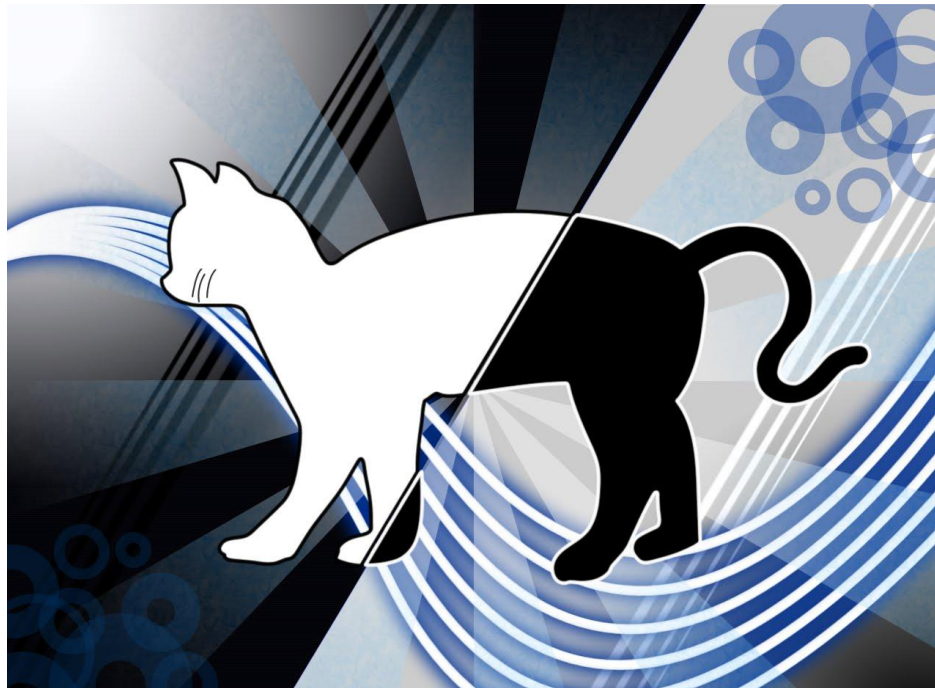


Les étranges concepts de la physique quantique

Bruno Lepetit
Chargé de recherches CNRS

Laboratoire Collisions-Agrégats-Réactivité
Institut de Recherches sur les Systèmes Atomiques et Moléculaires Complexes
Université Paul Sabatier & CNRS





Laboratoire Collisions Agrégats Réactivité

www.lcar.ups-tlse.fr

LCAR

ACTIVITÉS DU LABORATOIRE

Le LCAR est un laboratoire de recherche fondamentale visant à repousser les limites de la connaissance en physique et physico-chimie fondamentale. Il a des activités expérimentales et théoriques qui s'exercent dans les domaines de l'optique laser et de la physique atomique et moléculaire. Elles portent en particulier sur les processus dynamiques induits dans les atomes, les ions, les molécules et les agrégats par collisions ou par laser. Les sujets de recherche sont très divers dans leur finalité : ils vont de l'étude des effets de rayonnements ionisants de hautes énergies sur des molécules biologiques, aux propriétés de condensats de Bose-Einstein à des températures proches du zéro absolu.

« Uni dans la diversité », le laboratoire est soudé par des moyens d'investigation similaires (lasers, manipulation de particules chargées...) et par une culture commune.

Le LCAR est membre de l'Institut de Recherches sur les Systèmes Atomiques et Moléculaires Complexes (IRSAMC – FR 2568).

UMR 5589 (UPS / CNRS)

Directeur : Jean-Marc L'HERMITE

Université Toulouse III - Paul Sabatier
Bâtiment 3R1-B4
31062 Toulouse Cedex 4

05 61 55 60 23
lcar.dir@irsamc.ups-tlse.fr

LES LASERS

Le 16 mai 1960 naissait le laser dans les mains de Théodore Maiman. Abréviation de « Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation » (amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement), ce pur produit de laboratoire, qui ne semblait au départ n'intéresser que les chercheurs, allait se révéler révolutionnaire par la nature de la lumière émise : directive, d'une seule couleur, cohérente et parfois puissante. Le laboratoire utilise différents types de lasers adaptés à des applications particulières. Il peut s'agir par exemple de façonner une impulsion lumineuse très courte (mesurée en femtosecondes = 10^{-15} s) pour mettre une molécule dans un état particulier (contrôle cohérent). Il peut s'agir aussi de refroidir des atomes jusqu'à des températures extrêmement basses, ou encore, de créer un réseau optique permettant de diffracter un faisceau d'atomes.

EFFECTIF DU LABORATOIRE : 45

LES ÉQUIPES DE RECHERCHE

Agrégats

L'équipe s'intéresse, à un niveau fondamental, à l'étude du processus de nucléation des agrégats. Il s'agit d'étudier, à un niveau microscopique élémentaire, comment se construit progressivement une nano-gouttelette par collages successifs de constituants (atomes ou molécules) et quelles sont ses propriétés. De telles études permettent de comprendre, par exemple, comment on peut former des gouttelettes d'eau liquide, même à très basse température dans un nuage stratosphérique. L'expérience permet de mesurer la section efficace de collage par collision à basse énergie entre un constituant et l'agrégat en formation. Elle permet enfin de mieux connaître les propriétés physiques de l'agrégat telles que sa température de fusion et sa capacité calorifique.

Atomes froids

Comprendre les états particuliers de la matière, que l'on appelle les condensats de Bose-Einstein, est le principal centre d'intérêt de l'équipe. De tels états sont obtenus en refroidissant un ensemble d'atomes à des températures extrêmement basses de quelques micro-Kelvins au dessus du zéro absolu. Les condensats sont ici obtenus par des moyens entièrement optiques, des lasers de puissance. On peut extraire des atomes de ce condensat qui, étant dans un état quantique cohérent, vont former un « laser à atomes ».



Vue partielle de l'expérience d'interférométrie atomique.
© www.jgphdtopologie.com

simultanée d'un champ électrique et magnétique. L'effet recherché est très petit, et un gain de plusieurs ordres de grandeur de sensibilité a été nécessaire pour en faire la mesure, en transformant une mesure de polarisation en mesure de fréquence.

Femto

Cette équipe travaille sur le développement et l'utilisation d'impulsions laser ultra-courtes de l'ordre de quelques femtosecondes (10^{-15} seconde). Un des axes d'applications est le contrôle cohérent, c'est-à-dire la capacité à façonner l'impulsion laser pour contrôler l'évolution du système irradié. Cette technique a été appliquée au refroidissement vibrationnel de molécules ou à la dynamique de boîtes quantiques dans des semi-conducteurs. L'équipe a aussi travaillé sur la dynamique ultra-rapide de molécules telles que l'iode de méthyle et des molécules à transfert de charge. En s'intéressant par ailleurs à l'application du contrôle cohérent à la factorisation des nombres, l'équipe s'est inscrite dans la thématique de l'informatique quantique, qui vise à la mise au point de nouveaux ordinateurs utilisant les principes de la mécanique quantique.

Interactions ions-matière

Cette équipe s'intéresse aux effets des rayonnements ionisants, ici essentiellement des protons accélérés, sur des molécules d'intérêt biologique telles que les bases de l'ADN/ARN. En effet, toute altération de cette macro-molécule peut engendrer au niveau biologique, la mort de cellules, leur mutation et l'initiation de cancers. Les rayonnements ionisants peuvent conduire à la fragmentation de ces bases ou à l'émission d'électrons. Les fragments sont détectés par spectroscopie de masse. Une autre classe de molécules étudiée est celle des molécules radio-sensibilisantes, qui augmentent l'effet des radiations, et qui sont utilisées dans les traitements des cancers combinant chimio et radio-thérapie.

Théorie

Cette équipe s'intéresse au développement de méthodes mêlant mécanique quantique et classique pour décrire des systèmes atomiques et moléculaires en interactions avec un environnement. Il peut s'agir par exemple, de la dynamique de fragmentation de molécules ou d'agrégats ionisés dans une nano-goutte d'hélium à basse température, de l'interaction entre un plasma et une surface avec des applications dans le domaine de la fusion nucléaire (projet Ite) ou encore, du contrôle cohérent de processus atomiques et moléculaires.



Detail d'un axe optique laser.
© www.jgphdtopologie.com

Interférométrie atomique

Ce groupe a construit un interféromètre atomique qui permet la mesure d'interférences entre ondes de matière avec une très grande précision. Cet interféromètre permet de séparer physiquement les deux faisceaux atomiques qui interfèrent afin d'appliquer des perturbations variées sur un des deux faisceaux. Ce dispositif a permis de réaliser des mesures avec une précision à ce jour inégalée, telles que de la polarisation électrique d'atomes de lithium, d'indices de réfraction de gaz rares par rapport à des ondes de matière et des interactions atome-surface.

