



Physique quantique

J.M. Raimond

Université Pierre et Marie Curie

Institut Universitaire de France

Laboratoire Kastler Brossel

Département de Physique

Ecole Normale Supérieure





Le XX^{ème} siècle fut celui de la mécanique quantique

- L 'exploration du monde microscopique a été la grande aventure scientifique du siècle dernier. La théorie quantique nous a donné les clés de ce monde...
- La théorie physique avec le plus vaste champ d'applications
- La théorie physique la plus précise et la mieux vérifiée
- Et cependant une description du monde microscopique contraire à l'intuition et au « bon sens »:
 - Les portes sont ouvertes ET fermées
 - Les chats sont morts ET vivants
 - la mécanique quantique continue à nous surprendre après près d'un siècle

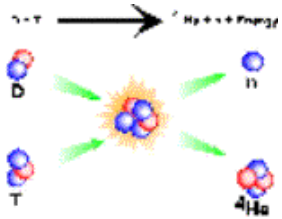


La mécanique quantique aujourd'hui

Énorme champ d'applications à toutes les échelles

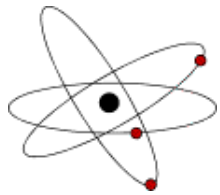


10^{-35} m

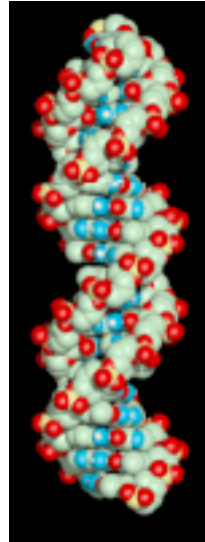


10^{-15} m

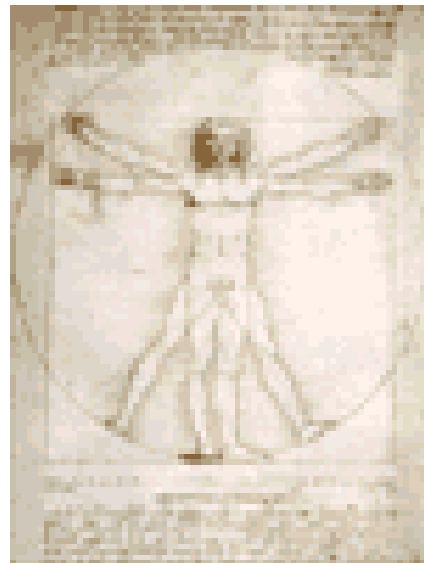
(noyaux, radioactivité
Énergie nucléaire)



10^{-10} m
(atomes)



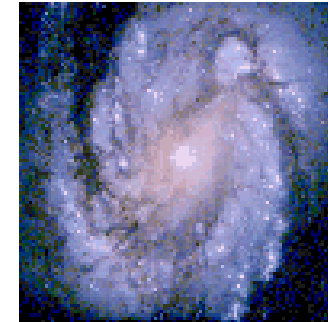
10^{-8} m
(molécules
biologiques)



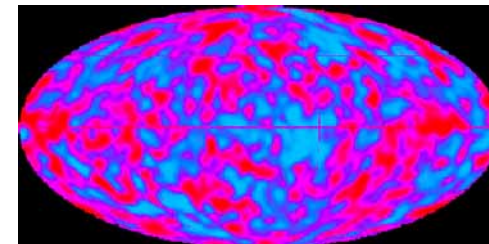
10^{-3} m -
 10^6 m
(monde
macro-
scopique)



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



10^{+20} m (galaxies)



Univers

10^{+26} m



Quelques caractéristiques de la physique quantique:

- Sa précision:



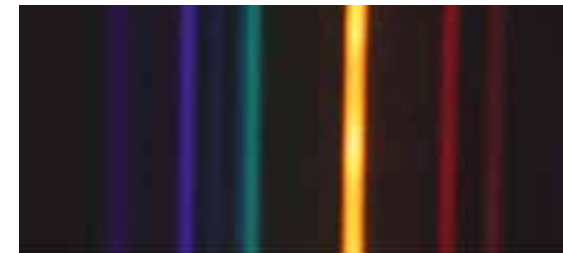
$$g = 1,001\,159\,652\,188 \dots (q \hbar / m).$$

- Son unité:

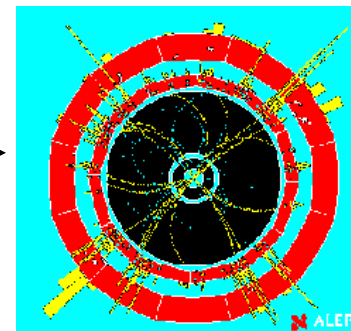
Unification des forces de la Nature (la gravité résiste!)

