

Puissance et étrangeté de la physique quantique

S.Haroche, Collège de France et ENS

La théorie quantique nous a ouvert au *XX^{ème}* siècle le monde microscopique des particules et des atomes....

....et nous a ainsi fourni les clés des technologies modernes (*ordinateurs, lasers, horloges atomiques, imagerie médicale...*)

C'est une théorie dont la logique microscopique défie toujours notre intuition classique, même si son étrangeté reste en général «voilée» au niveau macroscopique.

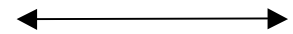
Des expériences récentes laissent entrevoir l'espoir que cette étrangeté microscopique pourrait être domestiquée pour réaliser au *XXI^{ème}* siècle de nouvelles avancées technologiques à la frontière des sciences de l'information et de la physique...

Une seconde révolution quantique?

La physique quantique couvre plus de 60 ordres de grandeur!



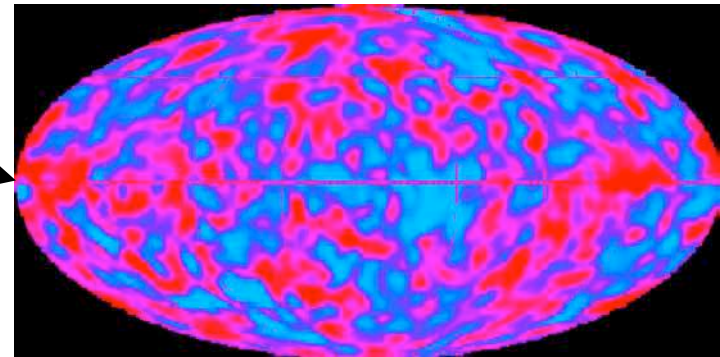
10^{-35} Mètre



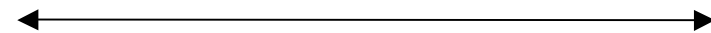
Super cordes

*(constituants
élémentaires*

*hypothétiques de
l'univers)*



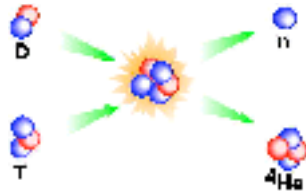
10^{+26} Mètres



*Carte des fluctuations du
rayonnement thermique micro-
onde de l'univers*

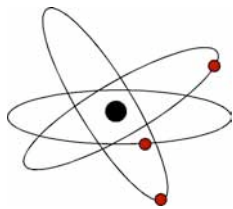


$10^{-35} M$

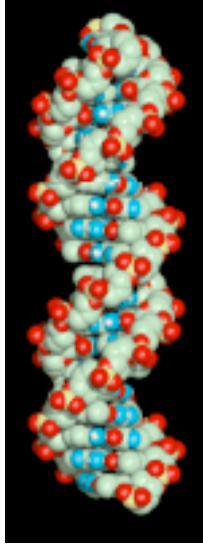


$10^{-15} M$

(noyaux, radioactivité
Énergie nucléaire)



$10^{-10} M$
(atomes)



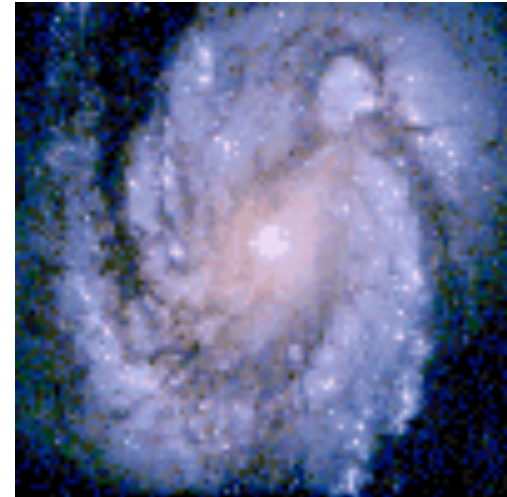
$10^{-8} M$
(molécules
biologiques)



$10^{-3} M -$
 $10 M$
(monde
macro-
scopique)



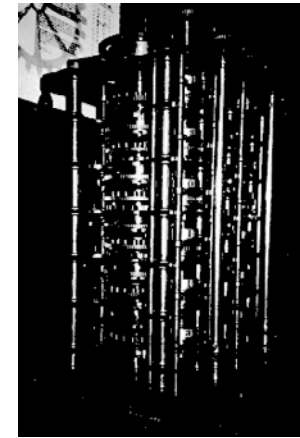
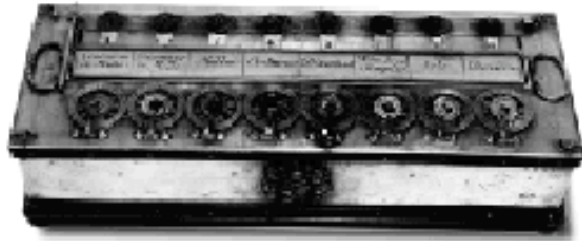
$10^{+8} - 10^{+10} M$
(planètes, étoiles)



$10^{+20} M$
(galaxies)

$10^{+26} M$
Univers

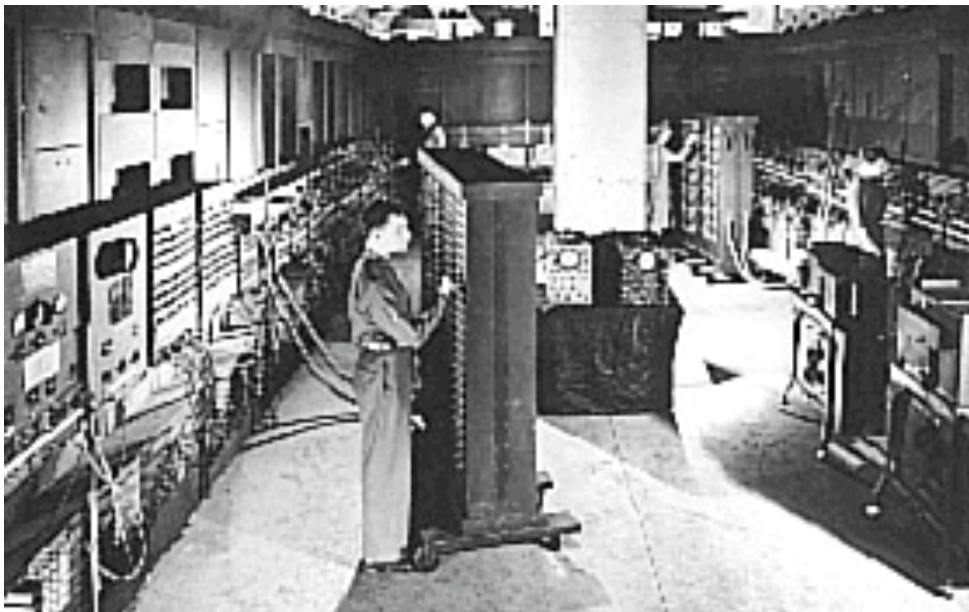
La technologie « classique » a conduit....



....de la machine mécanique de Pascal (1650)...

..à celle de Babbage (1840)...

..et au gigantesque calculateur électrique à lampes ENIAC (1948)....



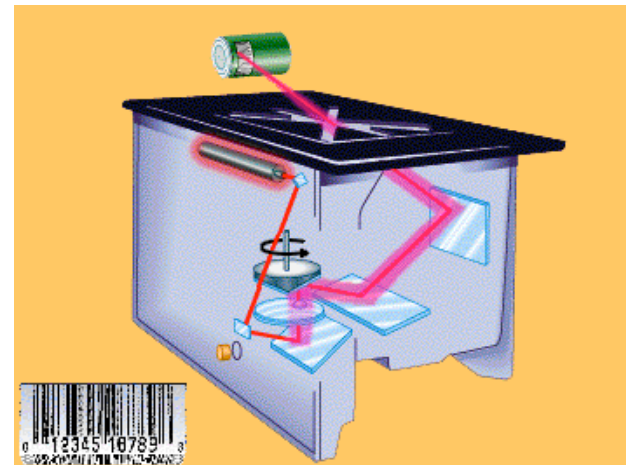
...atteignant une limite pratique que seule la technologie « quantique » du transistor intégré a permis de franchir



Le laser dont le principe remonte aux travaux d'Einstein sur l'émission stimulée (1917) ...

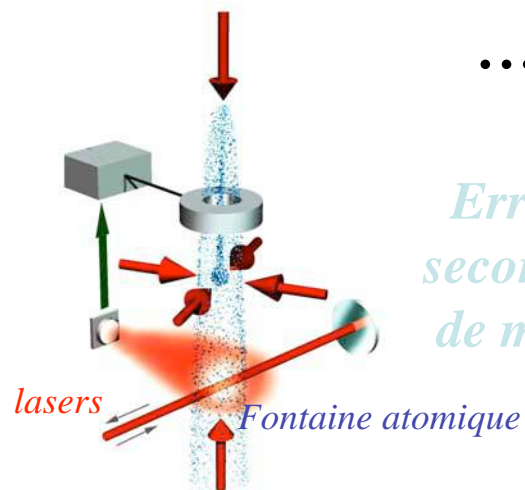


...a conduit à une large gamme d'applications...



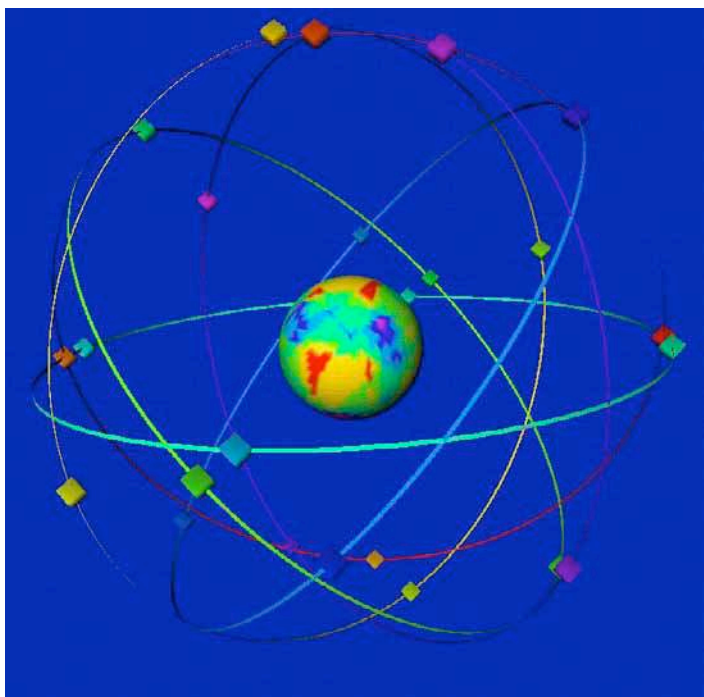
La mesure précise du temps, qui repose aussi sur des principes quantiques (horloges atomiques)...

...a aussi conduit à des applications importantes



Erreur inférieure à la seconde sur des dizaines de millions d'années...

Le GPS est basé sur des triangulations utilisant des satellites transportant des horloges atomiques synchronisées

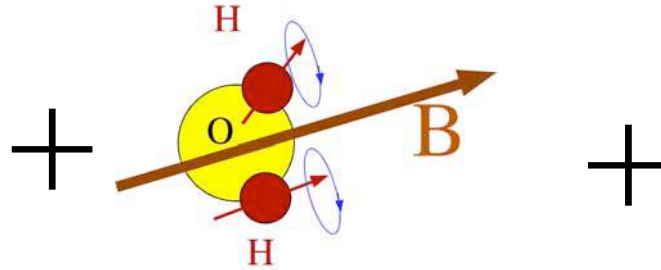


Position définie partout sur la Terre avec une précision de quelques centimètres...

