirage au sort ne dépend que de la forme de l'onde à l'instant de la mesure et non de l'environnement extérieur mais ce choix n'est pas prédit par l'équation de Schrödinger, le hasard pur semble à l'œuvre.

Serge Haroche (prix Nobel 2012) a montré que la décohérence est d'autant plus rapide que le nombre de particules interagissant avec la particule quantique est grand.

David Wineland (prix Nobel 2012) parvient en 2000 à contrôler la décohérence de 3 façons différentes.



Serge Haroche

# Choix aléatoire d'un état et causalité



En *physique classique*, tout effet possède une cause, le hasard apparent (jet d'un dé) est dû au fait que certains problèmes possèdent une sensibilité aux conditions initiales : un changement infime dans les conditions initiales modifie beaucoup la trajectoire.

En *physique quantique*, le hasard paraît intrinsèque : il n'est plus possible d'identifier quelle cause a provoqué le choix effectué, ce qui remet en cause le **principe de causalité**.

Comment est-ce possible ? La question fait toujours débat et plusieurs théories sont en concurrence.

Cependant, le plus souvent les physiciens n'ont pas besoin de choisir une interprétation : accepter l'idée de probabilité et de non déterminisme est suffisant pour utiliser la théorie. Doctrine qu'on peut résumer par « Shut up and calculate ! »...

Ce problème amène à se poser la question : la physique quantique décrit-elle la réalité ?

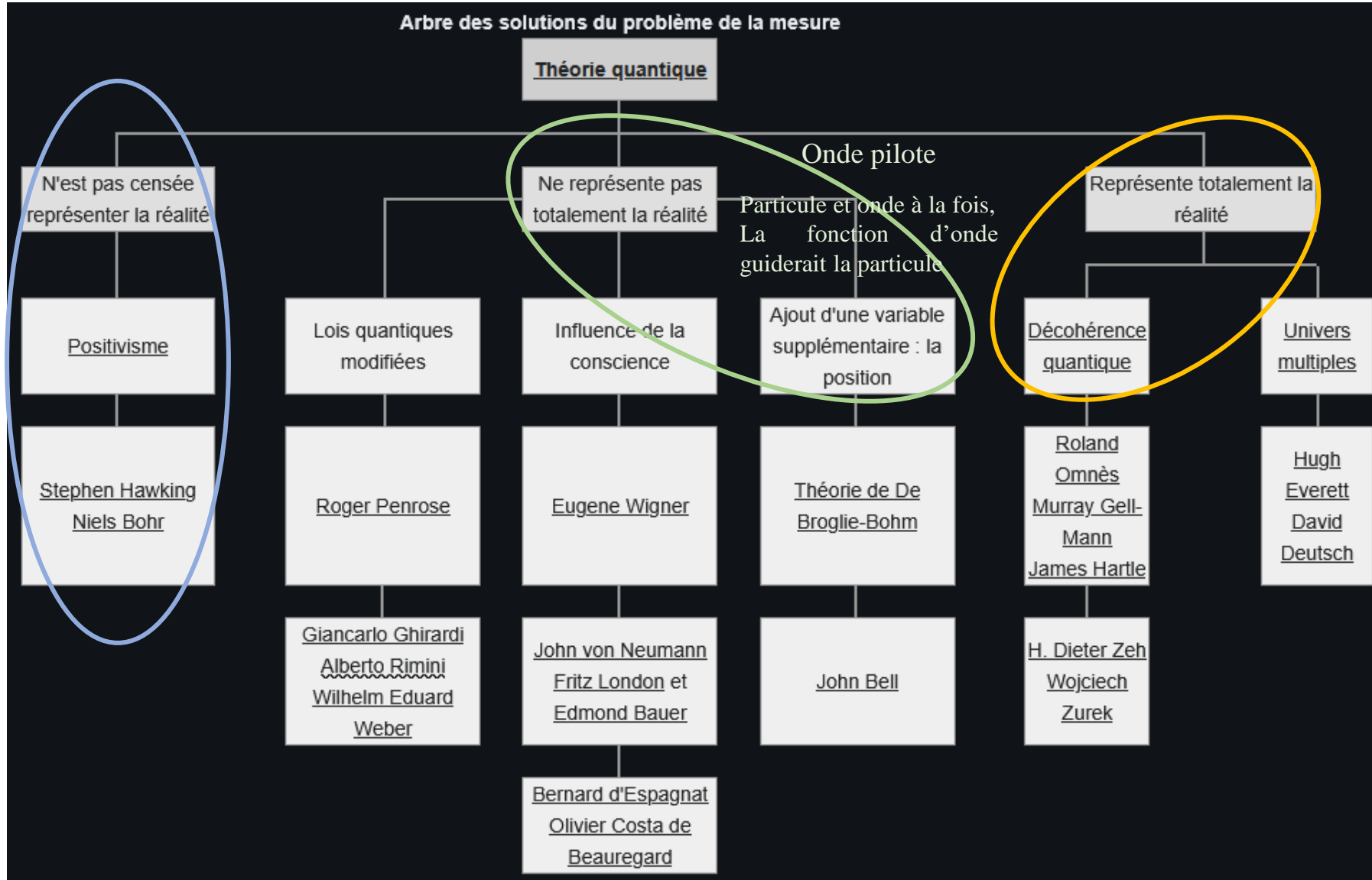


# Interprétations de la physique quantique

## Interprétation de Copenhague

Tant que la particule n'est pas mesurée, elle est représentée par la fonction d'onde sans « réalité ».