Optique pour les tests fondamentaux

Cette équipe s'intéresse à l'utilisation de l'optique pour tester des propriétés fondamentales de la matière. Elle s'est récemment focalisée sur l'étude des effets électro et magnéto-optiques. Il s'agit d'étudier les modifications des propriétés optiques d'un milieu induites par l'application d'un champ électrique ou magnétique et pouvant conduire au phénomène de bi-réfringence obtenu quand la lumière ne se propage pas de la même façon selon sa polarisation. Plus précisément, l'équipe s'intéresse au cas d'un gaz avec application

La boîte à outils

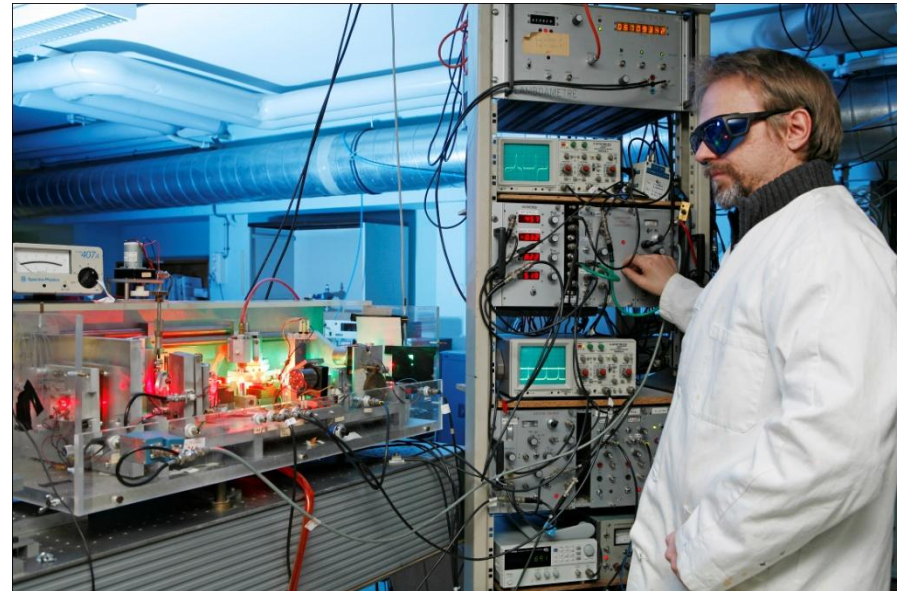
Les concepts de la mécanique quantique



Les ordinateurs

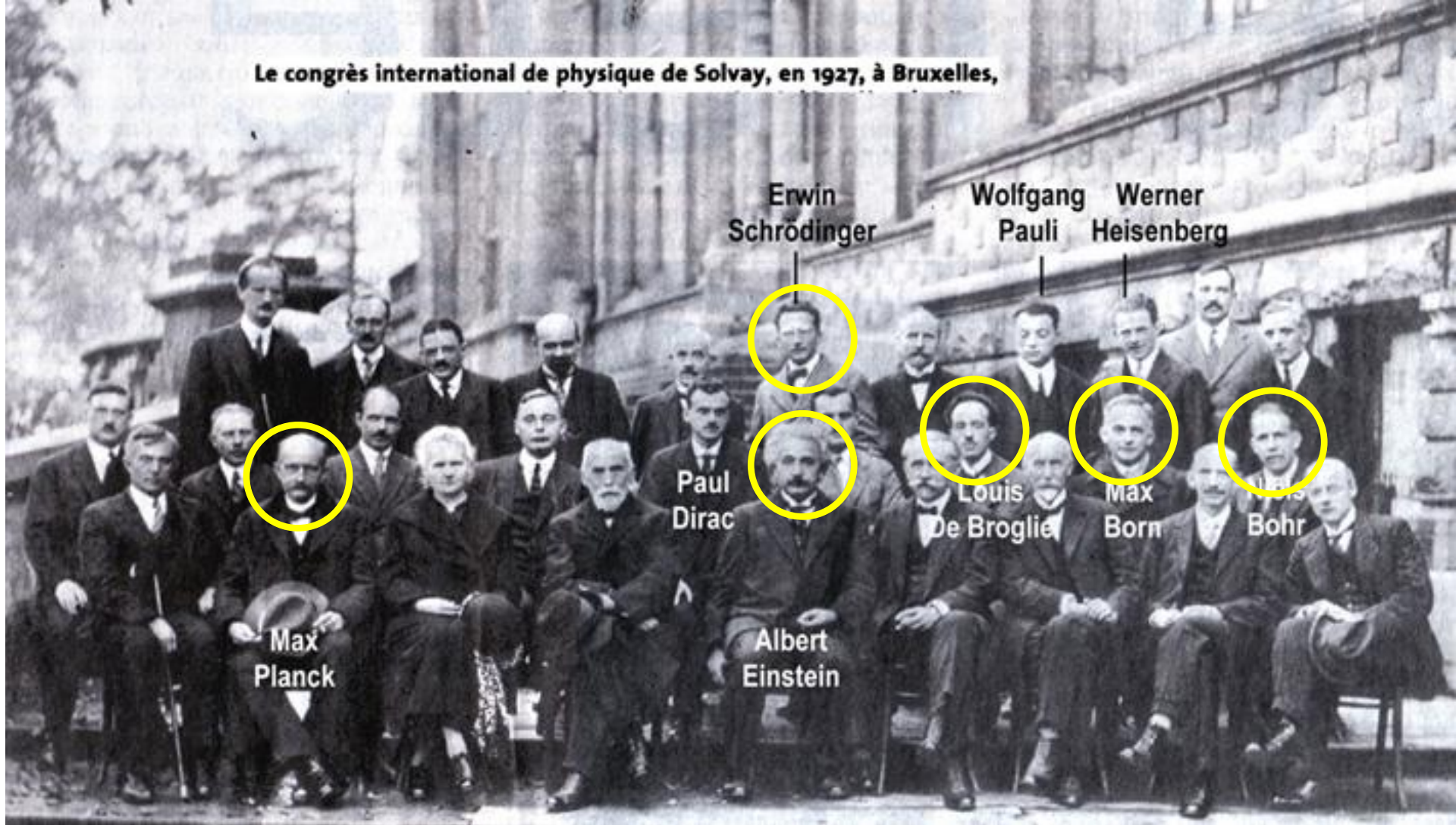


Les expériences



CONGRES REVOLUTIONNAIRE...

Le congrès international de physique de Solvay, en 1927, à Bruxelles,



29 participants, 17 titulaires ou futurs prix Nobel

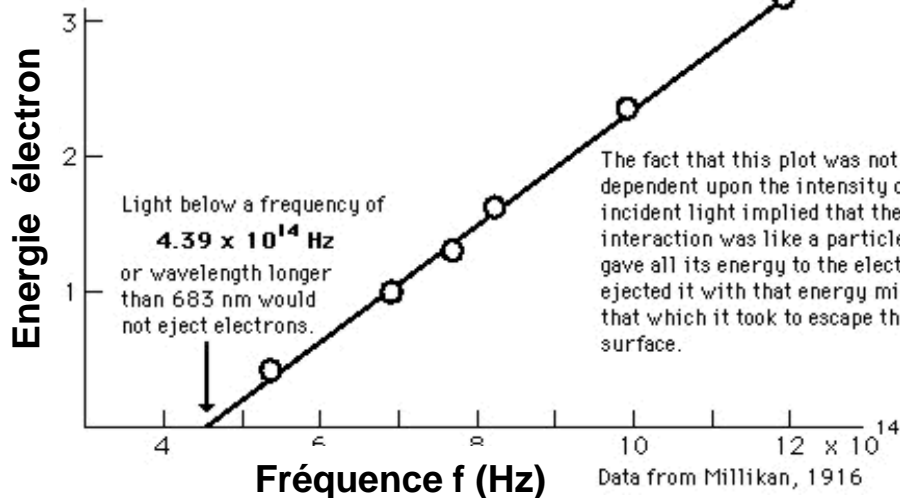
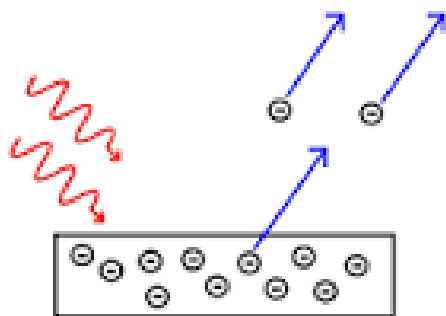
L'effet photoélectrique : Einstein - 1905