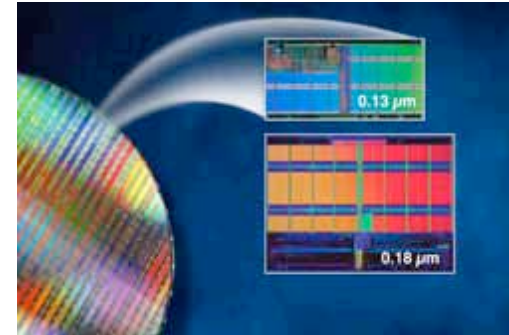
L'IRM est la combinaison de trois technologies à base quantique:



Aimants supraconducteurs



*Résonance magnétique
des protons (H) dans un
champ magnétique B*

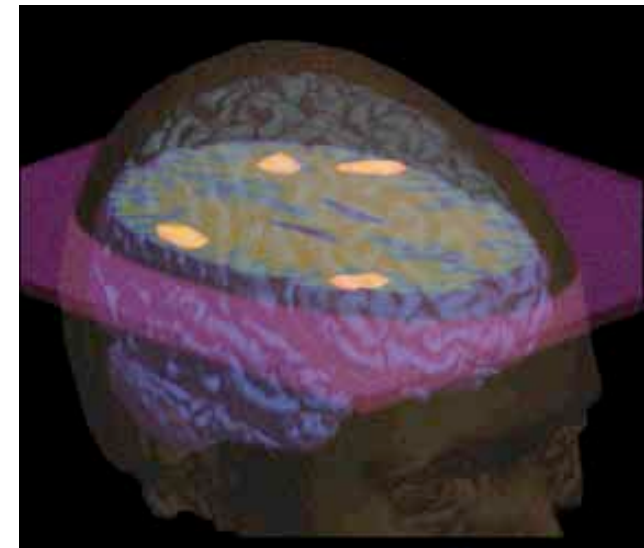


*Circuits intégrés semi-
conducteurs pour la
reconstruction des images*

→ *Imagerie par
résonance
magnétique
(IRM)*

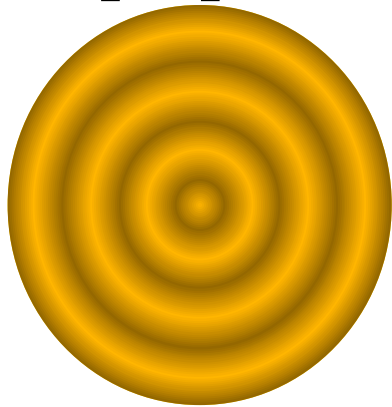


Images statiques...



*...ou dynamiques
(le cerveau en action..)*

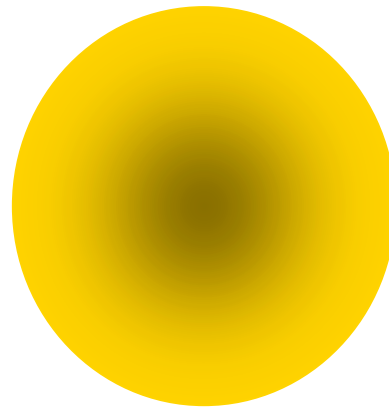
Superpositions d'états et fonction d'onde



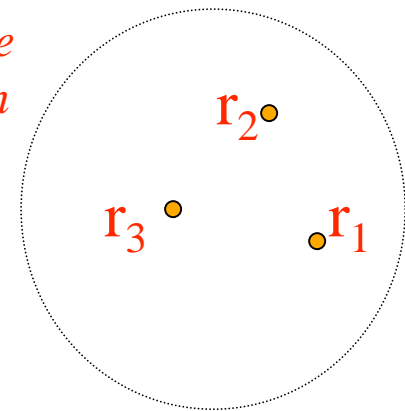
Dans l'atome d'H, l'électron est dans une superposition d'une infinité de positions possibles, à l'intérieur d'un volume sphérique dont le diamètre est de l'ordre de 1 Angström

$\Psi(r_1)$
 $\Psi(r_2)$
 $\Psi(r_3)$
.
.

Fonction d'onde Ψ obéissant à l'équation de Schrödinger



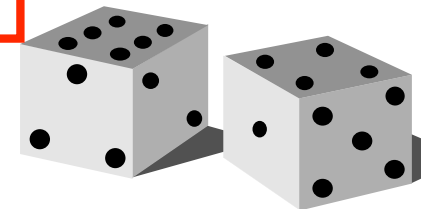
Mesure de la position de l'électron



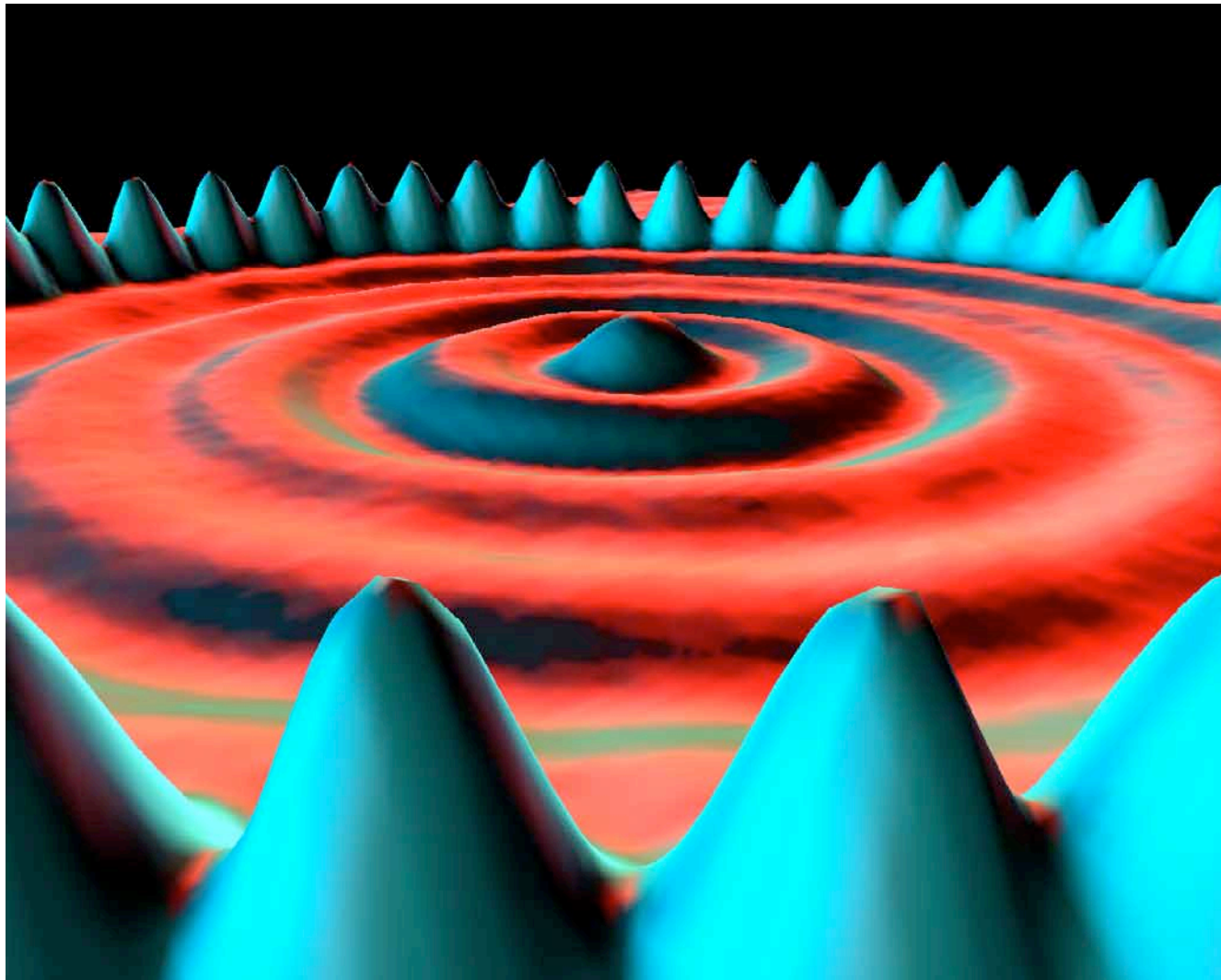
Résultat aléatoire

Probabilité $P(r) = |\Psi(r)|^2$

Dieu joue aux dés.... (Einstein n'aimait pas cela..)



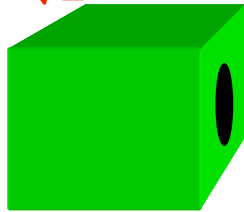
Des instruments tels que le microscope à effet tunnel nous permettent d'obtenir des images réelles de fonctions d'onde (ici des électrons confinés dans un «corral atomique»)



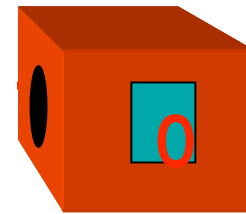
La théorie quantique est statistique...

Préparation d'une particule dans un état quantique

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$$



Mesure d'une quantité physique binaire (polarisation..)



100010010110011010100110010111010100010010010011

0

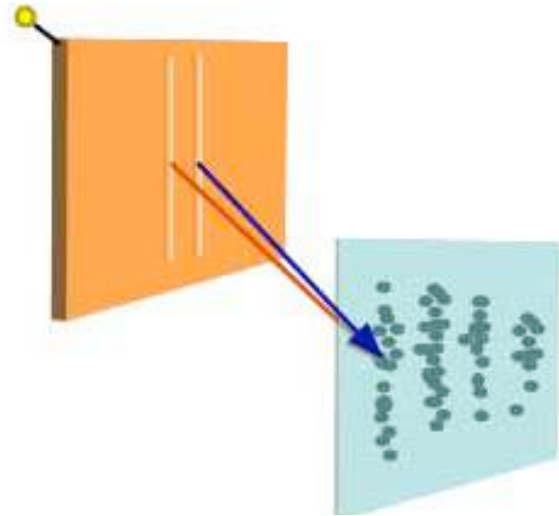
La théorie ne permet de calculer que des probabilités

L'interférence quantique : « l'essence de l'étrangeté quantique » (R.Feynman)



«Personne ne comprend vraiment la physique quantique»

*Interferomètre de Young avec des photons, électrons, atomes, molécules...
traversant l'appareil un à un*



L'interférence se bâtit progressivement, les particules étant détectées une par une
La logique quantique en action