- Son universalité

Tous les atomes sont identiques



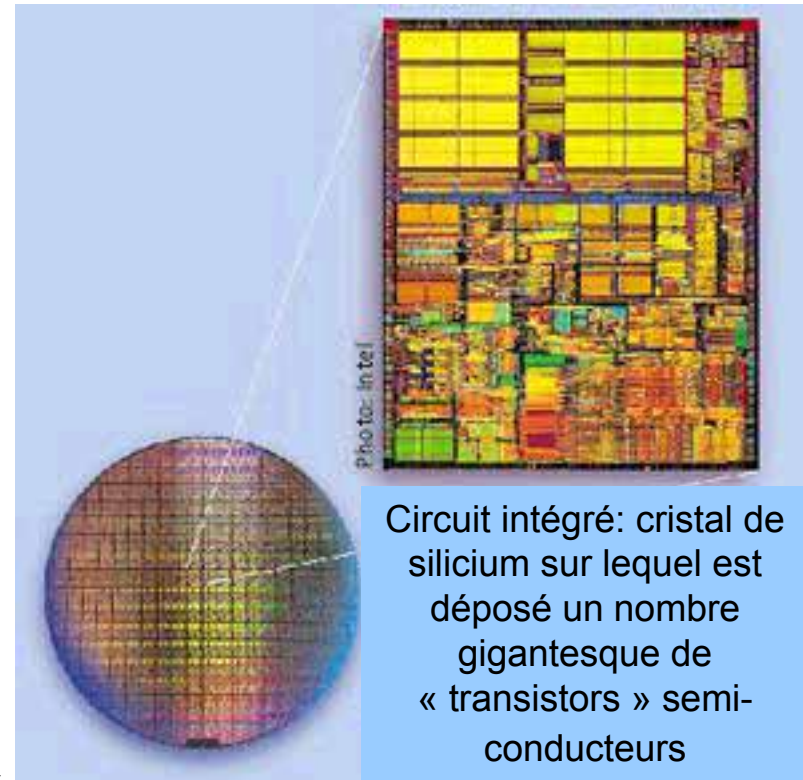
- Relations entre infiniment petit et grand



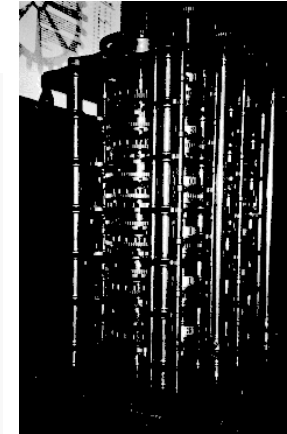
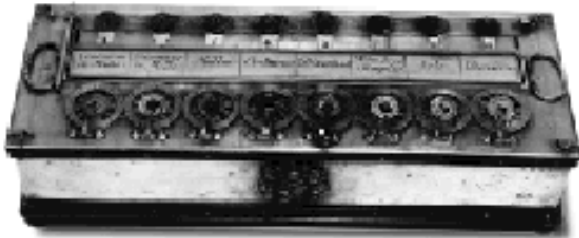
Des applications dans notre vie de tous les jours



L'ordinateur moderne est un résultat de l'industrie du « transistor intégré »



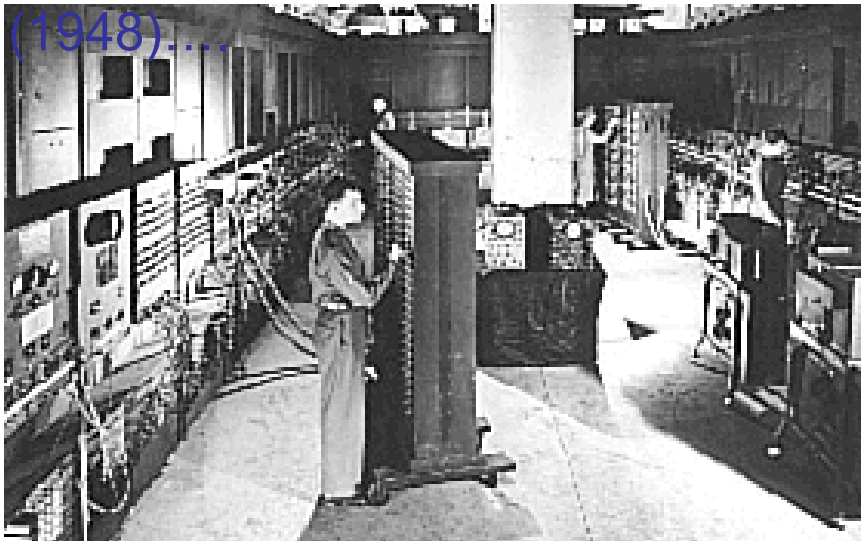
La technologie « classique » a conduit....