Suite à la mesure, la particule devient réelle : elle n'existe que dans le cadre d'une expérience qui la définit.

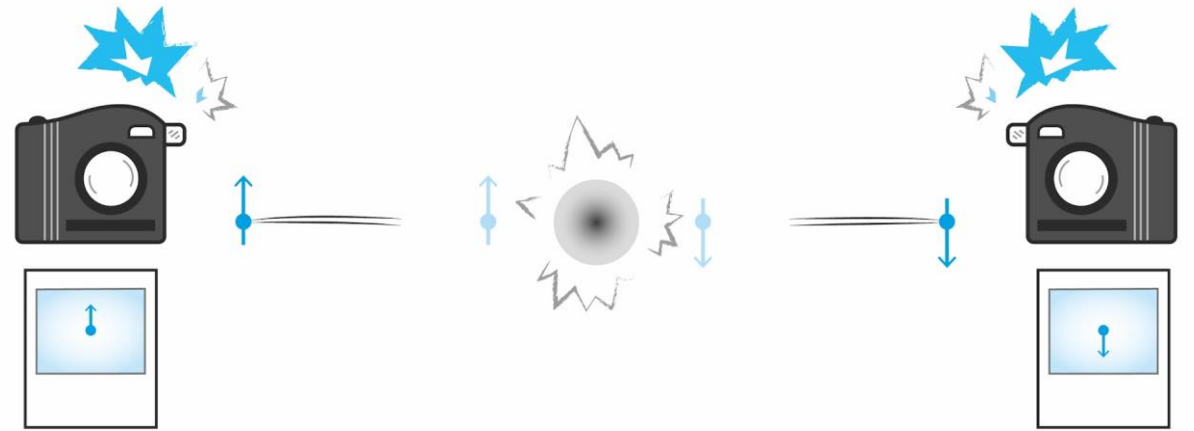




# L'intrication

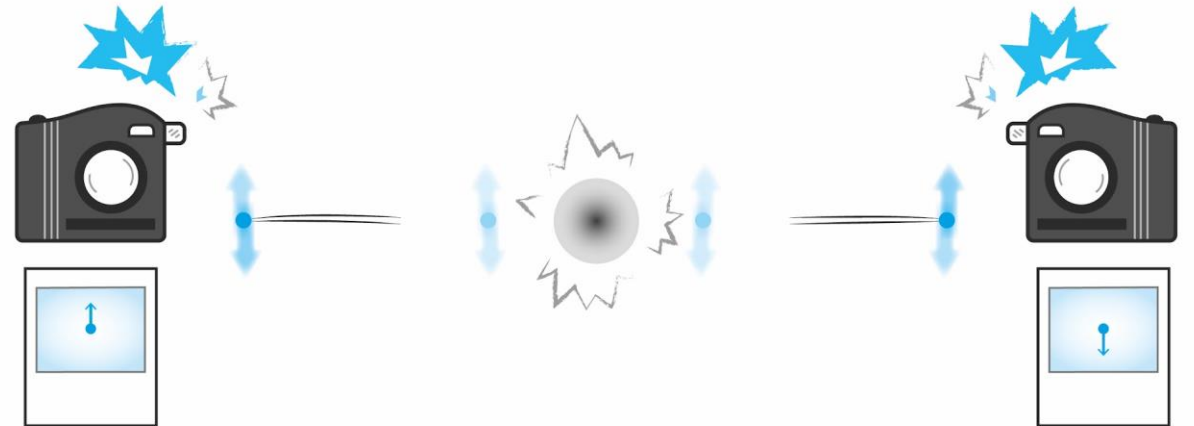
## Principe

Préparation de 2 électrons de spin opposés (+1/2 et -1/2).  
Le spin total est nul et le reste même si les électrons sont séparés.



## L'électron est quantique !

Chaque électron est dans un état superposé a un spin à la fois vers le haut et vers le bas. C'est au moment de la mesure que l'orientation du spin est choisie aléatoirement.  
Si l'un des électrons est détecté avec un spin haut, le spin de l'autre sera automatiquement fixé vers le bas.



*Si cet effet est instantané, ne viole-t-il pas la théorie de la relativité qui considère qu'une information ne peut pas se propager plus vite que la lumière ?*

# Intrication - Paradoxe EPR - Inégalités de Bell

**Principe de localité** : des objets distants ne peuvent avoir une influence directe l'un sur l'autre ; un objet ne peut être influencé que par son environnement immédiat (imposé par la relativité).

**Le paradoxe EPR** (1935), est une expérience de pensée, élaborée par Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen, dont le but premier était de réfuter l'interprétation de l'école de Copenhague de la physique quantique.