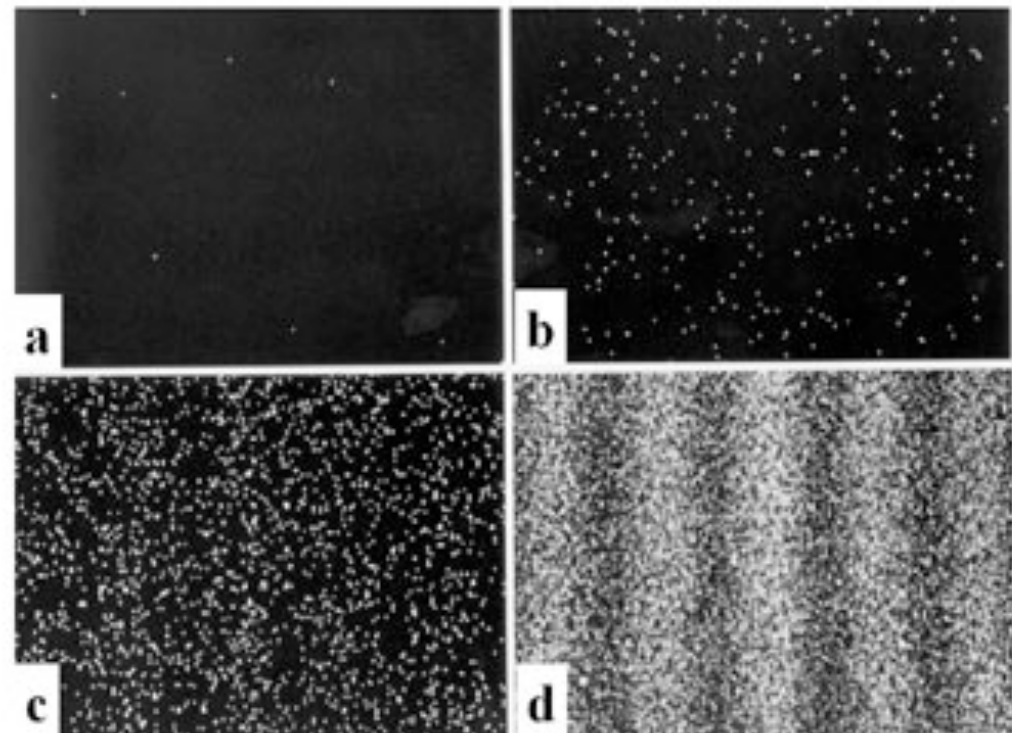
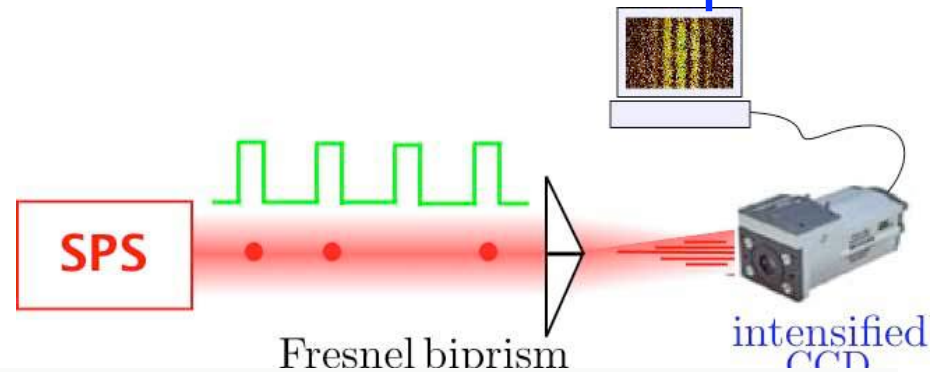


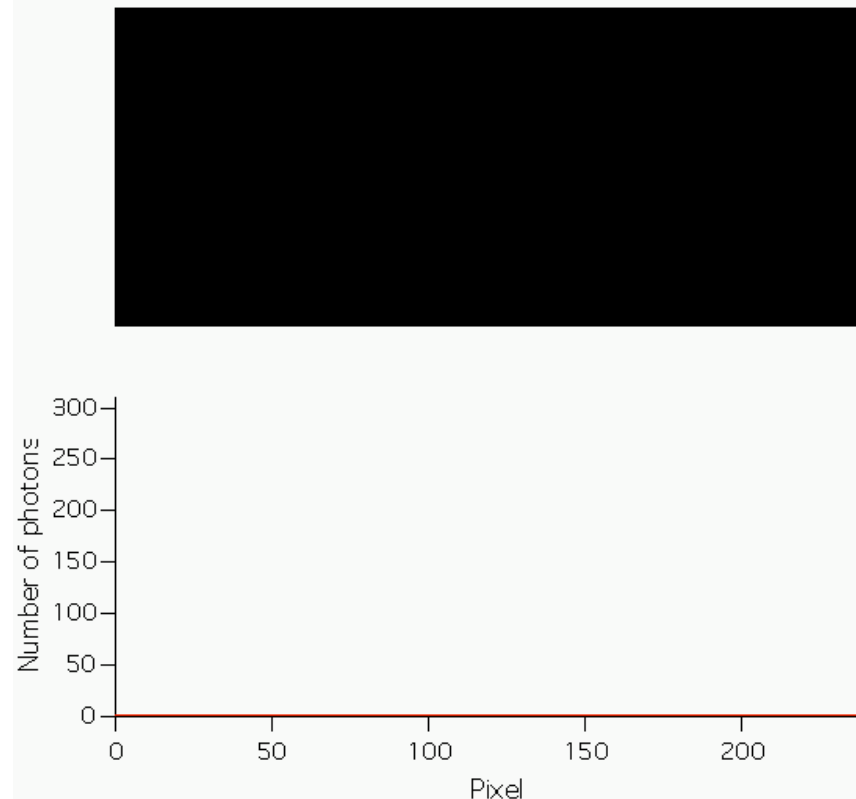
Illustration de l'étrangeté de la physique quantique: interférence à photon unique

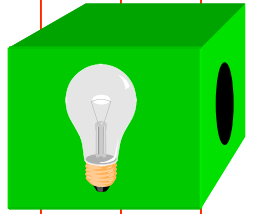


Une expérience de « cours »

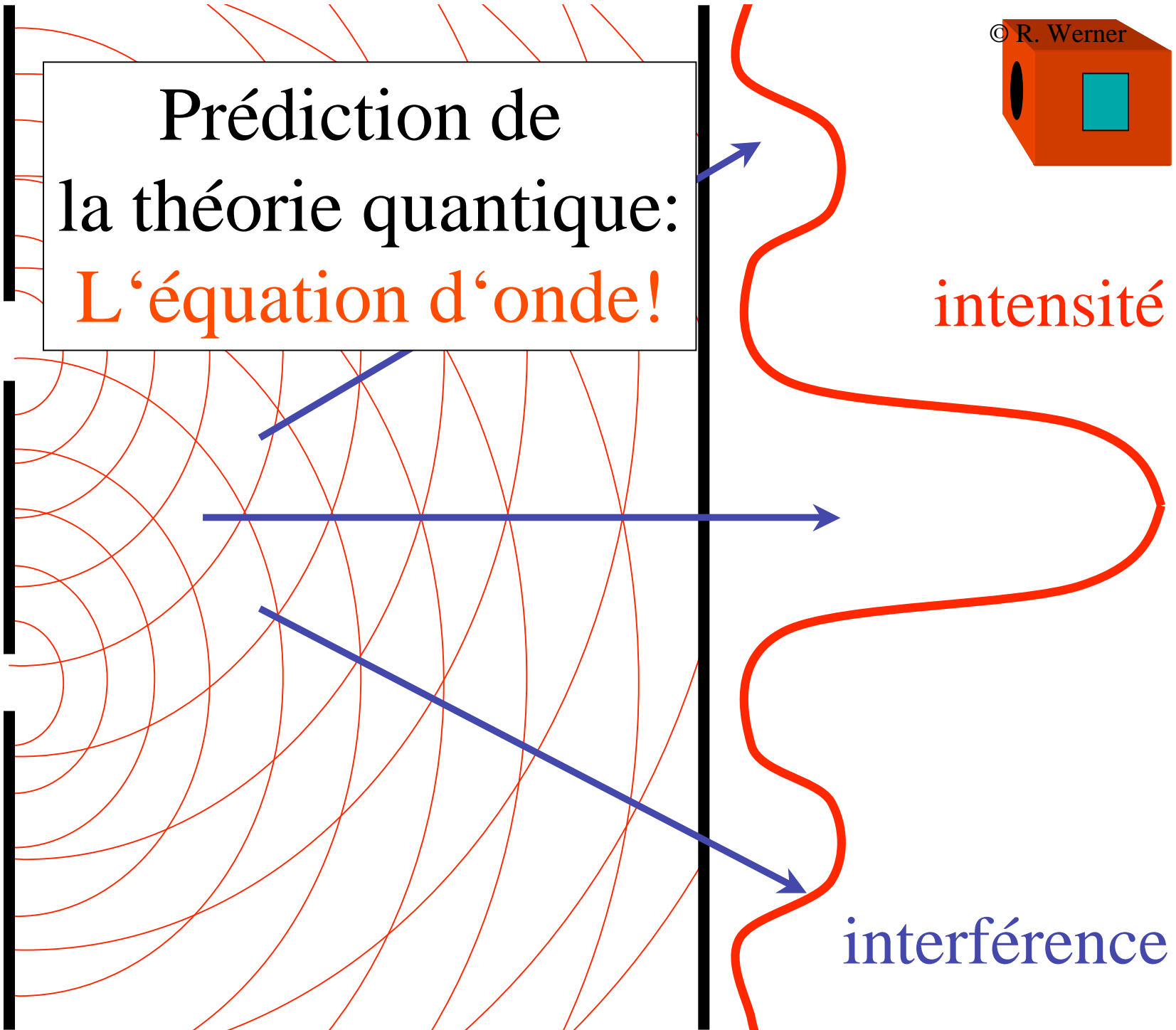
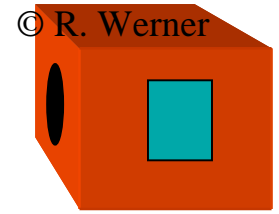
Avec la permission de Jean-François Roch (ENS-Cachan)

L'expérience demande une source de photons uniques (cristal de diamant avec centre NV)



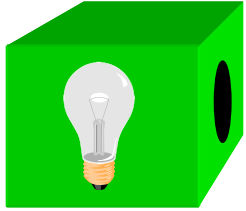


Prédiction de
la théorie quantique:
L'équation d'onde!