Prix Nobel 1921

Observation : une plaque éclairée par une lumière de fréquence (\approx couleur) f émet des électrons dont l'énergie est donnée par :

$$\text{Energie électron} = h.f - \text{Travail sortie}$$



Einstein :

la lumière est constituée de particules appelées photons dont l'énergie est :

$$\text{Energie photon} = h.f$$

Conclusion :

La lumière, onde, est aussi particule

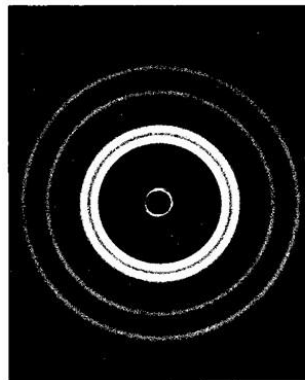
Dualité onde-particule : de Broglie - 1924



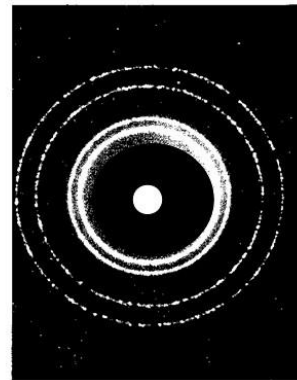
Prix Nobel 1929

de Broglie :
aux particules (électrons...) on peut associer des
ondes : $\lambda = h/p$

Observation :
Diffraction des électrons
dans un cristal (1927)



Rayons X



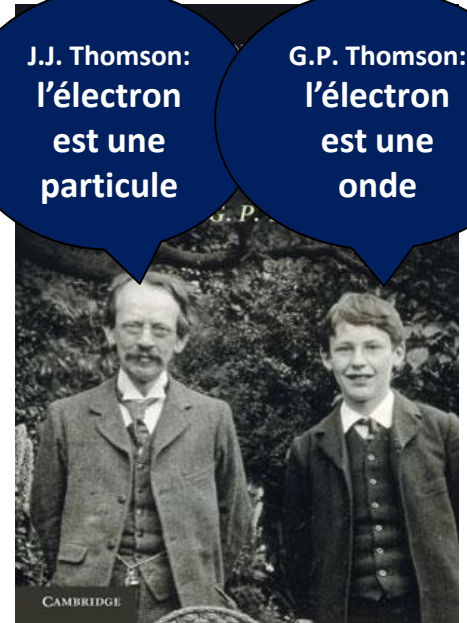
Electrons

« Il a levé
un coin du
grand
voile »



J.J. Thomson:
l'électron
est une
particule

G.P. Thomson:
l'électron
est une
onde



prix Nobel : JJ : 1906, GP : 1937

Conclusion : la matière, faite de particules, est aussi onde.

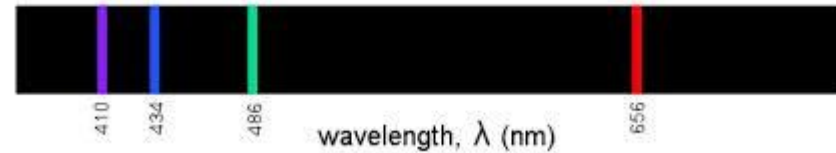


Prix Nobel 1933

L'équation d'onde : Schrödinger - 1926

Observation : la lumière émise par un corps ne contient que certaines fréquences (\approx couleurs)

Hydrogen Emission Spectrum



- l'onde associée à une particule Ψ est solution de l'équation : $H\Psi = E\Psi$
 E est l'énergie de la particule
- cette énergie E est quantifiée, elle ne peut prendre que certaines valeurs. Les Ψ correspondant sont des niveaux d'énergie.

Interprétation
du spectre de l'hydrogène :
la lumière émise
résulte de changements
de niveaux d'énergie
des électrons

**Propriétés du système induites
par l'équation de Schrödinger:**

1. La fonction d'onde évolue de façon continue
2. La fonction d'onde évolue de façon déterministe



Pas Prix Nobel !

La mesure : von Neumann - 1932

Mesure =

interroger le système physique et lui demander
(en le mettant en interaction avec un appareil de mesure) :
« *Dans quel état (d'énergie, de vitesse, de position...) es-tu ?* »

avant la mesure

Mélange de 2 états : $\Psi_{\text{Etat 1}}$ (d'énergie E_1) et $\Psi_{\text{Etat 2}}$ (d'énergie E_2)

$$\Psi_{\text{avant}} = c_1 \Psi_{\text{Etat 1}} + c_2 \Psi_{\text{Etat 2}}$$

c_1, c_2 : poids des constituants dans le mélange

après la mesure

$\Psi_{\text{après}} = \Psi_{\text{Etat 1}}$ avec une probabilité $c_1 \times c_1$

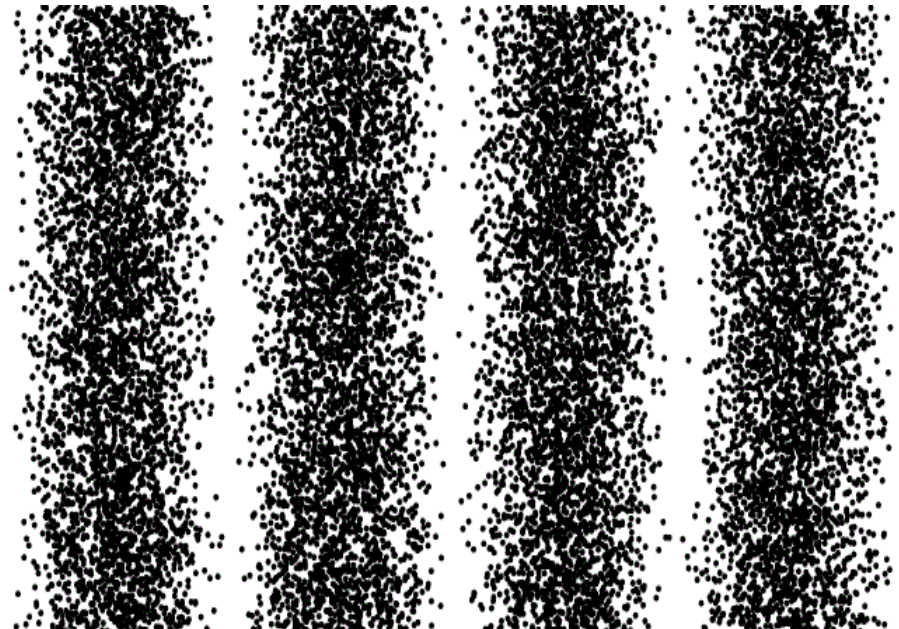
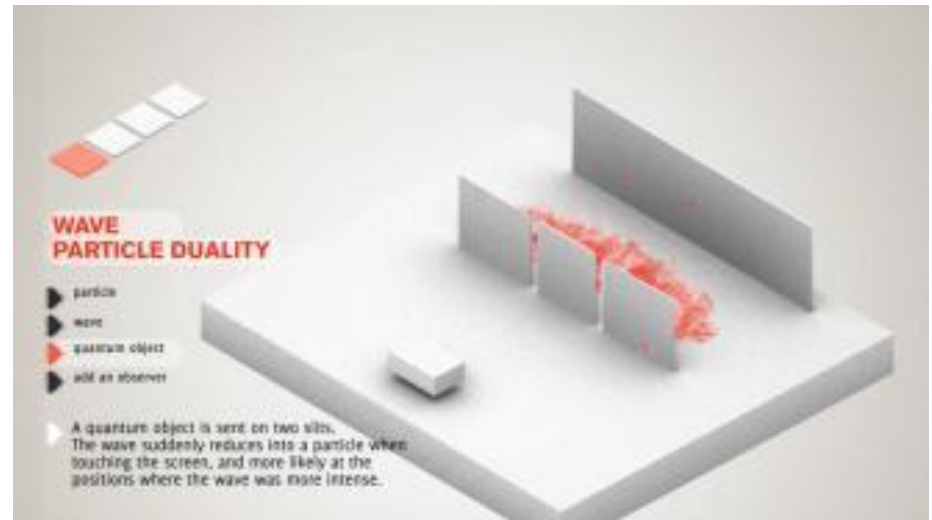
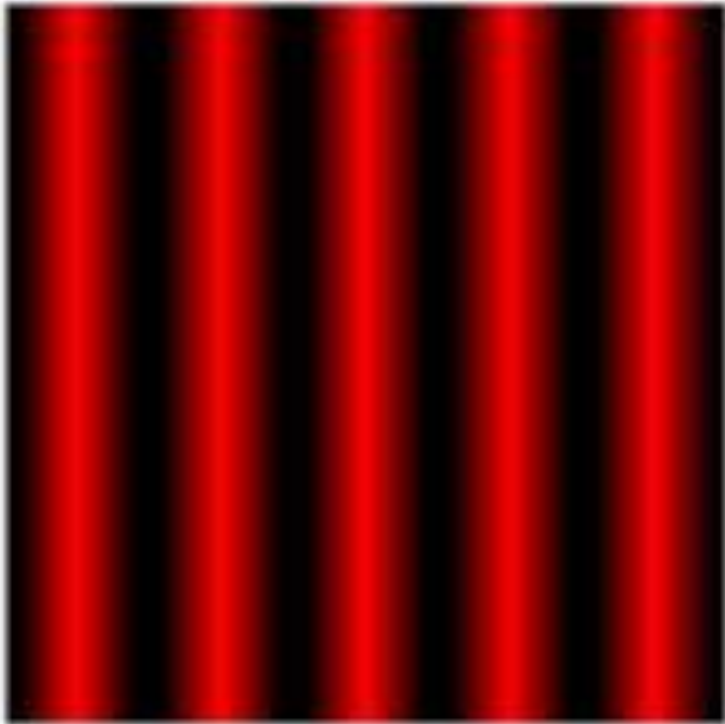
OU