Ce paradoxe met en évidence des corrélations de mesures d'objets quantiques intriqués à une distance arbitrairement grande. Soit cela semble incompatible avec le principe de localité, soit cela indique que le formalisme de la mécanique quantique est incomplet (existence de « variables cachées », cette hypothèse est appelée *réalisme local*).

Les *inégalités de John Stewart Bell* (1964) sont des relations qui tranchent certaines questions liées à la nature de la mécanique quantique. Le théorème indique qu'une certaine quantité possède une valeur limite s'il existe des variables cachées.

**Alain Aspect, Philippe Grangier et Gérard Roger** (Institut d'optique Orsay, 1981) : les inégalités de Bell sont violées, Einstein avait tort, l'intrication existe et impose de renoncer à une ou plusieurs hypothèses (dont le principe de localité).

Ces expériences indiquent que la physique quantique peut être une théorie non locale.

2007 **Anton Zeilinger** et son équipe intriquent des photons à 144 km de distance.

2017 une équipe Chinoise annonce une intrication sur 1200 km, par satellite

L'intrication ne permet pas de communiquer plus vite que la vitesse de la lumière car on ne peut pas choisir ce qu'on transmet mais joue un rôle dans la cryptographie quantique basée sur des particules intriquées (toute interaction avec les particules lors d'une intrusion malveillante détruit l'intrication et l'intrusion est alors détectée).

# Le vivant est-il quantique ?



De récents travaux sur la photosynthèse ont révélé que l'intrication quantique des photons joue un rôle essentiel dans cette opération fondamentale du règne végétal, phénomène que l'on tente actuellement d'imiter pour optimiser la production d'énergie solaire.

L'adhérence aux surfaces des setæ des geckos fonctionne grâce aux forces de van der Waals, des interactions de nature quantique qui font intervenir des particules virtuelles sans aucune interaction moléculaire classique,



# Et l'ordinateur quantique ?



## Ordinateur classique

Les informations sont codées sous forme de 0 et de 1, les bits, et sont traitées par des portes logiques NOT et NAND.

Les ordinateurs classiques font une erreur par milliard de milliards d'opérations,



## Ordinateur quantique

Un bit quantique ou **qubit** est une superposition de 0 et de 1.

Les qubits ne sont pas indépendants les uns des autres, ils sont intriqués : agir sur l'un affecte tous les autres.

On décrit un qubit de la façon suivante :  $\alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$

Où  $\alpha$  et  $\beta$  sont des nombres complexes tels que  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ .

La probabilité de trouver l'état 0 lors de la mesure est  $|\alpha|^2$  et  $|\beta|^2$  de trouver l'état 1.

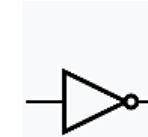
Avec 2 qubits, le nombre d'états est 4, avec 3 qubits, 8 états : 100 qubits peuvent décrire  $2^{100}$  états... Là réside la puissance potentielle de l'ordinateur quantique.

Mais il y a un prix à payer : le résultat du calcul est une probabilité.

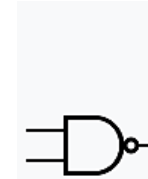
Les problèmes sont nombreux : décohérence, bruit, stabilité, précision.

A ce jour, les meilleures machines manipulent quelques dizaines de qubits pendant quelques dizaines de  $\mu$ s avec des taux d'erreurs très élevés (1 erreur toutes les 1000 étapes).

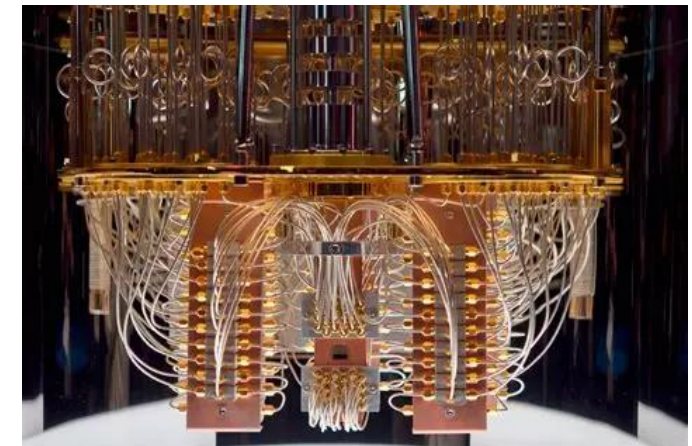
Une perspective enthousiasmante de l'ordinateur quantique : simuler la physique quantique !



bit d'entrée	bit de sortie
0	1
1	0



entrée A	entrée B	sortie
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0



# Références

Ce diaporama doit beaucoup au livre de **Julien Bobroff**, « *La quantique autrement* », au site « La physique autrement », au site « Tout est quantique » et à Wikipédia.

Mais également au « *Petit voyage dans le monde des Quanta* » d'Etienne Klein.

Pour ceux qui désirent davantage de précisions : « *Le monde quantique* » de Michel Le Bellac.

Une B.D. explique remarquablement tous ces concepts : « *Le mystère du monde quantique* » par **Thibault Damour** et **Mathieu Burniat**.