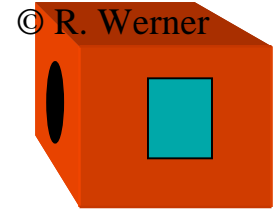
intensité

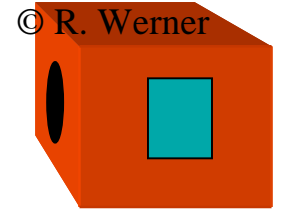
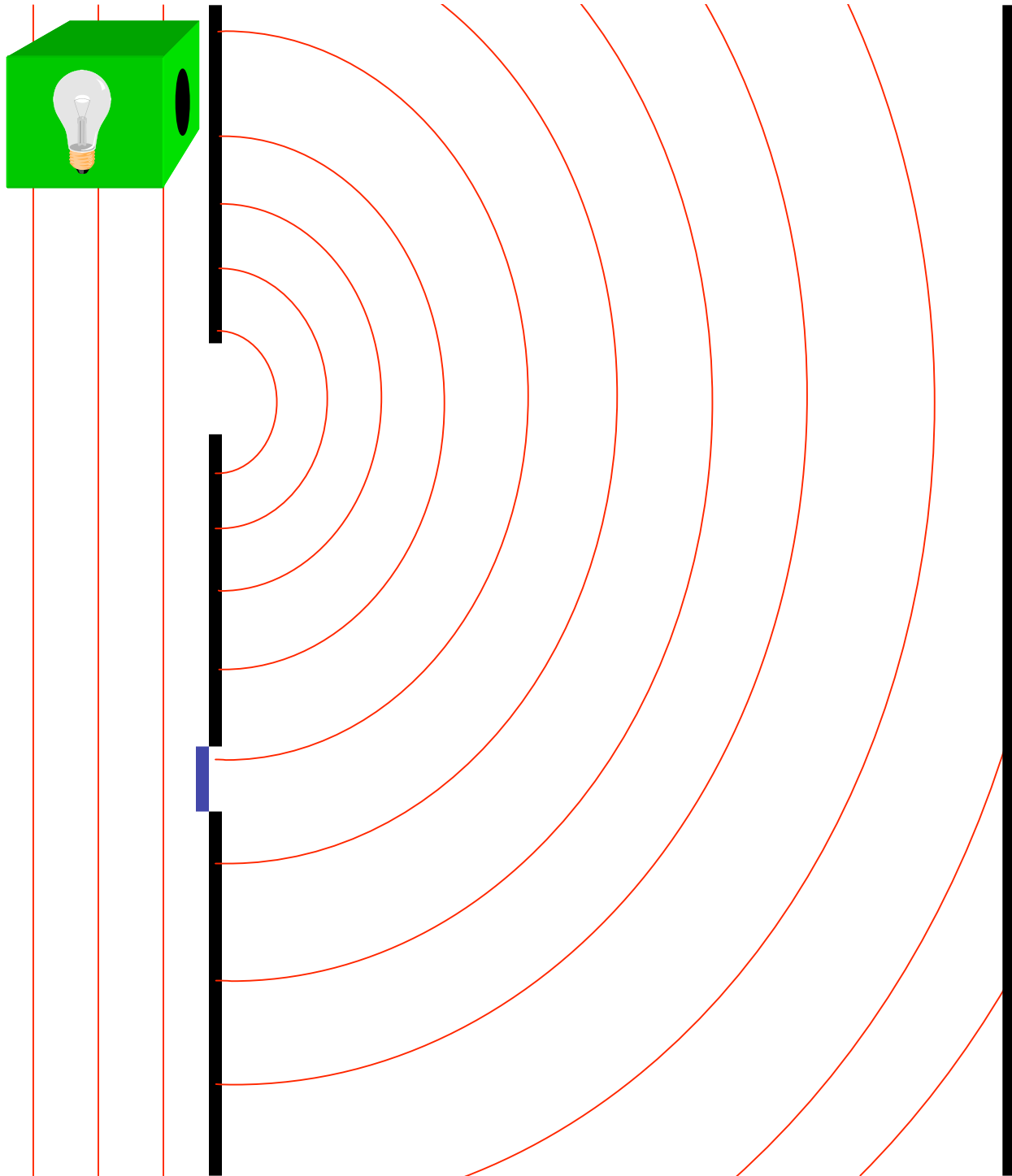
interférence



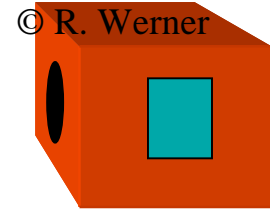
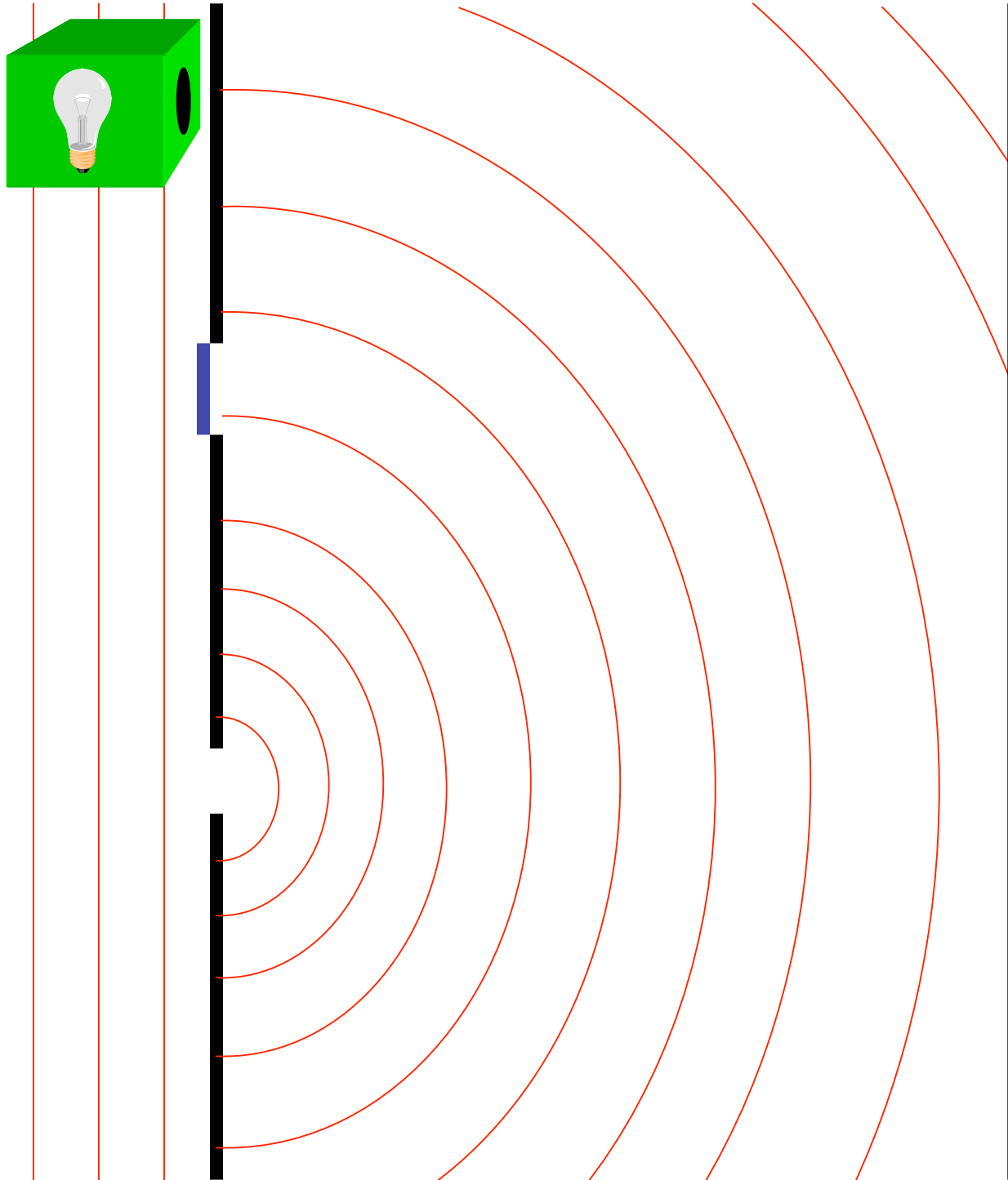
Qu'a fait la particule
entre sa
préparation et sa détection?

Par quel trou est-elle
passée?

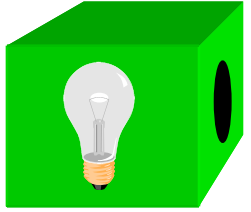




Distribution des
particules
passées par la
fente du haut

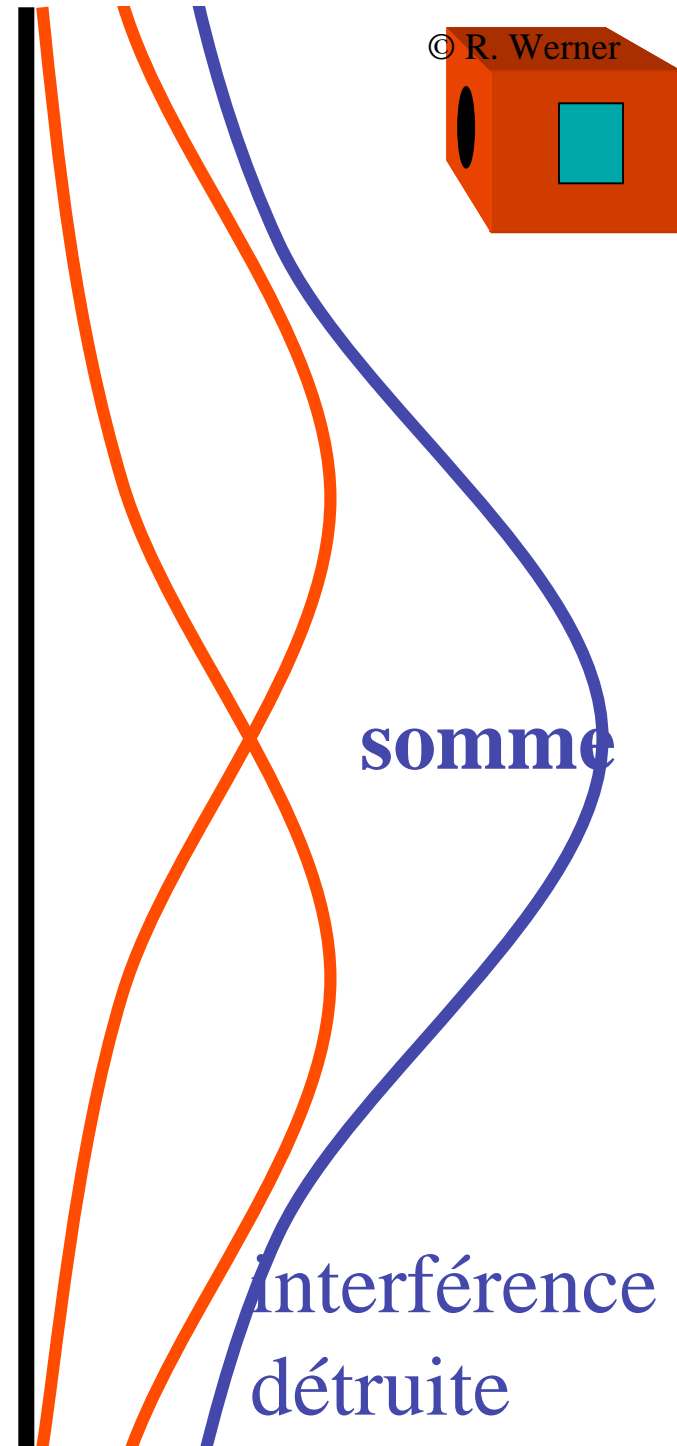
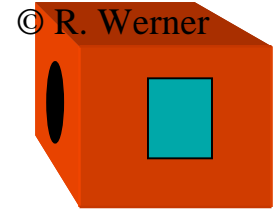


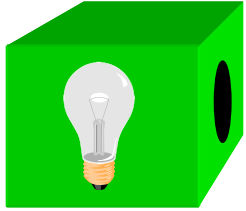
Distribution des
particules passées
par la fente du
bas



L'essai de suivre le
chemin de la
particle...

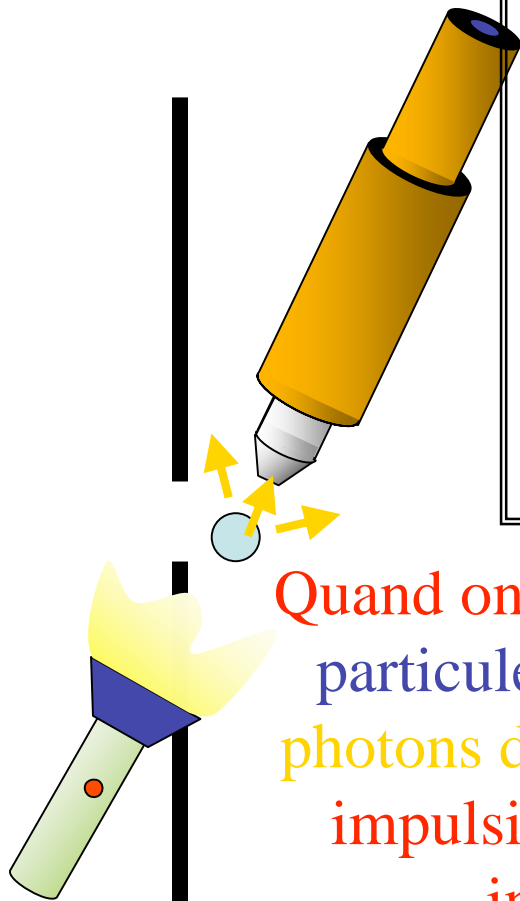
...modifie le
montage
expérimental (et donc
ce qui se passe)



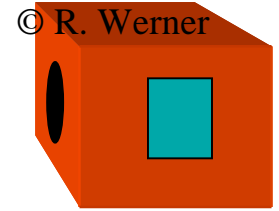


Peut-on regarder plus subtilement?