$\Psi_{\text{après}} = \Psi_{\text{Etat 2}}$ avec une probabilité $c_2 \times c_2$

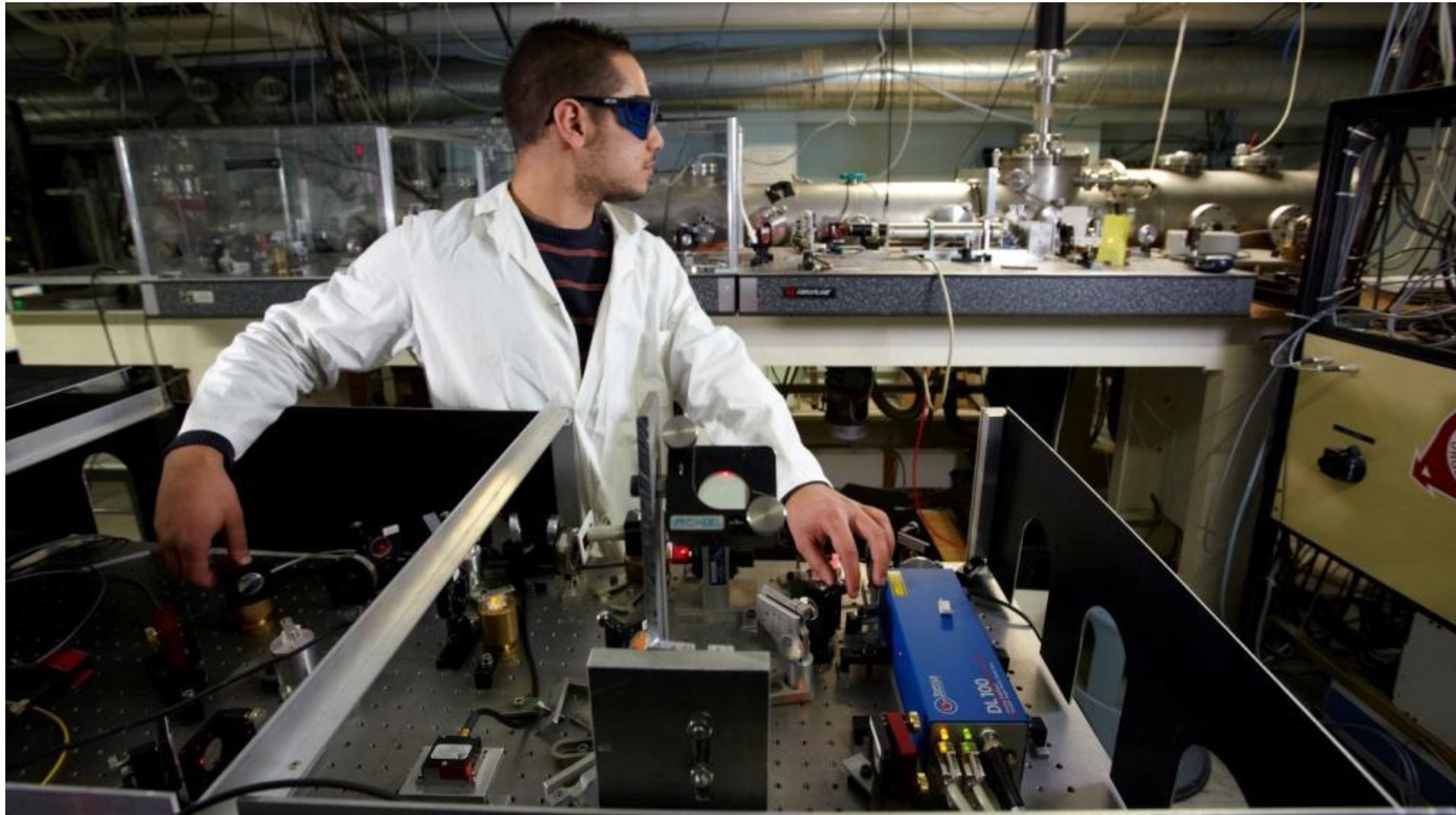
Propriétés du système induites par une mesure :

1. La fonction d'onde change de façon **DIS**continue
2. La fonction d'onde change de façon **IN**déterministe

La dualité onde-particule : expérience des fentes d'Young



Dualité onde-particule : une expérience de laboratoire



1^{ère} étrangeté : Incohérence !

La physique quantique a **deux fondements** :

1. **l'équation de Schrödinger** : équation de base de l'évolution d'un système :
évolution continue, déterministe
2. **théorie de la mesure** : évolution du système : discontinue, indéterminisme

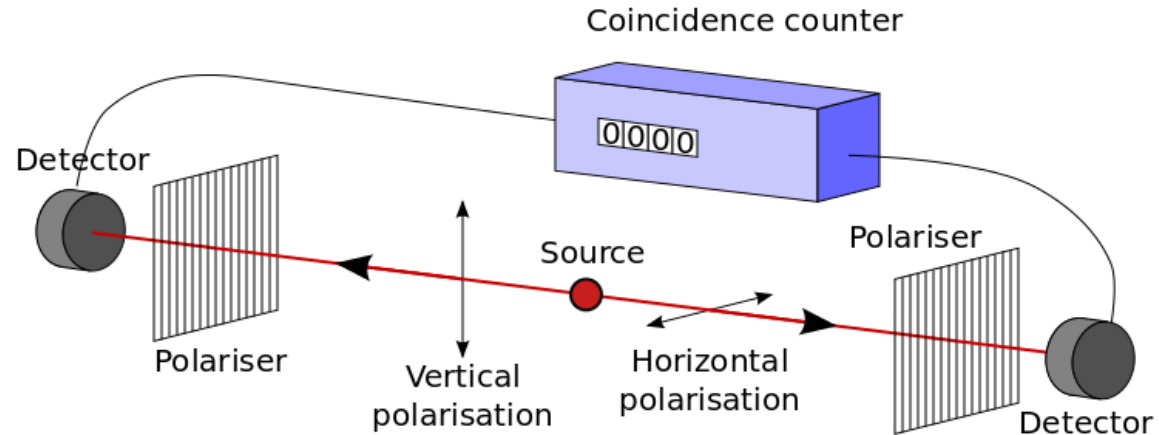
→ Le système évolue de façon spéciale au moment d'une mesure, comme si la validité de l'équation de Schrödinger était momentanément suspendue.

**→ LES 2 FONDEMENTS DE LA PHYSIQUE QUANTIQUE
SONT MUTUELLEMENT INCOHERENTS**



La non localité en mécanique quantique

Expérience de pensée :
Einstein-Podolski-Rosen (1935) + Bohm (1951)



Un atome (source) émet simultanément 2 photons : un vers la gauche, un vers la droite

SI ON MESURE **SEPARÉMENT** LA POLARISATION DE CHAQUE PHOTON :

Gauche : 50 % de chance qu'elle soit H, 50 % de chance qu'elle soit V

Droite : 50 % de chance qu'elle soit H, 50 % de chance qu'elle soit V

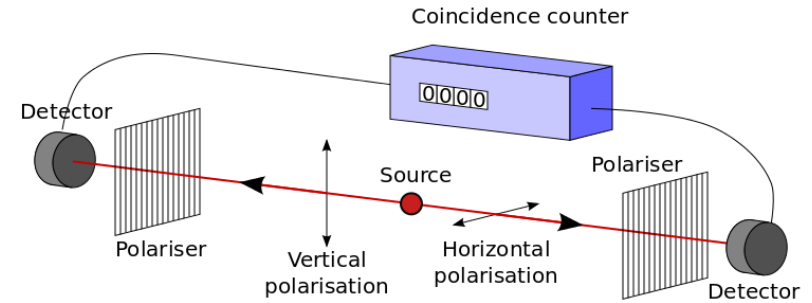
SI ON MESURE **SIMULTANÉMENT** LES 2 POLARISATIONS :

si celle de gauche est H : celui de droite est toujours V

si celle de gauche est V : celui de droite est toujours H

Avant la mesure à gauche :
l'état à droite est indifféremment H ou V

Après la mesure à gauche :
l'état à droite est parfaitement défini



La mesure fait passer le système d'une potentialité à une réalité. Il y a une modification **non locale instantanée** du système.