....de la machine mécanique de Pascal (1650)....à celle de Babbage (1840)...

..et au gigantesque calculateur électrique à lampes ENIAC

(1948)....



Léon Brillouin

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



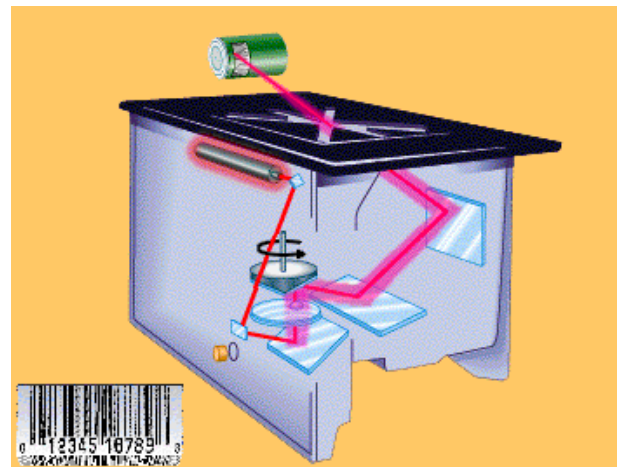
Le principe
remonte aux
travaux
d'Einstein(1917)...



Lasers



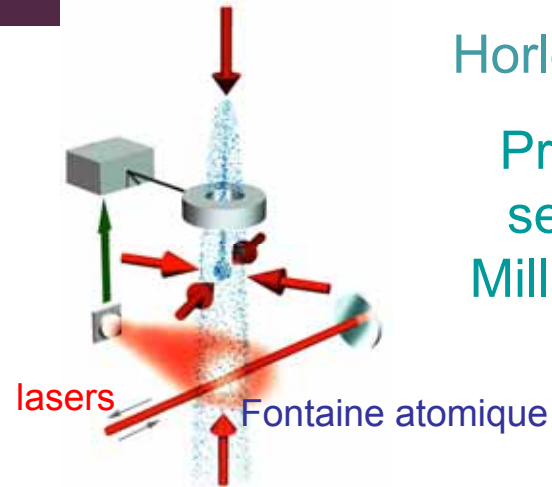
...très nombreuses applications...



La mesure du temps, basée sur des principes quantiques...

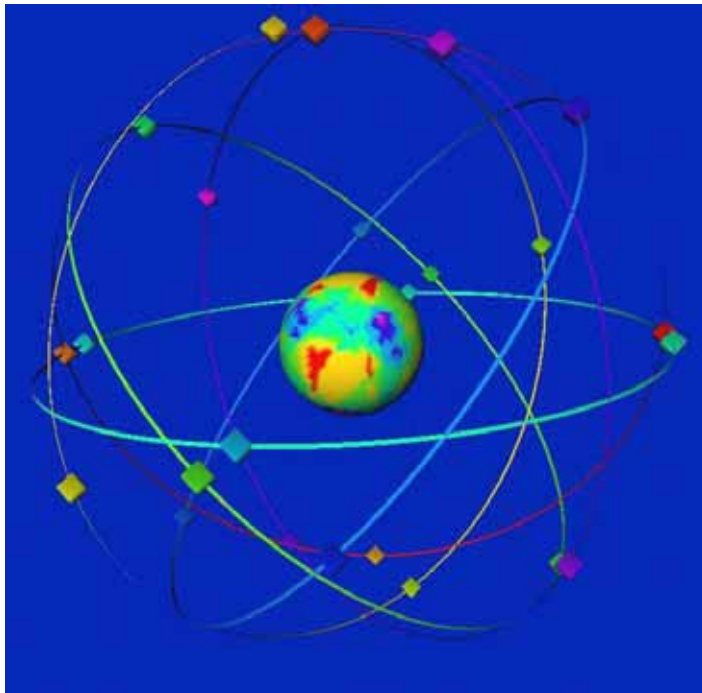
Horloges atomiques

Précision d'une
seconde sur 10
Millions d'années!



..conduit à des applications
pratiques importantes

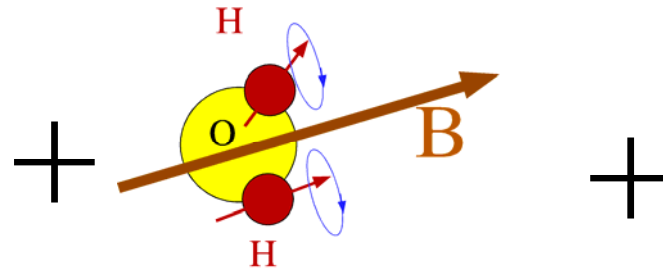
GPS!