Même voir à travers un microscope influence la particule

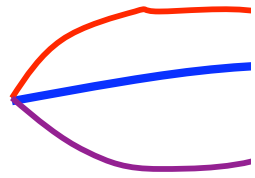


Quand on cherche à localiser la particule, on la perturbe (les photons diffusés modifient son impulsion) et on détruit les interférences...



*Complémentarité
(Bohr)*

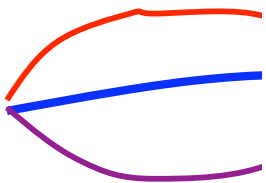
Superposition quantique ou incertitude statistique classique?



« et »

Si un **système quantique (S)** peut à partir d'un état initial suivre plusieurs chemins **sans que le dispositif expérimental ne permette en aucune façon de les distinguer**, il faut attribuer une **amplitude de probabilité complexe** à chaque chemin.

Ces amplitudes, suivant leurs phases, se renforcent ou se détruisent, donnant lieu à des **interférences** dans la probabilité de trouver (S) dans un état final donné: (S), avant sa détection, se trouve dans un état de **superposition**, 'suspendu' entre plusieurs réalités classiques.

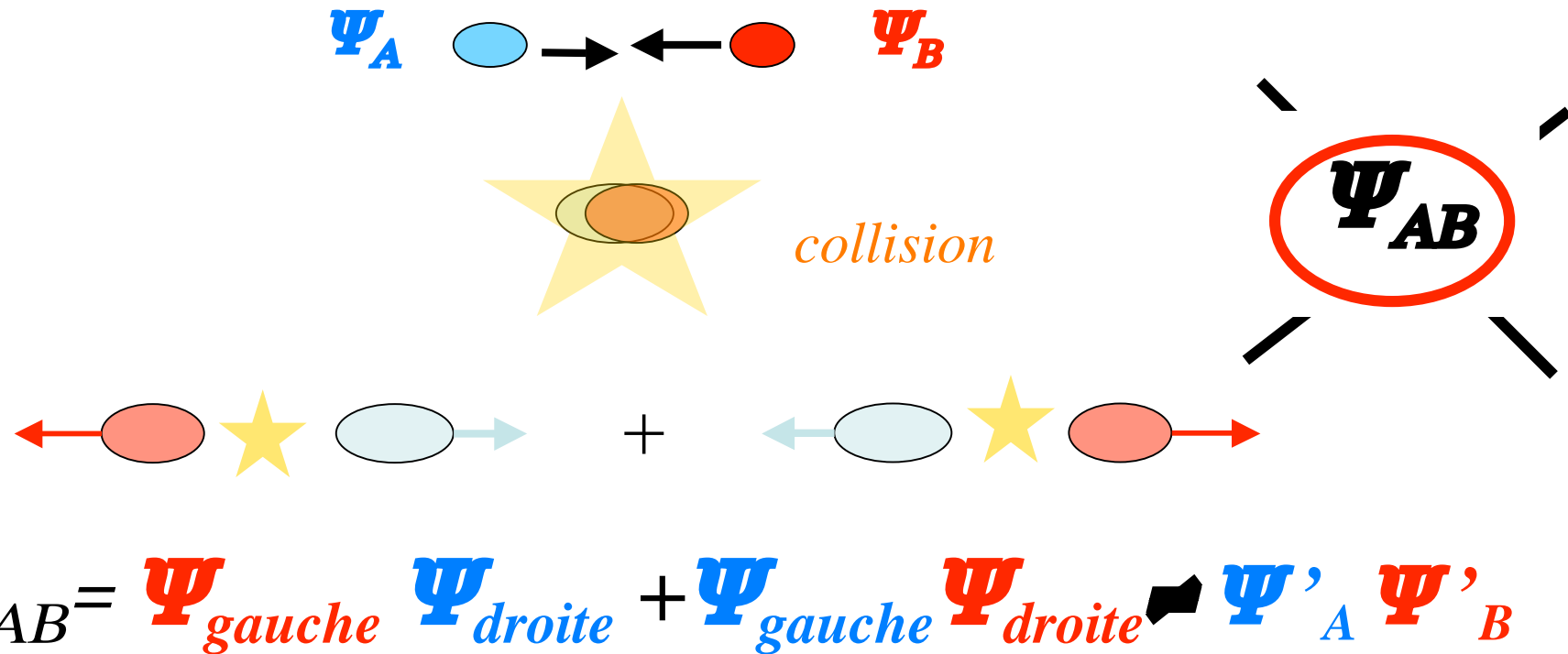


« ou »

Si le dispositif permet d'obtenir une **information sur le chemin**, les amplitudes n'interfèrent plus et l'incertitude sur le chemin suivi prend un caractère **statistique classique**: (S) suit chacun des chemins avec une certaine probabilité, carré du module de l'amplitude complexe correspondante.

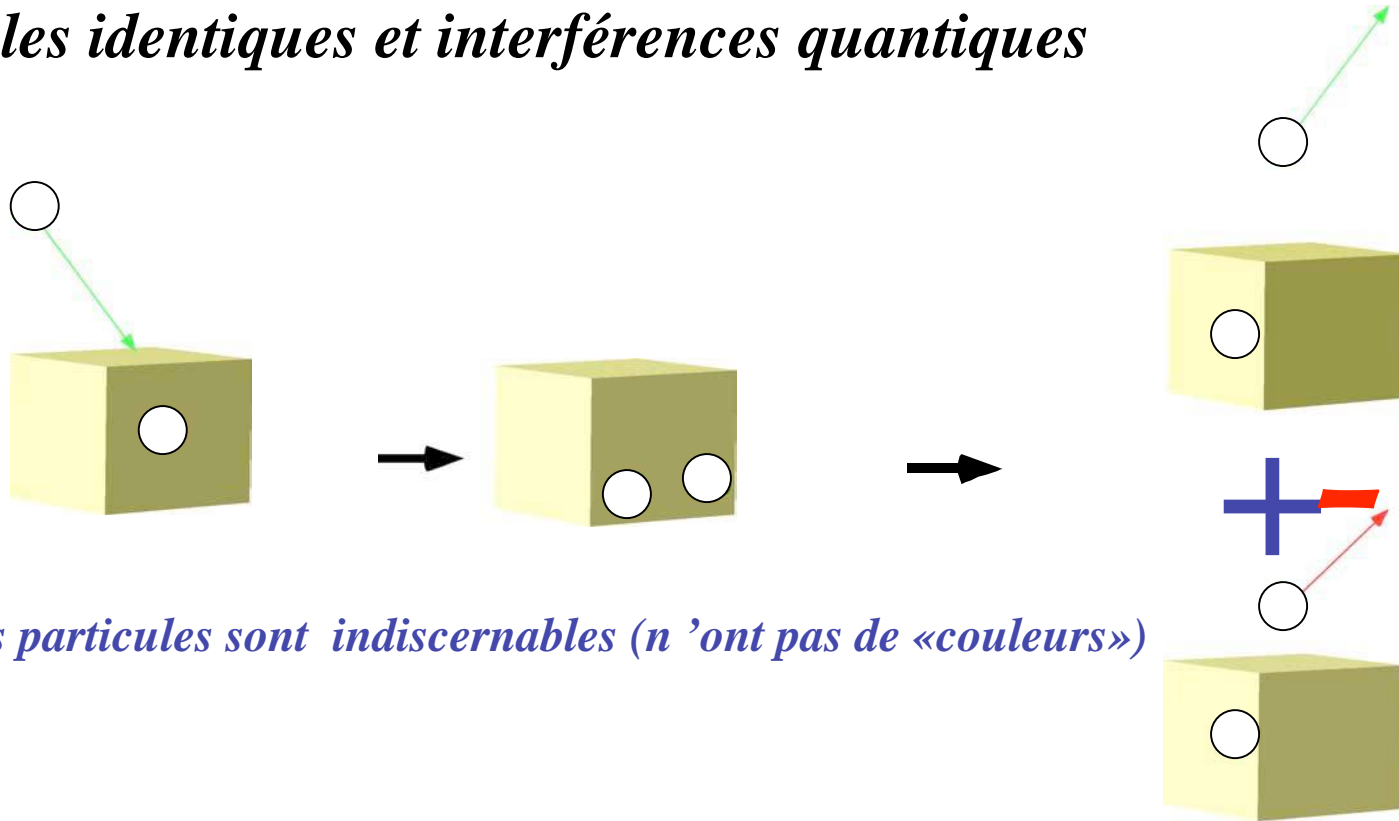
Voyons quelques conséquences du principe de superposition...

Superpositions et intrication quantique des systèmes composites



Après la collision, il y a une fonction d'onde Ψ_{AB} pour le système global, mais plus de fonctions individuelles: **intrication quantique**. La mesure de l'une des particules change la fonction d'onde globale et **détermine l'état de l'autre à distance: corrélations et non-localité** quantiques qui déplaisaient aussi à Einstein (**paradoxe EPR**)

Particules identiques et interférences quantiques



Attention: les particules sont indiscernables (n'ont pas de «couleurs»)

Fermions: les deux amplitudes s'annulent (signe -): impossible de mettre les deux particules dans le même état dans la boîte: **Principe d'exclusion de Pauli**

1923

Bosons: les amplitudes s'ajoutent (signe +): Les particules ont tendance à s'accumuler de façon « grégaire » dans la boîte **Statistique de Bose-Einstein**

1924

***Les fermions sont « individualistes » et s'évitent
(principe d'exclusion de Pauli).***

*C'est le cas de toutes les particules qui constituent la matière
(électrons, protons, neutrons...)*

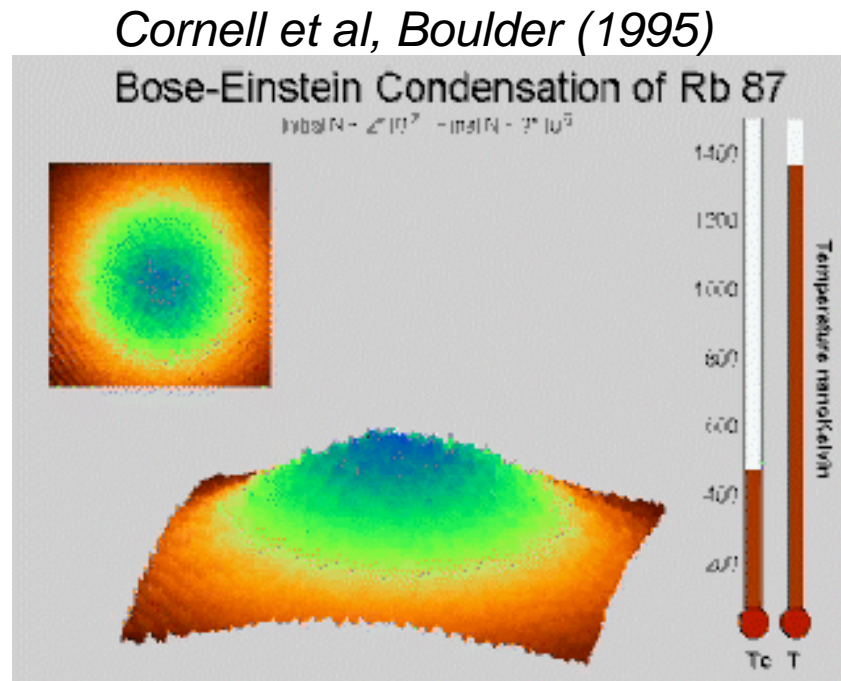
*Explique un grand nombre de propriétés « macroscopiques »
essentielles à notre existence (chimie, état solide, stabilité des noyaux
atomiques.....)*