Dieu ne joue pas aux dés. Il y a des **variables cachées** qui définissent complètement le système dès l'émission des photons.

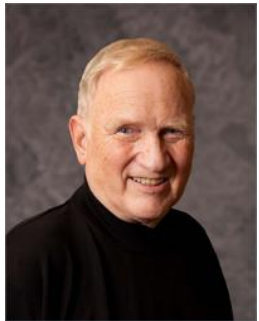


La non localité en mécanique quantique



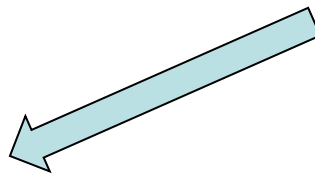
1964 : John Bell trouve une quantité B qui combine les résultats de mesure telle que $B < 2$ si la théorie des variables cachées d'Einstein est correcte

Quand l'expérience de pensée devient réalité...



Clauser
(1972-1976)

$$B = 2.697 \pm 0.015$$



2^{ème} étrangeté :
la théorie quantique
est
non locale !



Aspect
(1981-1982)



Chat de Schrödinger

1 chance sur 2 pour
(Sur une durée de 1 heure)

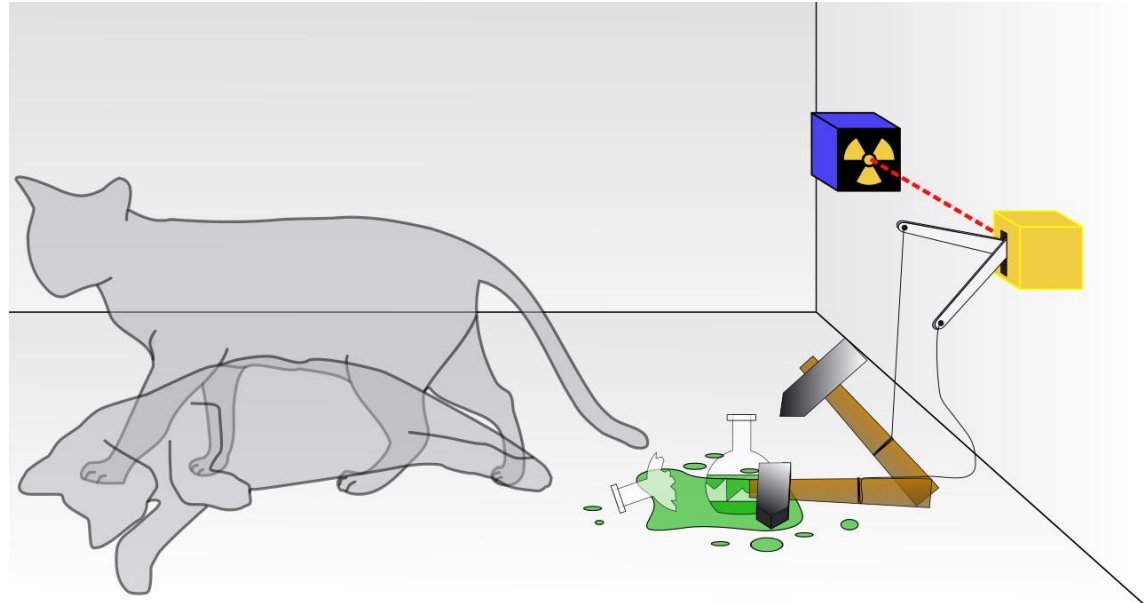
émission particule radioactive



brisure du flacon de cyanure



mort du chat



Etat macroscopique

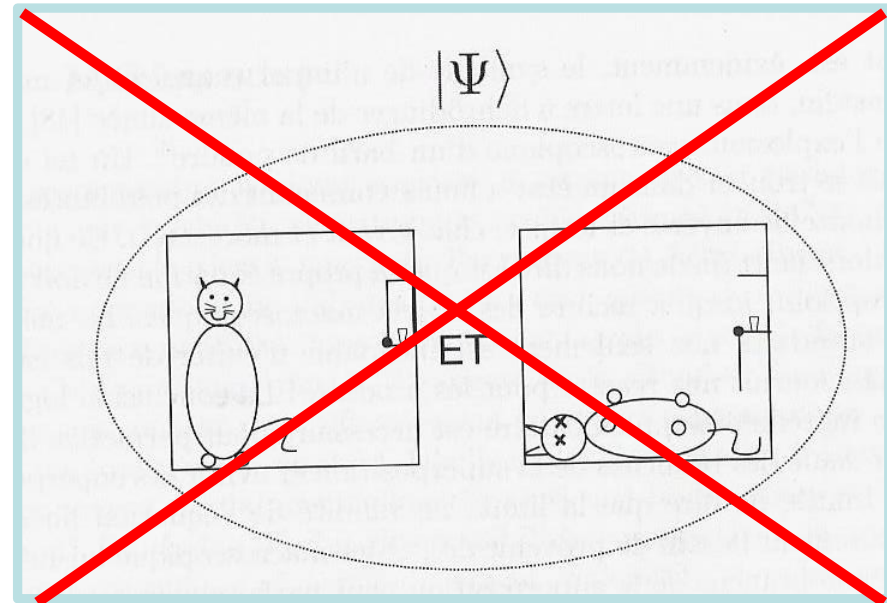
« chat de Schrödinger »

=

(mort/vivant)

????

NON !



3^{ème} étrangeté : des limites floues !

La physique quantique est constituée de **lois empiriques** qui ont permis de rendre compte d'un certain nombre de phénomènes jusqu'alors inexplicables (rayonnement des corps, spectres de lumière...).

Il ne faut pas en faire une théorie globale capable de rendre compte de toute la réalité à toutes les échelles.

Elle a un **domaine d'application où elle est opérationnelle**, c'est à dire où elle permet de faire des prédictions chiffrables.

Ce domaine est plutôt du côté de l'infiniment petit, mais a des frontières floues :

dans certains cas, les propriétés du réel macroscopique (celui de la physique de Newton, déterministe...) **émergent progressivement** à notre échelle d'un sous-jacent quantique (indéterministe...)

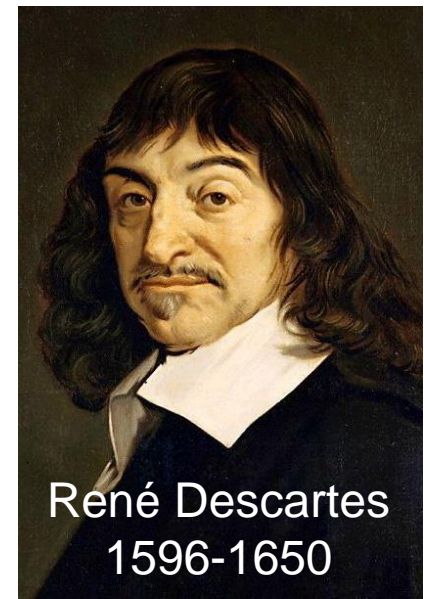
Dans d'autres cas (les appareils de mesure/chats...), il y a **discontinuité**.

La physique quantique :

Certainement pas des idées « **claires et distinctes** »
(même pour Einstein !) sur les mystères de la nature.
Le réel reste « voilé ».

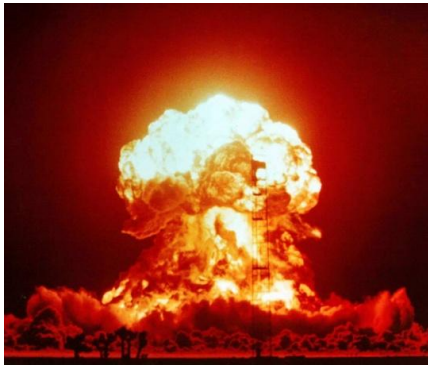
Et pourtant

elle est précise, prédictive, opérationnelle
et elle rend comme « **maitres et possesseurs** » de la nature



René Descartes
1596-1650

Pas Prix Nobel !