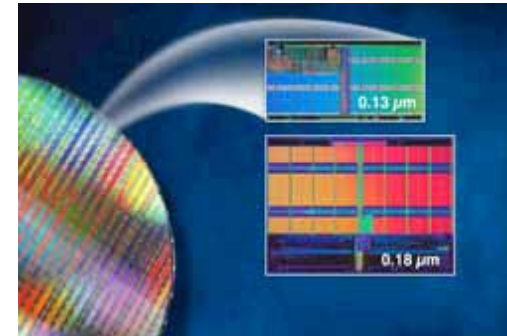
L'IRM est la combinaison de trois technologies à base quantique:



Aimants supraconducteurs



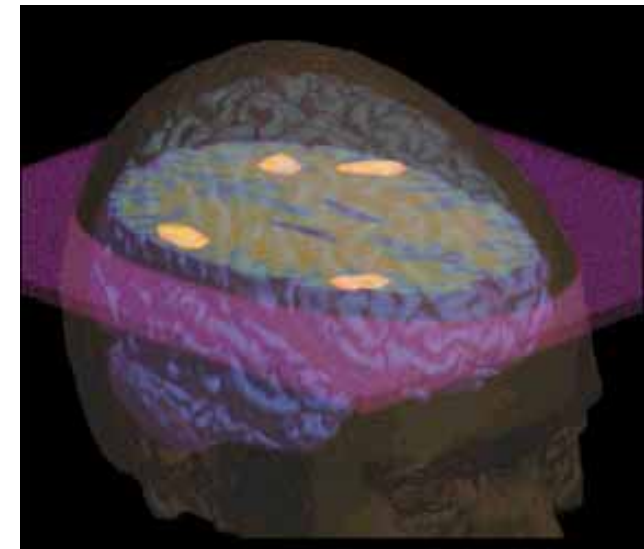
Résonance magnétique
des protons



Circuits intégrés



Imagerie par
résonance
magnétique
(IRM)





Un peu d'histoire des sciences

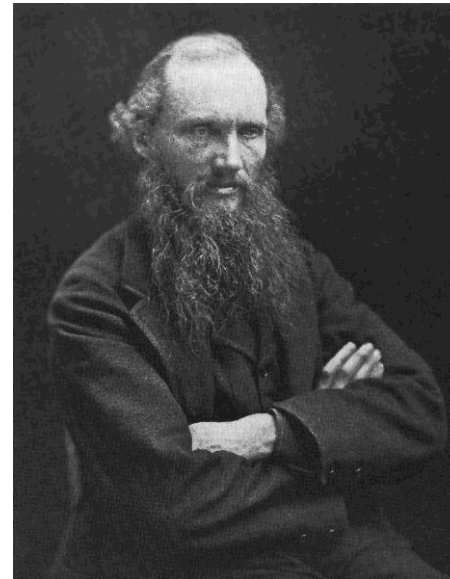
Il y a cent ans l'existence des atomes était controversée....



Marcellin
Berthelot n'y
croyait pas....



Boltzmann,
fondateur de la
thermodynamique
statistique était un
atomiste convaincu

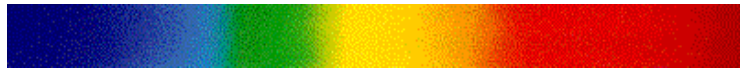


Lord Kelvin
et les « deux
petits
nuages »
dans le ciel
de la
physique de
1900

Les nuages sur la physique classique

Rayonnement du corps noir

Les corps chauffés émettent du rayonnement

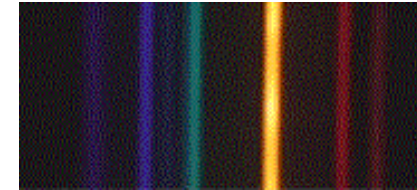


Impossible de prédire les propriétés de ce rayonnement par la thermodynamique classique

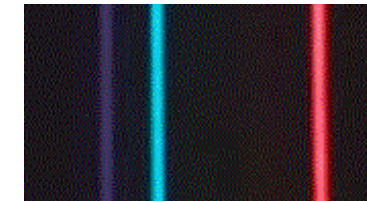
Spectres atomiques

Les atomes émettent et absorbent des « couleurs » bien déterminées

Hélium



Hydrogène



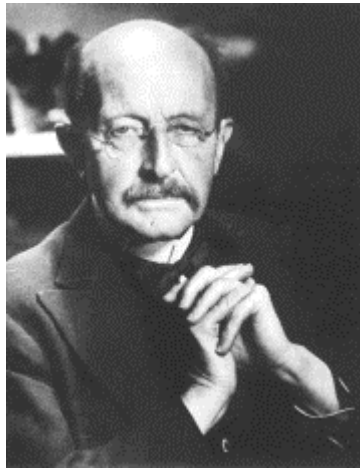
Des lois numériques simples pour les fréquences (Balmer 1885)

Aucun modèle classique convaincant !