***Les bosons sont « grégaires » et ont tendance à
s'accumuler dans le même état quantique***

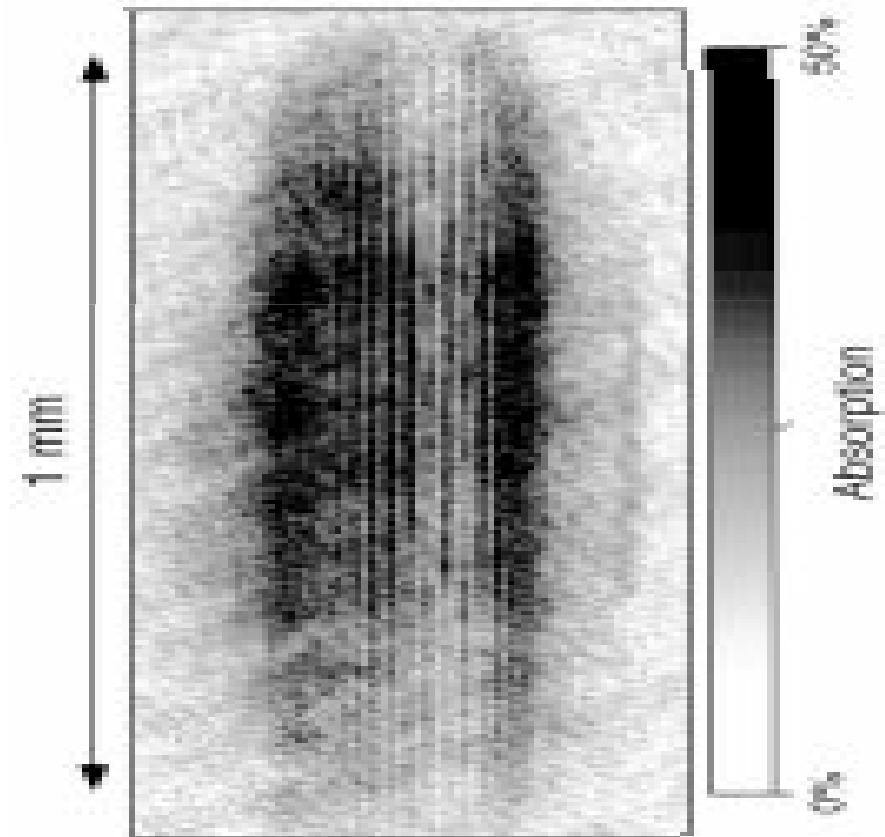
*C'est le cas de toutes les particules qui « véhiculent » les interactions
entre particules de matière (photons...)*

*Explique les propriétés de la lumière et des faisceaux lasers constitués
de photons...*

Des atomes constitués d'un nombre pair de fermions sont des bosons composites qui se condensent à très basse température dans un état quantique contenant un nombre macroscopique de particules (découvert en 1995): les objets les plus froids de la Nature (10^{-9} K)!



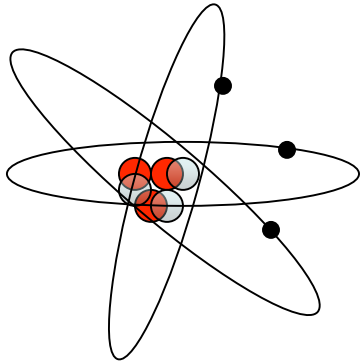
Atomes de Rubidium ultrafroids dans un piège magnétique: refroidissement évaporatif



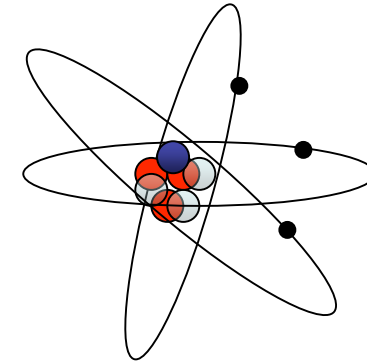
Ketterle et al, MIT

Les condensats sont des ondes de matière géantes qui interfèrent...

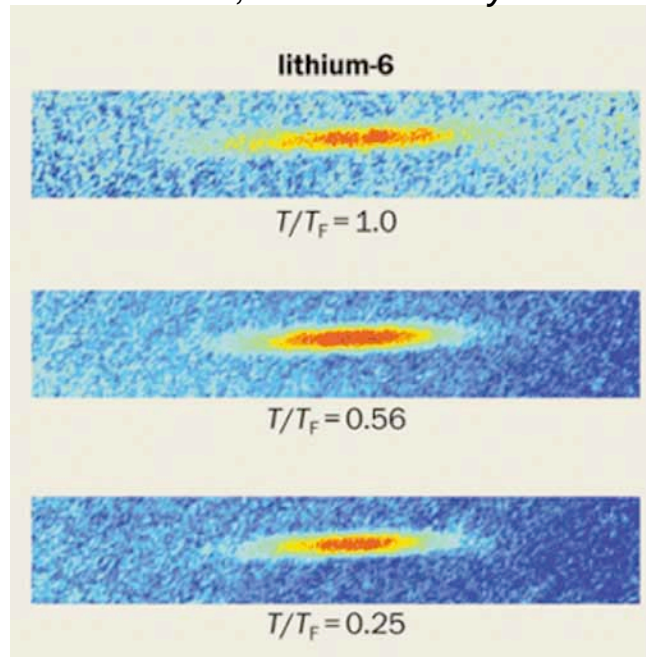
Observation directe des statistiques quantiques



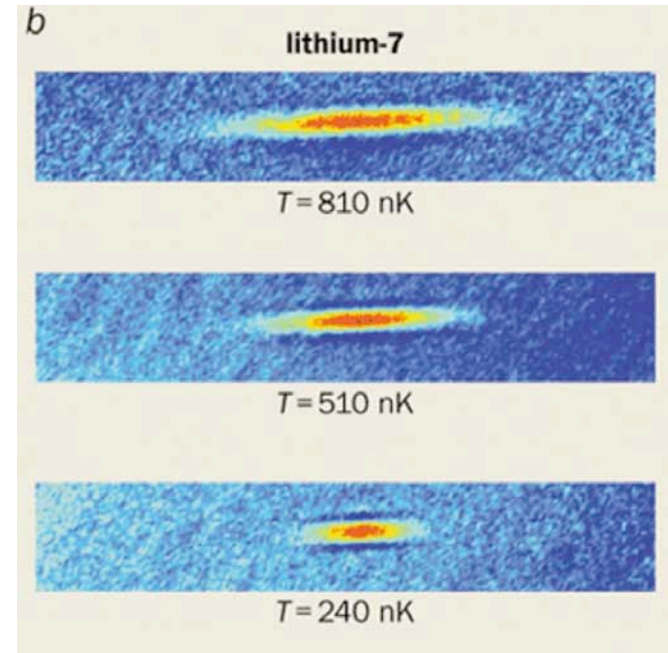
Ajout d'un neutron



R.Hulet, Rice University

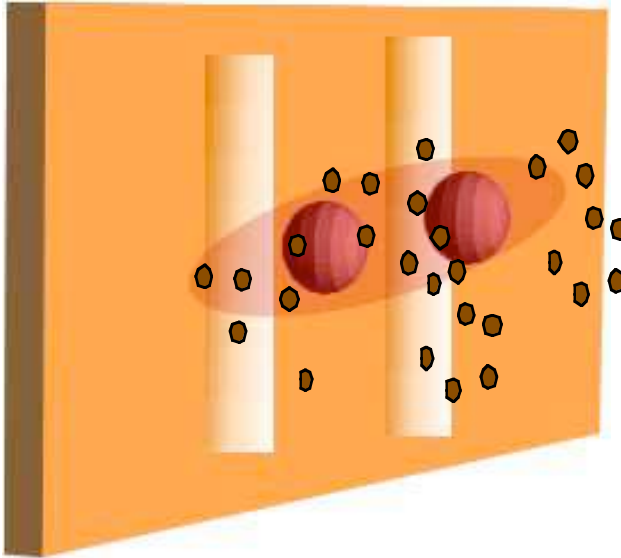


Fermions
(9 particules)

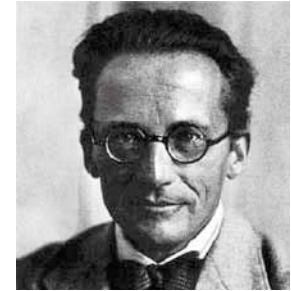


Bosons
(9+1=10 particules)

Pourquoi pas de superpositions d'objets macroscopiques?



Le paradoxe du Chat de Schrödinger



L'environment (molécules, photons thermiques..) s'intrique avec le système et détruit les superpositions quantiques



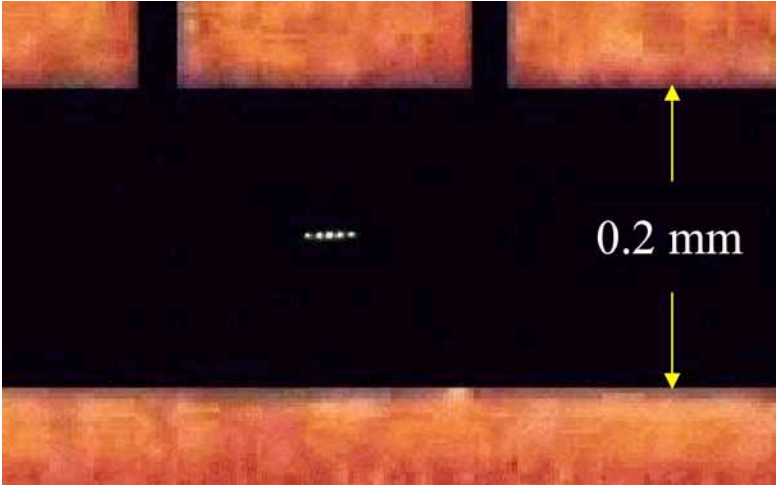
(analogue à l'observation du chemin de la particule dans un interféromètre)

Décohérence d'autant plus rapide que le système est plus gros

On cherche maintenant à combattre la décohérence et à observer directement l'étrangeté quantique dans des systèmes artificiels constitués d'un nombre croissant de particules...