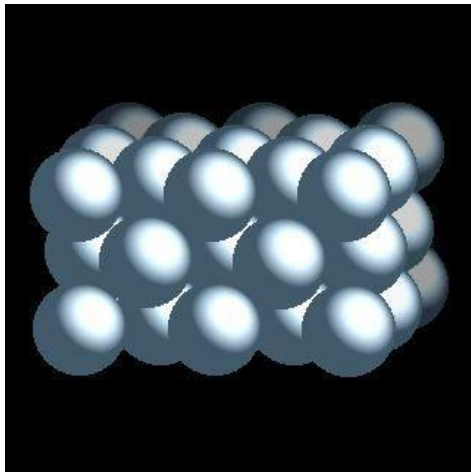


De la science aux
technologies
ambivalentes...



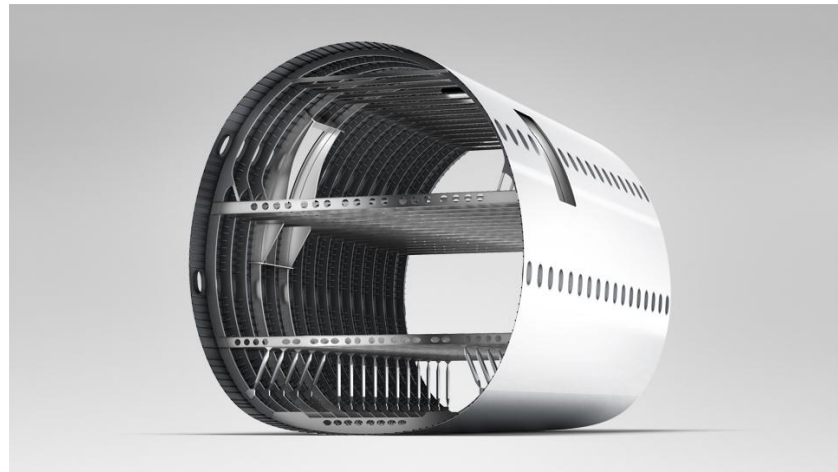
DE MULTIPLES DISCOURS SCIENTIFIQUES, CHACUN OPERATIONNEL DANS SON DOMAINE

La même réalité a de multiples utilisations
et va être appréhendée par de multiples discours scientifiques,
tous fondés sur l'utilisation de mathématiques.



L'aluminium vu par un
physicien du solide.

Ex : propriétés électriques.



Le même aluminium vu par un
ingénieur aéronautique.

Ex : Propriétés mécaniques.

Le discours scientifique doit donc rester confiné à son « domaine opérationnel » :
pas de physique quantique pour concevoir la structure d'un avion,

Et a fortiori :

pas de « mystiques quantiques », pas de « thérapies quantiques »...

De la nécessité de la multiplicité des discours...



Scientifique

Euh...

Un tas d'atomes ?
Euh non...

Un amas de cellules ?
...Non

Un animal doué de raison ?
...Non

Un être plus cher que moi-même ?

Pour toi, qui suis-je ?

« Tu es toute belle comme la lune, resplendissante comme le soleil, redoutable comme des bataillons... »

Philosophique

Axiologique, éthique

Poétique



<http://www.irsamc.ups-tlse.fr/>

onglet « bibliothèque » → « livres IRSAMC »

documentation@irsamc.ups-tlse.fr

bruno.lepetit@irsamc.ups-tlse.fr



Et maintenant...

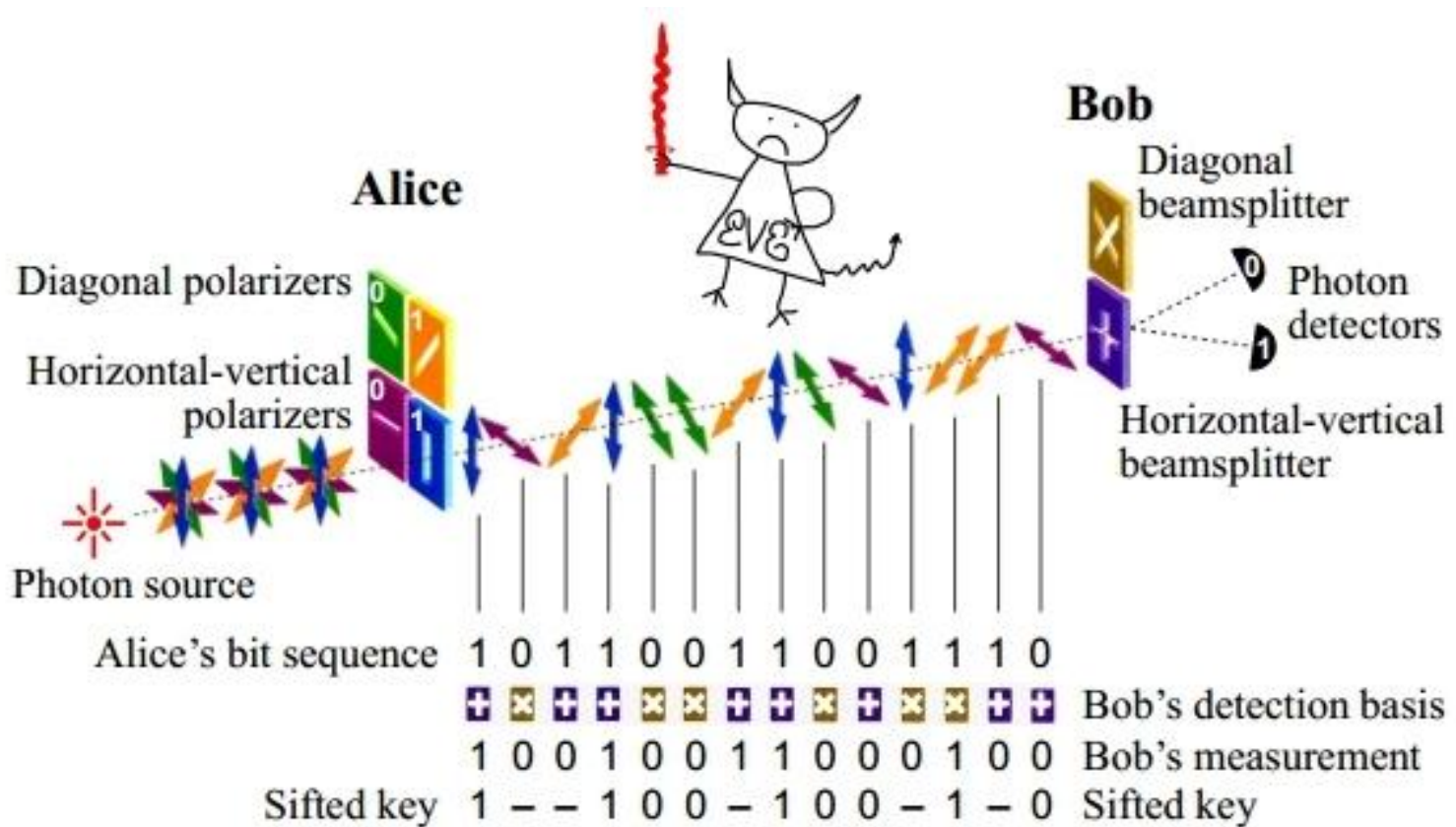
Science → Technoscience

1. De la compréhension à la maîtrise de la matière
à l'échelle du nanomètre → nanotechnologies
2. Maîtrise de l'information et de son transport :
 - « téléportation quantique »
 - « cryptographie quantique »
 - « informatique quantique »...

*Le test sans faille des inégalités de Bell
qui est au départ une expérience de nature philosophique
aura immédiatement une application pratique,
avec des retombées financières »
(Antonio Acin)*



DISTRIBUTION QUANTIQUE DE CLES DE CRYPTAGE



L'opération d'espionnage perturbe le système comme une mesure.
Elle est donc détectable.