Mécanique quantique: l'aube (1900-1905)

Planck (décembre 1900)

unité indivisible,
dans les échanges
d'énergie
matière-rayonnement



Einstein (1905):

quanta lumineux
(photons 1922)



"Quantifie" ces échanges

$$E = Nh\nu$$

- N: entier
- h: constante de Planck
($6.62 \cdot 10^{-34}$ Js)
- ν : fréquence

Donne le bon spectre pour le
rayonnement noir ! Accord très précis

Explique l'effet photoélectrique (la lumière
arrache des électrons à un métal)

La même année: relativité restreinte !!

Les modèles atomiques (1913-1925)

Les succès



Bohr 1913

Introduction "ad hoc"
de la constante de
Planck dans un modèle
planétaire

Prédictions correctes et précises pour le
spectre de l'hydrogène

Les doutes

Application à d'autres atomes
Hélium (deux électrons)

Échec total

Est-ce la fin?

La révolution quantique (1927)

Heisenberg



Mécanique
des matrices

Succès immédiat pour l'hydrogène.
Donne un cadre plus général pour traiter
des problèmes complexes

Schrödinger



Une équation
d'onde

Succès immédiat pour l'hydrogène
Donne aussi un cadre général

Lequel a raison ? Débat animé...

On s'aperçoit très vite que les deux formalismes sont équivalents

Il existe une seule mécanique quantique

Il reste à la comprendre et à l'utiliser

La maturité (1927-1930)

Progrès très rapides dans l'utilisation de la nouvelle mécanique

Dirac: formalisme élégant

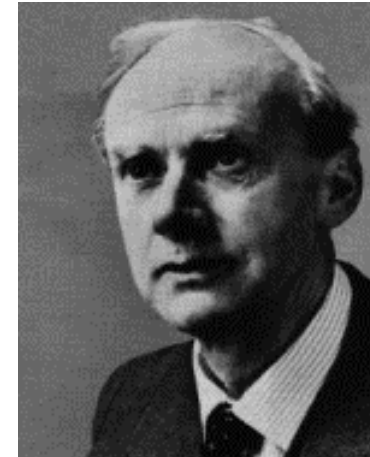
Mariage avec la relativité restreinte

Structures atomiques, physique du solide,
physique des particules

Mise au point d'une interprétation du formalisme

Utilisation "d'expériences de pensée"

Interprétation de Copenhague.





Les étrangetés du monde quantique



Un monde microscopique qui défie l'intuition

- Superpositions quantiques
- Intrication
- Limite monde quantique/monde macroscopique

Après 80 ans, la mécanique quantique est parfaitement acceptée mais conserve intact son pouvoir de fascination

État quantique

Notation de Dirac (ket)

$$|\Psi\rangle$$

– Contient toute l'information sur le système

- Une particule localisée en x $|x\rangle$

- Une particule localisée en y $|y\rangle$

La mécanique quantique est linéaire. Toute somme d'états est aussi un état

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

est un état possible

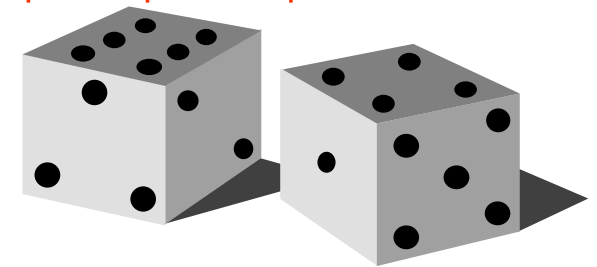
Une particule en deux endroits *à la fois* ???

Commode, mais choquant....

- Etat $\frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle + |y\rangle)$
 - On mesure la position.
 - Deux résultats possibles x ou y
 - Se manifestent de façon aléatoire avec des probabilités égales
 - Un cas sur deux, on trouve x , un cas sur deux y

- « Pile ou face » fondamental.
 - Rien ne permet de prédire le résultat d'une expérience quantique unique!