Voir des atomes isolés et piégés

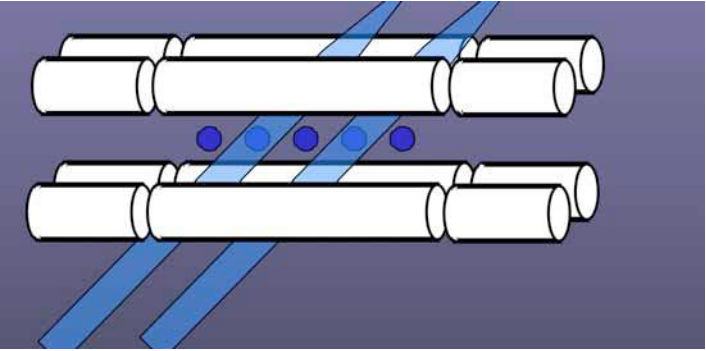
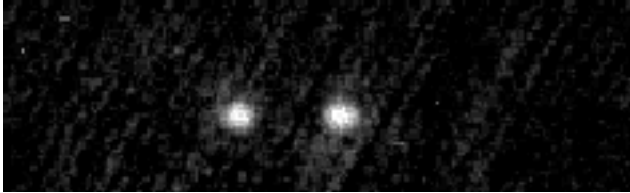
D. Wineland et al, Boulder



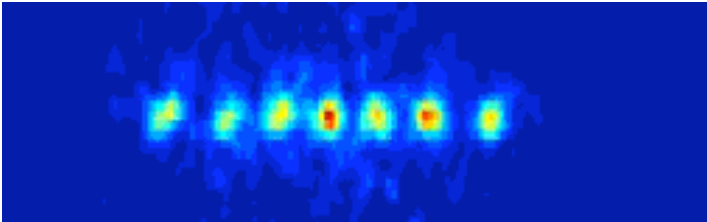
1 atome



2 atomes



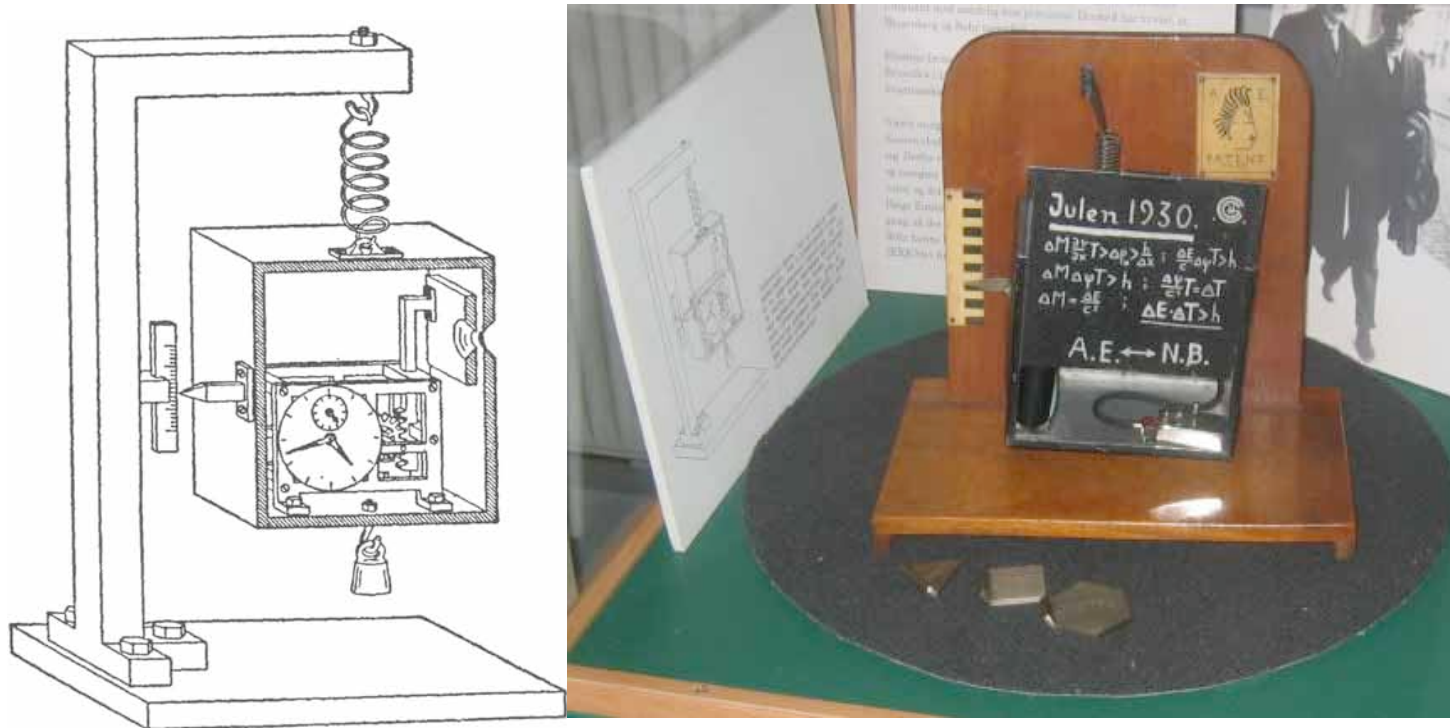
7 atomes



R. Blatt et al, Innsbruck

La dualité quantique: les particules matérielles sont des ondes.....et les ondes lumineuses sont des particules....

Du dessin de Bohr... ..au modèle de Gamow



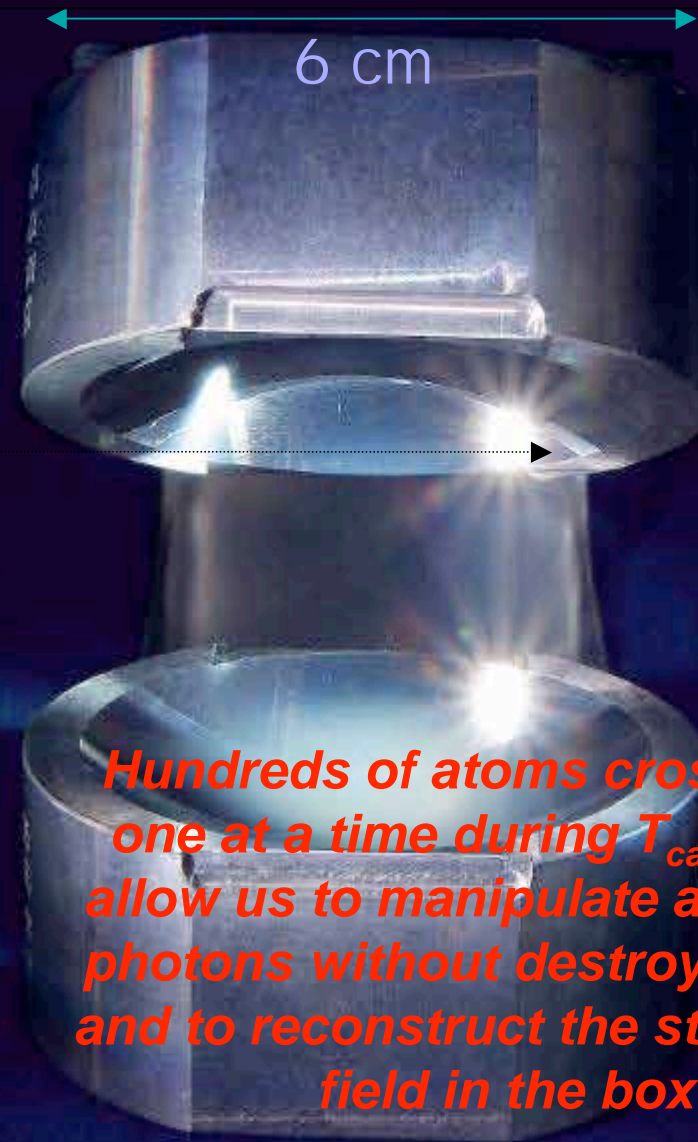
La boîte à photon d'Einstein et Bohr pour piéger un quantum de lumière et observer l'instant où il s'échappe.....

L'échappement du photon obéit-il à la relation d'incertitude « temps-énergie » de Heisenberg?

Seeing microwave photons in a box

- Superconducting mirrors
- Resonance @ $\nu_{\text{cav}} = 51 \text{ GHz}$
- Lifetime of photons
 $T_{\text{cav}} = 130 \text{ millisecond}$

- best mirrors ever
- 1.5 billion photon bounces
- Light travels 40 000 km
(Earth circumference)

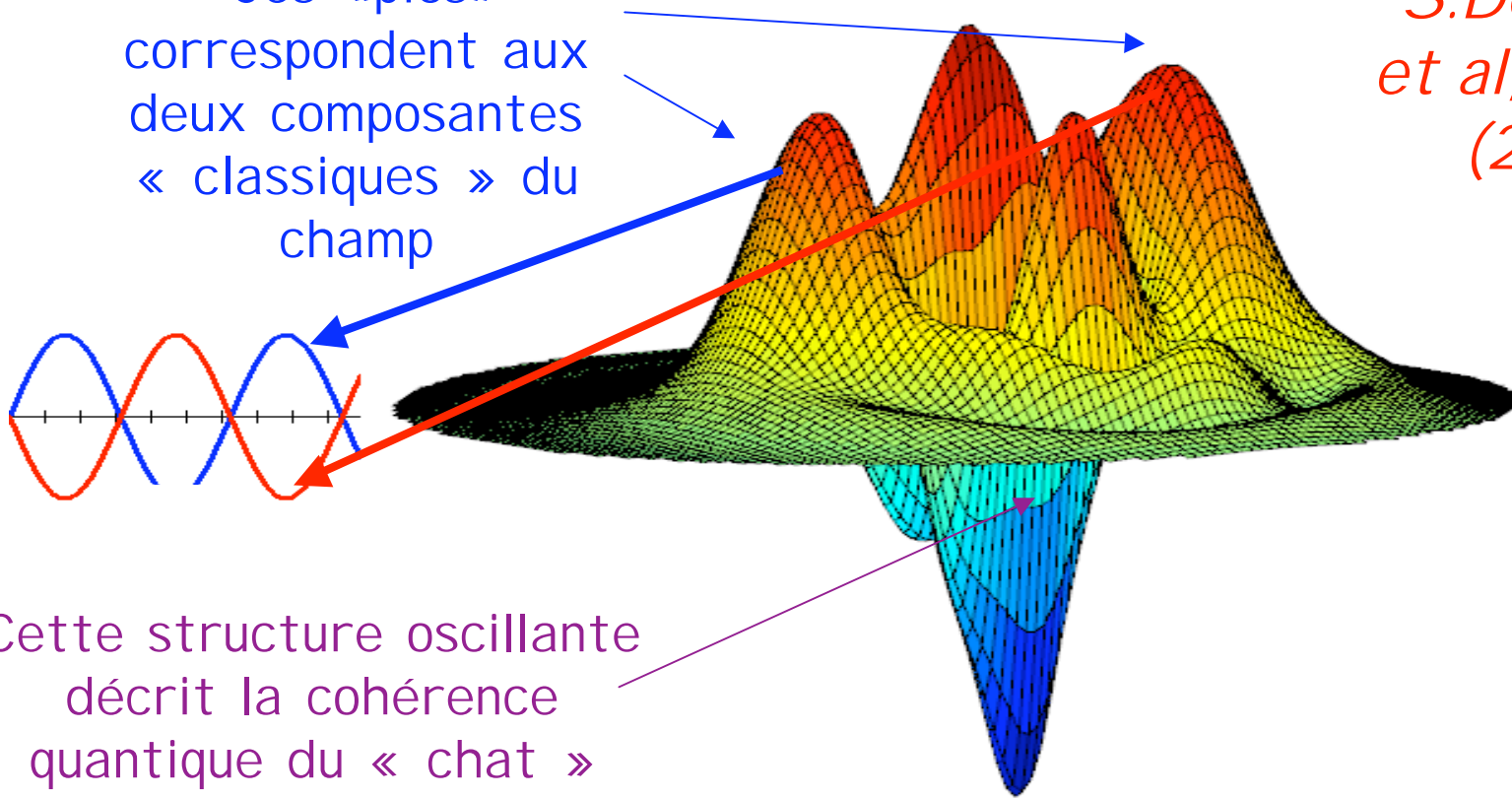


Hundreds of atoms cross cavity one at a time during T_{cav} . They allow us to manipulate and count photons without destroying them and to reconstruct the state of the field in the box