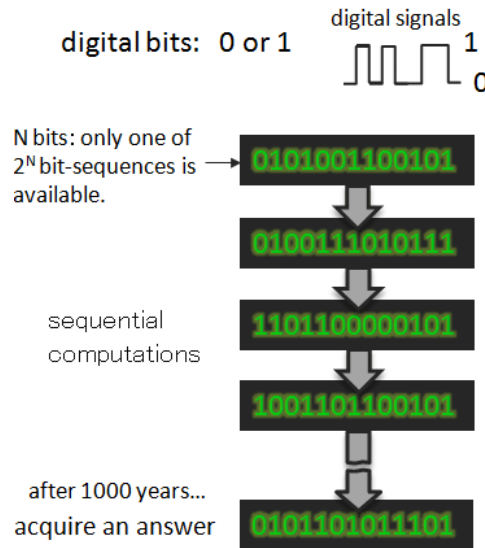
ORDINATEUR QUANTIQUE

Q-bit est à la fois 0 et 1
 → parallélisme des traitements des données

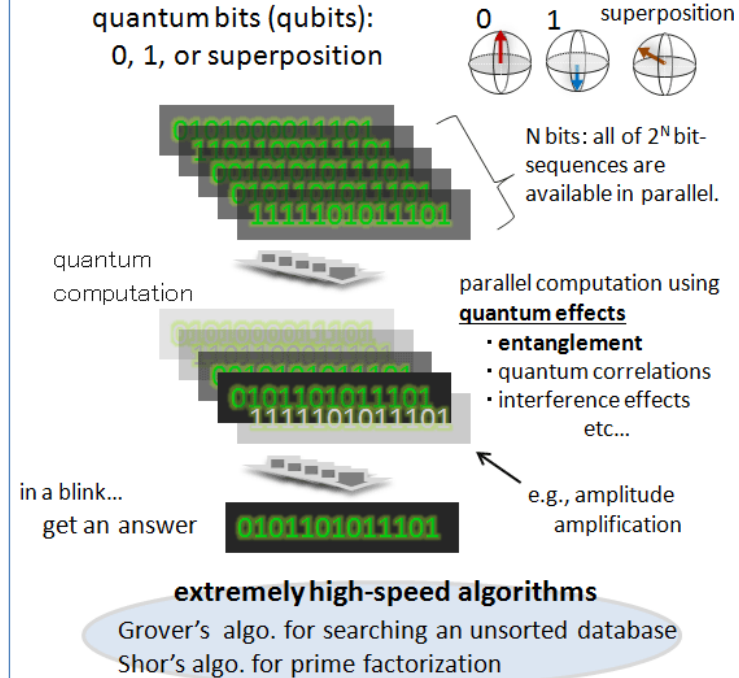
Mais :

- prendre connaissance du résultat, c'est faire une mesure et réduire à néant ce parallélisme (réduction du paquet d'ondes)
- difficultés de réalisation (décohérence)

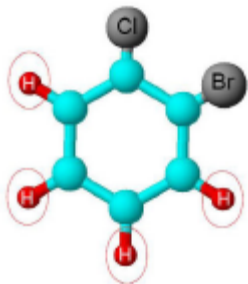
Conventional



Quantum



143=11x13 !!



Quantum Factorization of 143 on a Dipolar-Coupling Nuclear Magnetic Resonance System

Nanyang Xu,¹ Jing Zhu,^{1,2} Dawei Lu,¹ Xianyi Zhou,¹ Xinhua Peng,^{1,*} and Jiangfeng Du^{1,†}

¹Hefei National Laboratory for Physical Sciences at Microscale and Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui, 230026, China

²Department of Physics Shanghai Key Laboratory for Magnetic Resonance, East China Normal University Shanghai 200062
 (Received 13 November 2011; published 30 March 2012)

Quantum algorithms could be much faster than classical ones in solving the factoring problem. Adiabatic quantum computation for this is an alternative approach other than Shor's algorithm. Here we report an improved adiabatic factoring algorithm and its experimental realization to factor the number 143 on a liquid-crystal NMR quantum processor with dipole-dipole couplings. We believe this to be the largest number factored in quantum-computation realizations, which shows the practical importance of adiabatic quantum algorithms.

TELEPORTATION QUANTIQUE

en 3 étapes

C

Alice transmet le résultat de la mesure à Bob, qui peut ainsi « corriger » l'état de la particule 3 pour le rendre identique à l'état initial de la particule 1.

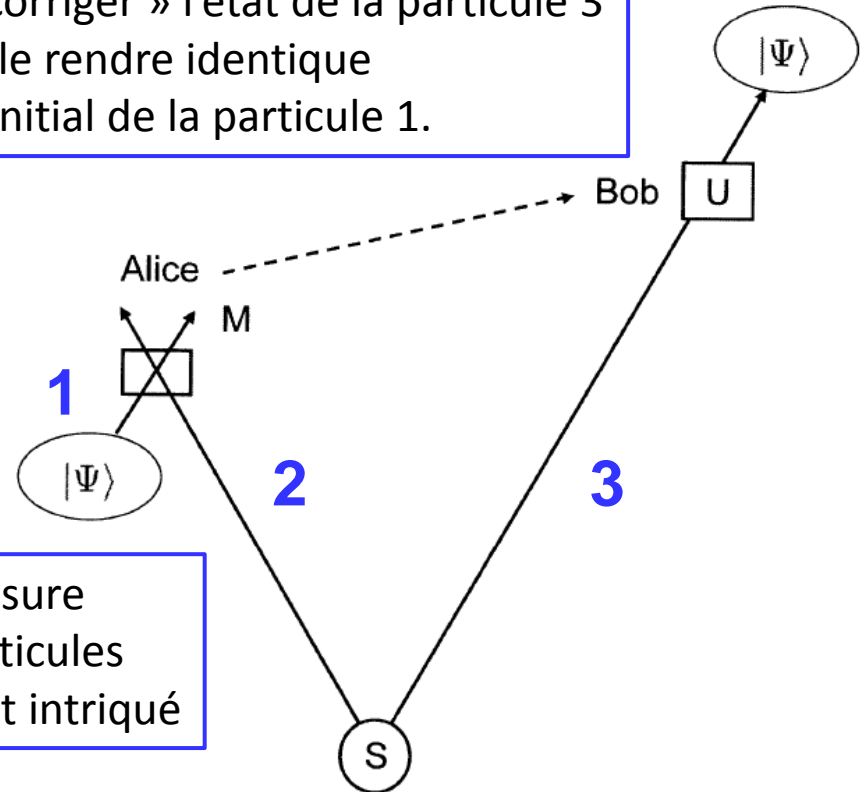
Étape cruciale :
L'état de la particule 3 est changé par cette mesure impliquant 1,2 au travers de l'intrication 2,3

B

Alice fait une mesure impliquant les particules 1 et 2 qui crée un état intriqué

A

1 source S émet deux particules 2 et 3 dans un état intriqué



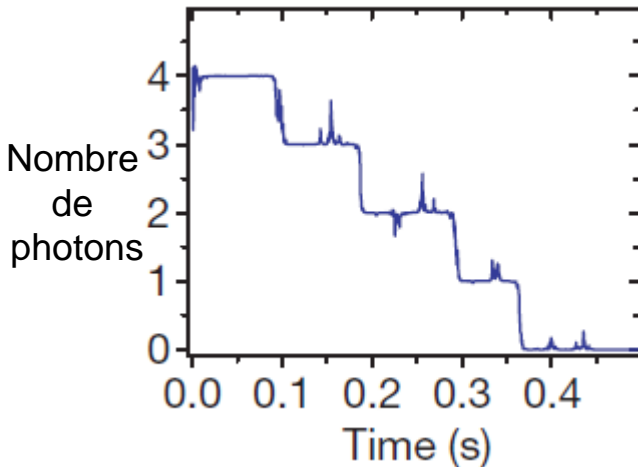
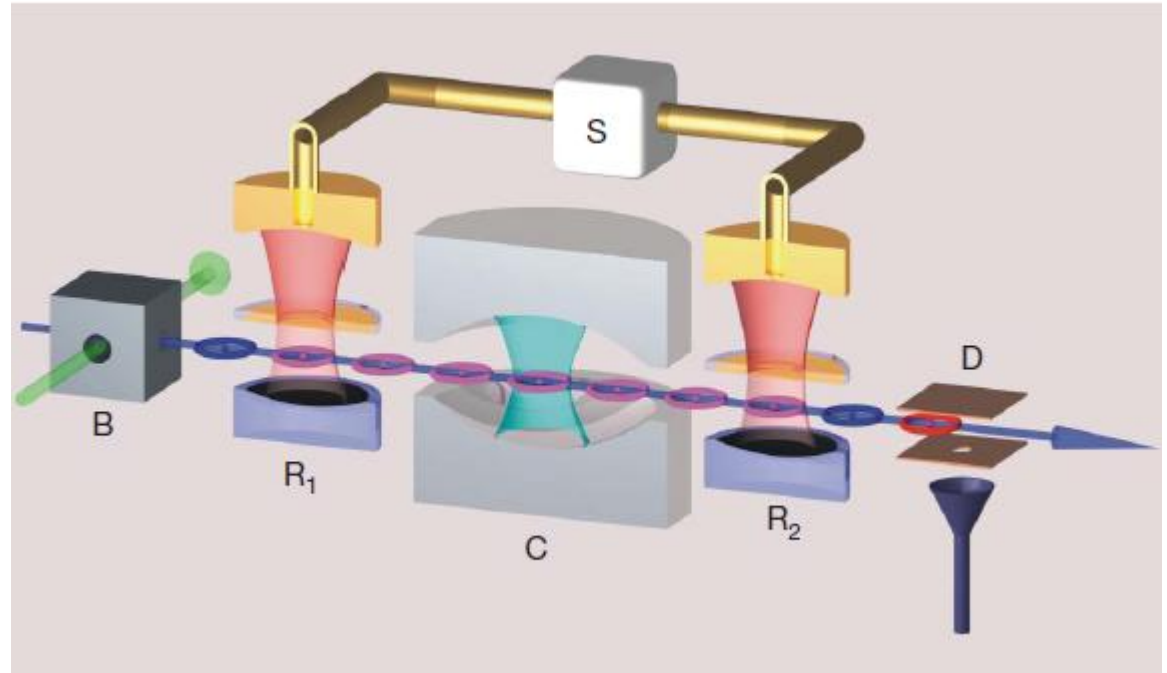
Zeilinger 1997