 - Renoncement au déterminisme classique
 - Einstein « Dieu joue aux dés »
 - Bohr – « arrête de dire à Dieu ce qu'il doit faire »



Superposition quantique et mesure

- Etat après la mesure

- $|x\rangle$

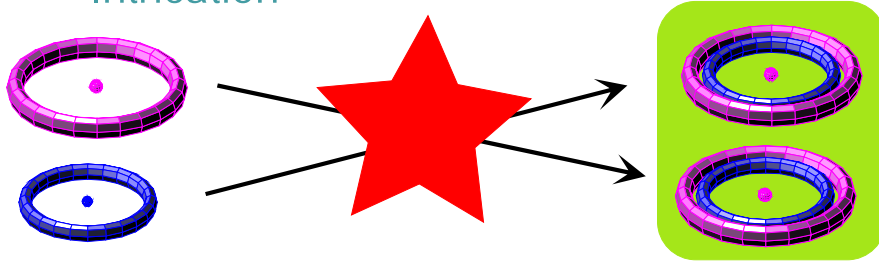
- Ou

- $|y\rangle$

- Une seconde mesure donne le même résultat que la première
- La mesure modifie fondamentalement et irréversiblement l'état quantique.
- Une notion nouvelle par rapport à la physique classique

Intrication: une situation étrange

Intrication



Deux systèmes quantiques sont, après interaction, dans un état qui les décrit de façon globale.

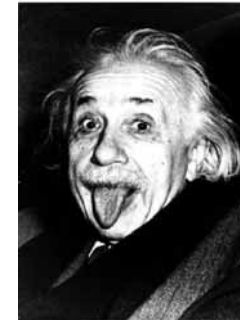
Pas d'état individuel de chaque système

Systèmes isolés: intrication indépendante de la distance.

« Paradoxe » EPR

Einstein Podolsy Rosen

Etat d'un système déterminé par la nature et le résultat d'une mesure sur l'autre à distance



Einstein n'aimait pas ça du tout...

Bell: tests expérimentaux possibles de la physique quantique contre la localité

Aspect (1982):

La mécanique quantique a raison.

Le bon sens a tort.

Les limites du monde quantique

Superpositions macroscopiques

Pas de superpositions à notre échelle



Pourquoi n'observe-t-on qu'une toute petite partie des états possibles?

Décohérence

Un objet macroscopique est couplé à son environnement.

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\text{cat}\rangle + |\text{no cat}\rangle) \Leftrightarrow \text{Environment}$$

Cet environnement « l'observe » en permanence.

Les superpositions quantiques macroscopiques sont rapidement détruites !

Si rapidement qu'on ne peut jamais les « voir ».

- Un phénomène extraordinairement efficace
 - D'autant plus rapide que les états superposés sont différents.
 - Horriblement rapide pour les vrais objets macroscopiques
 - Une frontière presque infranchissable qui isole le monde macroscopique des "monstres quantiques"
 - Essentielle pour comprendre pourquoi le monde classique est classique
 - Un formidable obstacle à l'utilisation de la superposition quantique à grande échelle



Des expériences sur le monde quantique



Manipuler des systèmes quantiques isolés

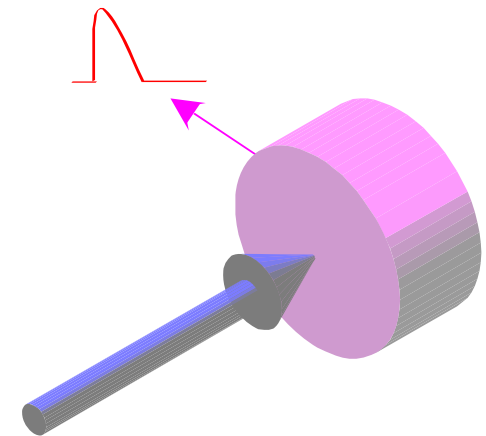
- Un intérêt renouvelé pour la physique quantique fondamentale
 - Expériences sur des systèmes quantiques uniques dans un environnement bien contrôlé
 - atomes, ions, photons, circuits supraconducteurs, oscillateurs mécaniques
 - Réalisation des expériences de pensée des pères fondateurs
 - boîtes à photons, chats de Schrödinger...
 - Une nouvelle lumière sur les phénomènes quantiques fondamentaux
 - une meilleure compréhension du quantique et en particulier de
 - la mesure quantique



« Peser » les photons ?