Fonction d'onde reconstruite d'un chat de Schrödinger photonique contenant quelques photons et préparé par un atome unique dans une superposition de deux champs oscillant avec des phases opposées

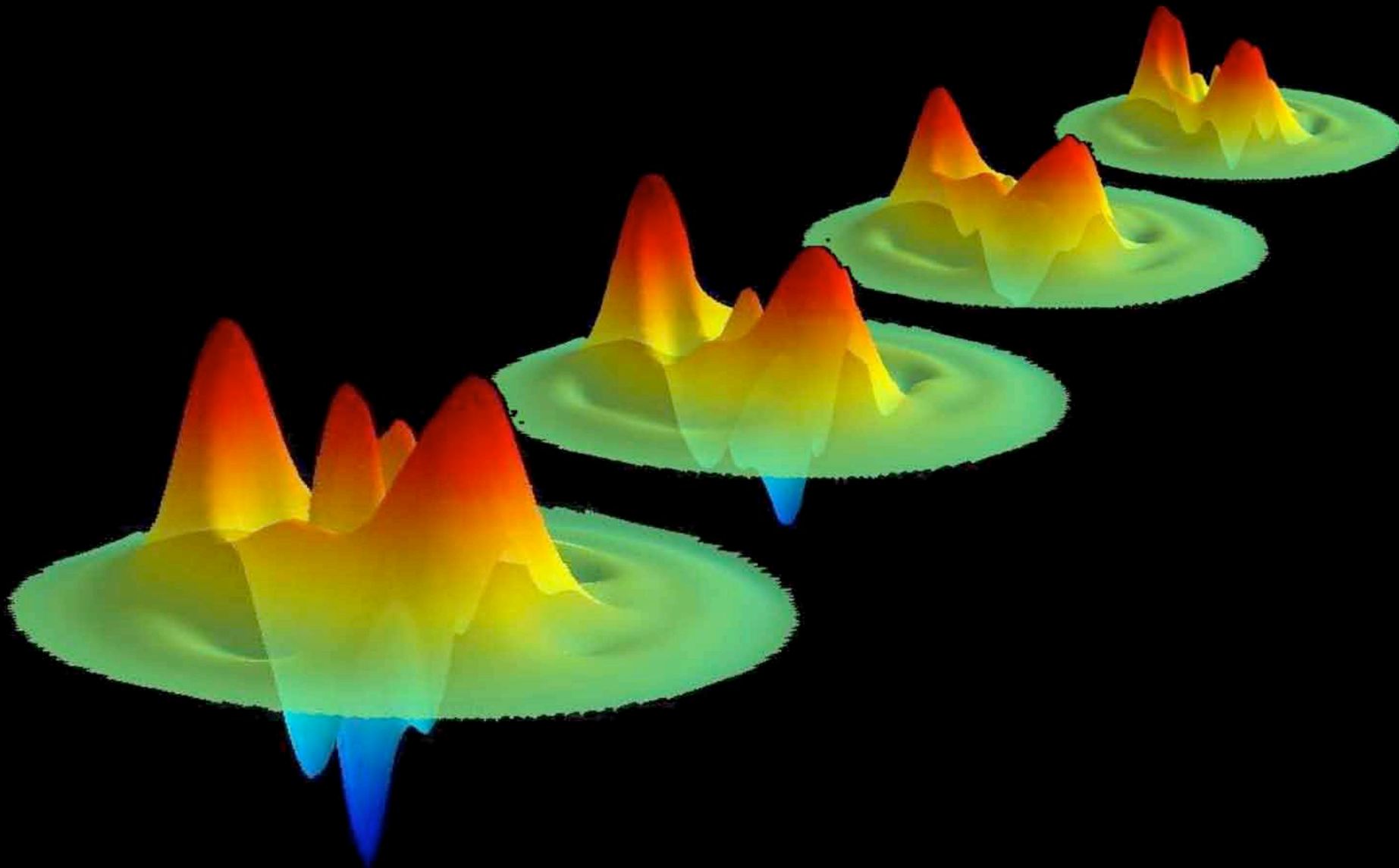
Ces «pics» correspondent aux deux composantes « classiques » du champ

S. Deléglise et al, Nature (2008)

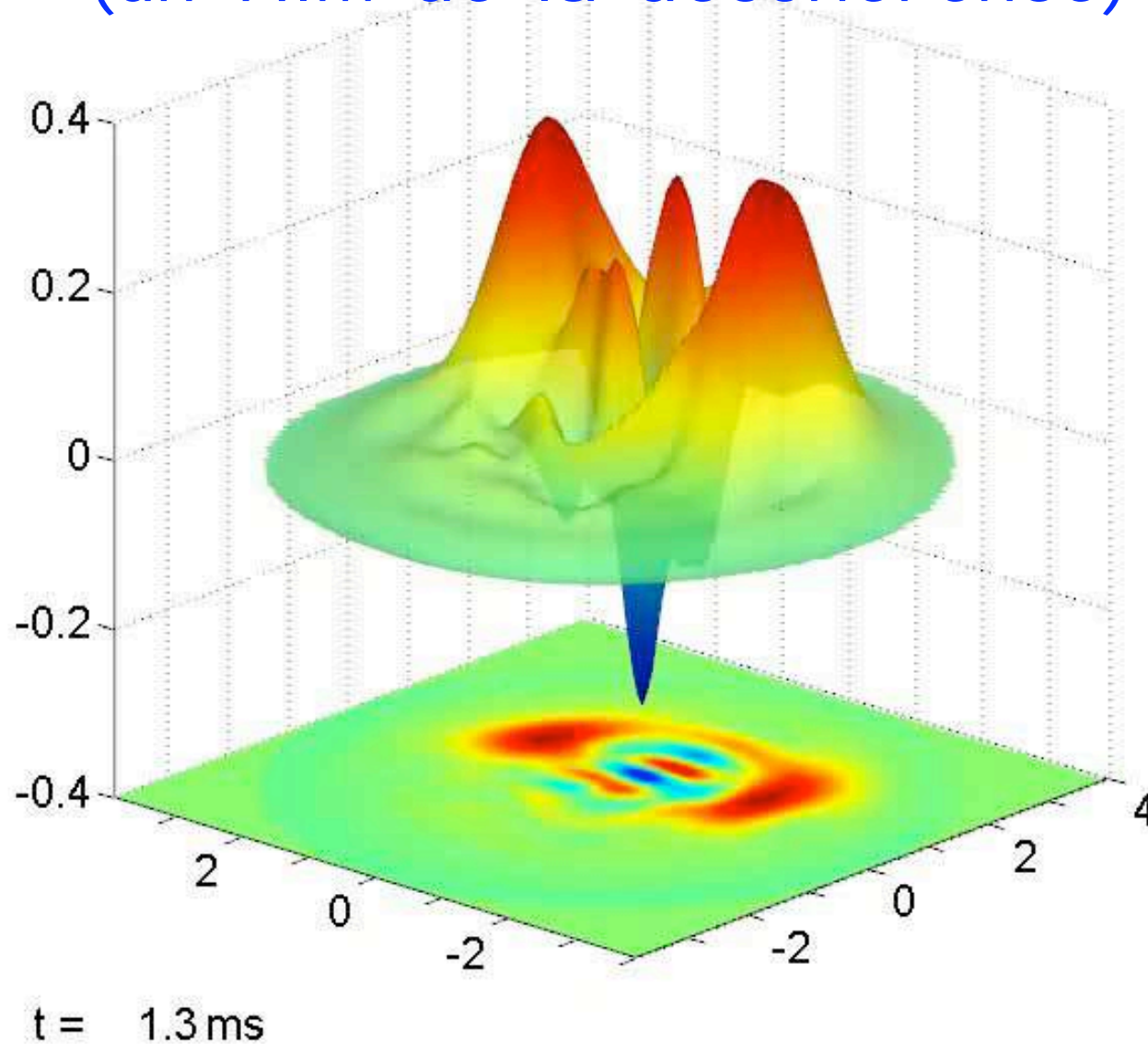


Cette structure oscillante décrit la cohérence quantique du « chat » (effets d'interférences quantiques)

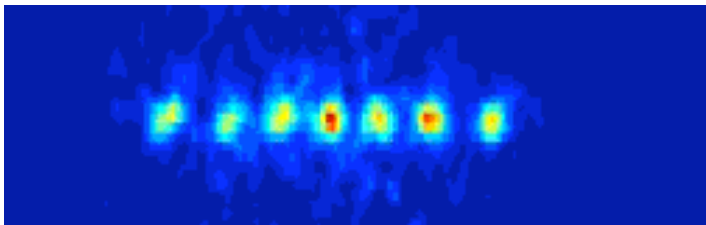
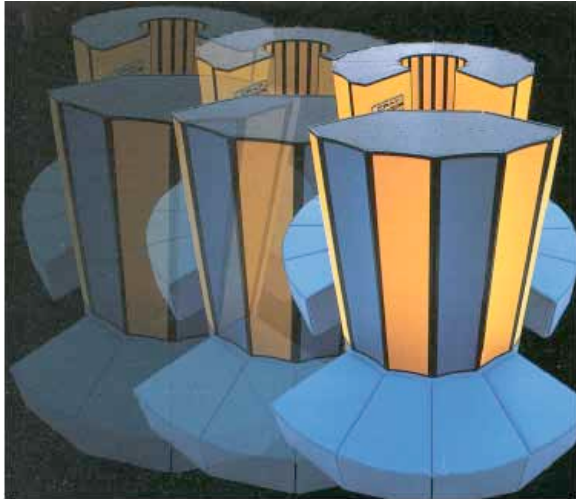
A JOURNEY FROM QUANTUM TO CLASSICAL



Cinquante millisecondes dans la vie d'un
chat de Schrödinger
(un film de la décohérence)



Exploiter les superpositions et l'intrication quantique pour calculer et communiquer?



Ordinateur calculant « en parallèle », en superposant un grand nombre de systèmes à deux niveaux (qubits) intriqués

Algorithmes quantiques beaucoup plus rapides qu'en info. classique (factorisation)

Recherche expérimentale très active sur des systèmes de quelques atomes et photons, avec démonstrations d'opérations logiques élémentaires....

La réalisation d'ordinateurs quantiques macroscopiques se heurte au problème de la décohérence et reste largement utopique

*Une application plus simple déjà réalisée: la **cryptographie quantique**.*

Partage de clés aléatoires (suites de 0 et de 1) identiques entre deux partenaires basé, par exemple, sur l'intrication. Impossibilité absolue pour un espion de «briser» ce code secret sans révéler sa présence.

Quel avenir pour cette physique?

La communication quantique (cryptographie) qui ne requiert «que» la manipulation de 1 ou 2 bits à la fois est déjà réalisée...

Le rêve de l'ordinateur quantique (maîtriser la décohérence et manipuler de façon déterministe des milliers de bits quantiques individuellement adressables) stimule des recherches passionnantes sur la complexité quantique (nature de l'intrication, non localité, frontière classique-quantique)... S'il voit le jour l'ordinateur quantique sera capable de briser les codes RSA actuels basés sur la difficulté de factorisation des grands nombres...et rendra indispensable l'utilisation de la cryptographie quantique!

Ce rêve pose un défi redoutable aux expérimentateurs....Pour l'instant, on ne sait manipuler ainsi que quelques qubits. Recherches actives sur les atomes, les photons, les systèmes mésoscopiques en physique des solides...

La simulation avec des ions piégés ou des atomes froids de situations de physique des solides est plus réaliste à court terme et peut conduire à une physique fascinante: découverte de nouvelles phases quantiques par exemple.

«Il est très difficile de faire des prédictions, surtout si elles concernent l'avenir» (attribué à Niels Bohr)