Serge Haroche et Les chatons de Schrödinger



Prix Nobel 2012

- Atomes de Rydberg utilisés comme sondes non destructrices des photons contenus dans une cavité :
- Observation de « chatons » $|g\rangle|n1\rangle + |e\rangle|n2\rangle$
- observation de « sauts quantiques » pour les états de la cavité



Détection des photons de la cavité par interaction avec des atomes de Rydberg

$$g \xrightarrow{R_1} \frac{e+g}{\sqrt{2}} \xrightarrow{C} \frac{e + \exp(i\Phi(n))g}{\sqrt{2}} \xrightarrow{R_2} \begin{matrix} n=0, g \\ n=1, e \end{matrix}$$

La présence d'un photon change l'indice du milieu, donc la phase $\Phi(n)$

De la nécessité de discours non-scientifiques...



*" Le progrès technique est
comme une hache qu'on
aurait mis dans les mains
d'un psychopathe" (1917)*

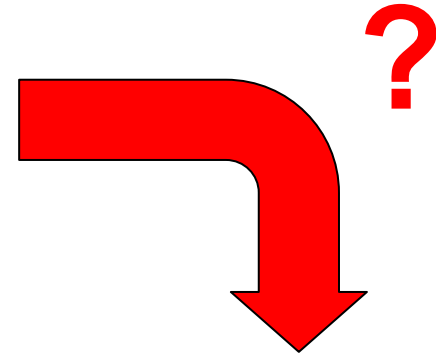
Science et technologies donnent
la puissance.
Pour l'utiliser à bon escient,
l'orienter voire la limiter,
nous avons besoin de **sagesse** qui
conjugue tous les discours.

De la nécessité de discours non-scientifiques : exemple 1 : les cyborgs



?

=



Tous des tas d'atomes,
tous des êtres de même valeur,
dont on peut mélanger des
morceaux à volonté ?



Nécessité d'un discours éthique !

De la nécessité de discours non-scientifiques : exemple 2 : la géo-ingénierie

Les changements climatiques : Juste un problème technique ayant des solutions techniques ??

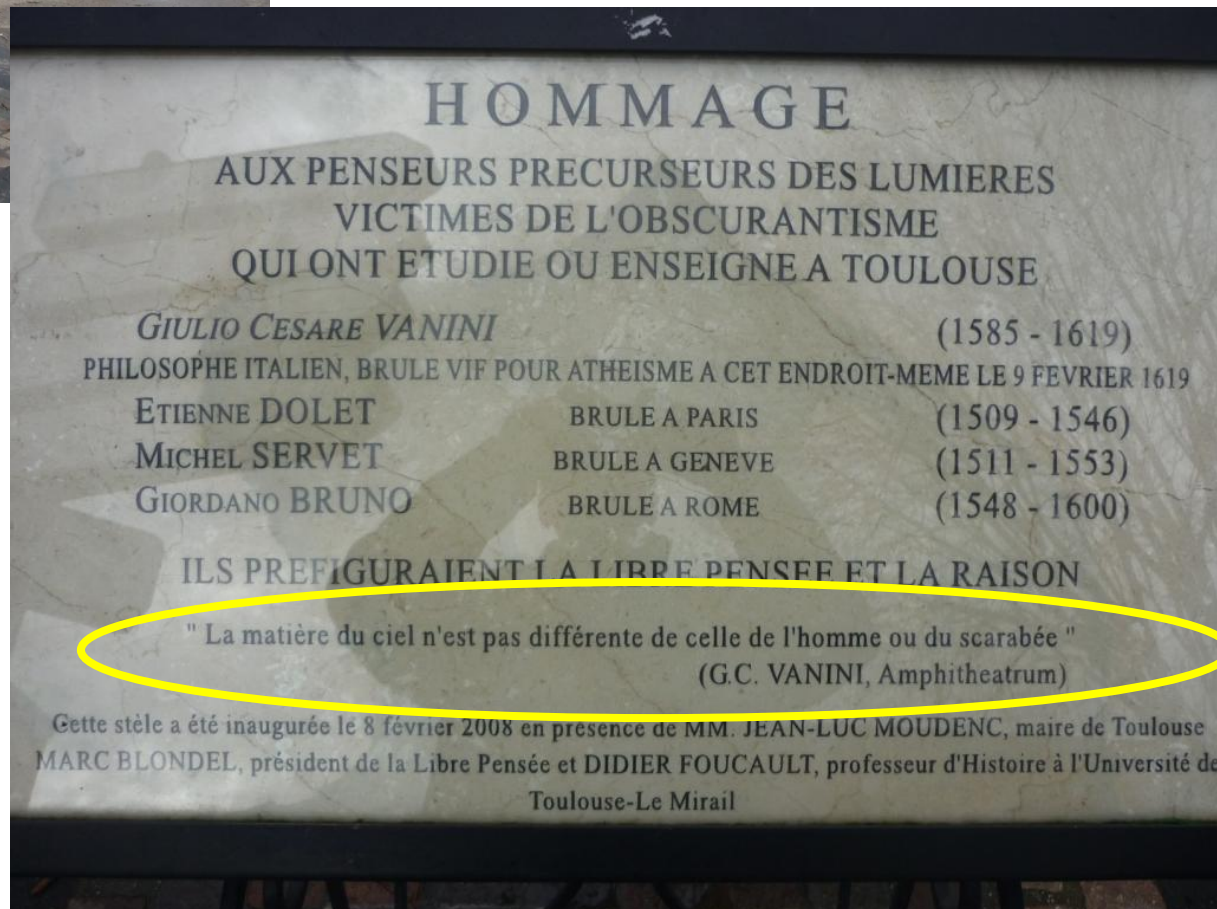
Utilisation de technologies à l'échelle planétaire :

- injection d'aérosols dans l'atmosphère
- stockage du carbone dans le sol...



**NON ! Un problème plus vaste mettant en jeu nos comportements,
nos valeurs, notre vision de l'homme et de la nature !!**

« La matière du ciel
n'est pas différente
de celle de l'homme
et du scarabé »
(Vanini)



Le ciel est donc bien fait de la même matière que l'homme et le scarabée, mais il n'est pas que cela. Sinon, il serait *un ciel bas et lourd [qui] pèse comme un couvercle* (Baudelaire) et empêche de voir au-delà.

*La clôture autarcique de la civilisation contemporaine **sur les seuls paradis qu'elle peut fabriquer**...la prive de deux dimensions qui sauvent l'homme de l'asphyxie : aveugles sur le ciel – que ce soit celui des saints, celui des idées, celui de la poésie – nous n'avons plus de hauteur vers laquelle lever les yeux, comme nous n'avons plus d'autre, de tout-autre, avec lequel entrer en relation, puisque aussi bien le ciel – le Mystère –, en quelque brin d'herbe qu'il se cache, présente toujours le double caractère de l'altitude et de l'altérité...*

*Le palliatif à **l'effet de serre spirituel** qui nous menace passe donc par les retrouvailles avec le Mystère dans sa rafraîchissante étrangeté, comme par une saine insurrection de notre regard intérieur. Le premier regard que nous portons sur une immensité pressentie est le commencement de notre émancipation. Il nous faut aujourd'hui des regards ...qui fassent des brèches dans le couvercle... Car le ciel commence de se voir dans le regard de ceux qui le voient grand ouvert.*

François Cassingena-Trévedy, revue *Etudes* (Mars 2015)