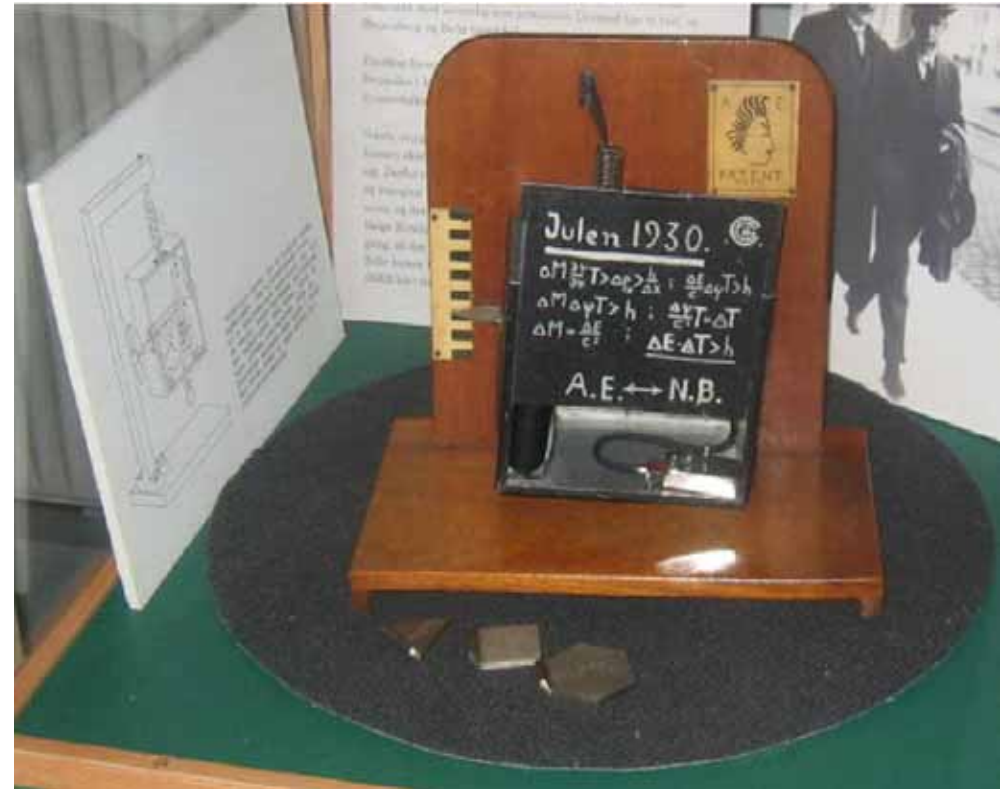
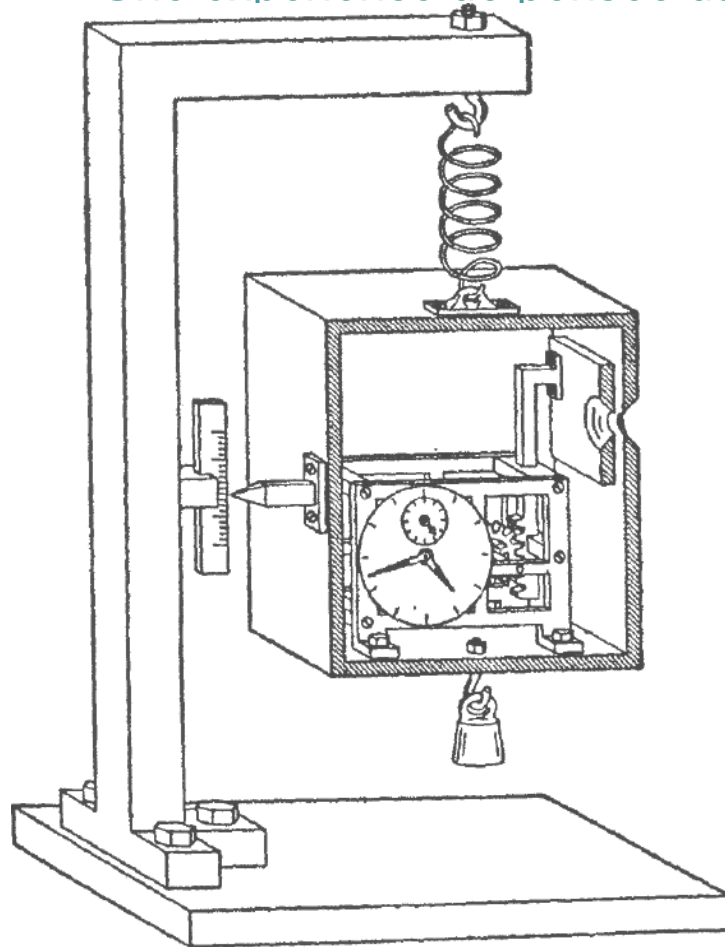
- Mesure quantique idéale du nombre de photons
 - Un résultat quantifié (un entier !)
 - Un résultat aléatoire (Dieu joue aux dés)
 - Un résultat répétable:
 - Une seconde mesure donne le même résultat que la première
 - Simple, mais la détection de photons est souvent loin de cette idéalité.

- La plupart des mesures sont loin d'être idéales
 - Photodétection
 - mesure de l'énergie du champ
 - quantification: nombre de photons
 - probabilités: statistique de photons
 - répétabilité?
 - Photodétecteurs absorbent les photons
 - Seconde détection donne toujours zéro
 - » on ne peut voir deux fois le même photon !
- Cette démolition n'est pas exigée par la mécanique quantique

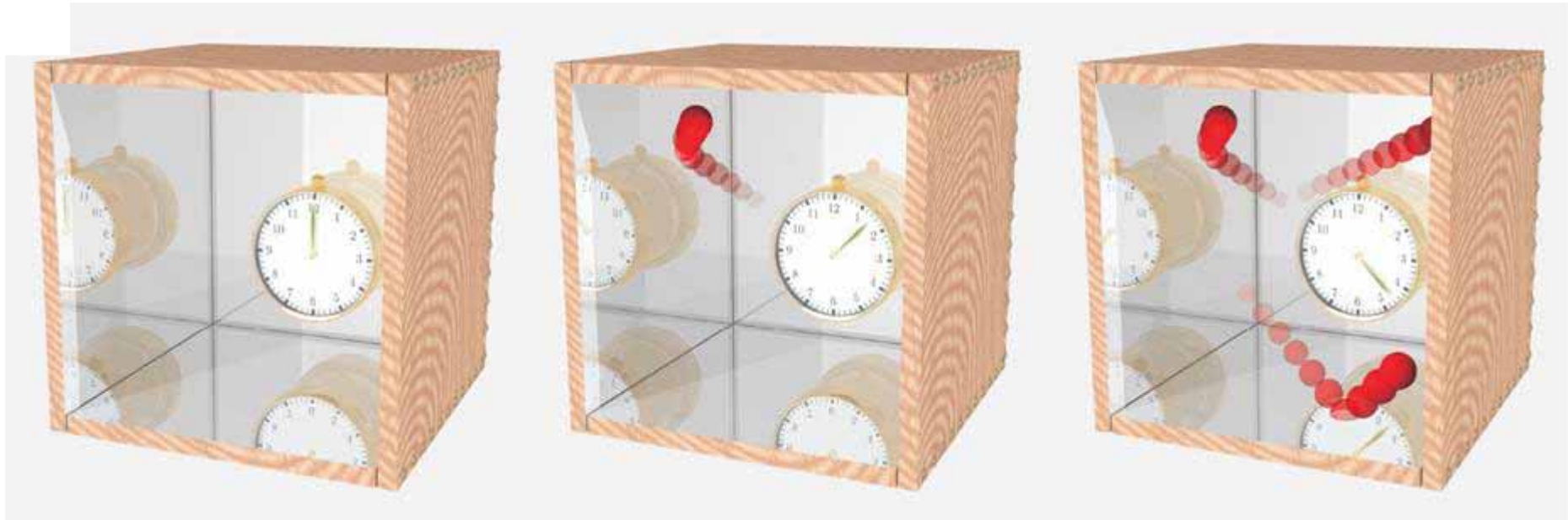


Peser un photon ?

- Une expérience de pensée dans le débat Einstein/Bohr



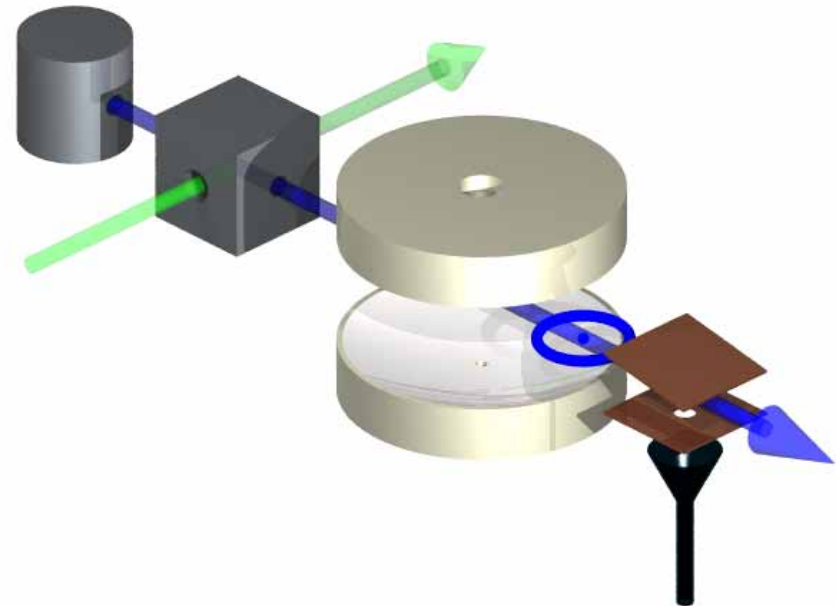
Une autre expérience de pensée



- Une horloge qui bat à un rythme déterminé par le nombre de photons dans la boîte
- La position finale de l'aiguille détermine directement le nombre de photons

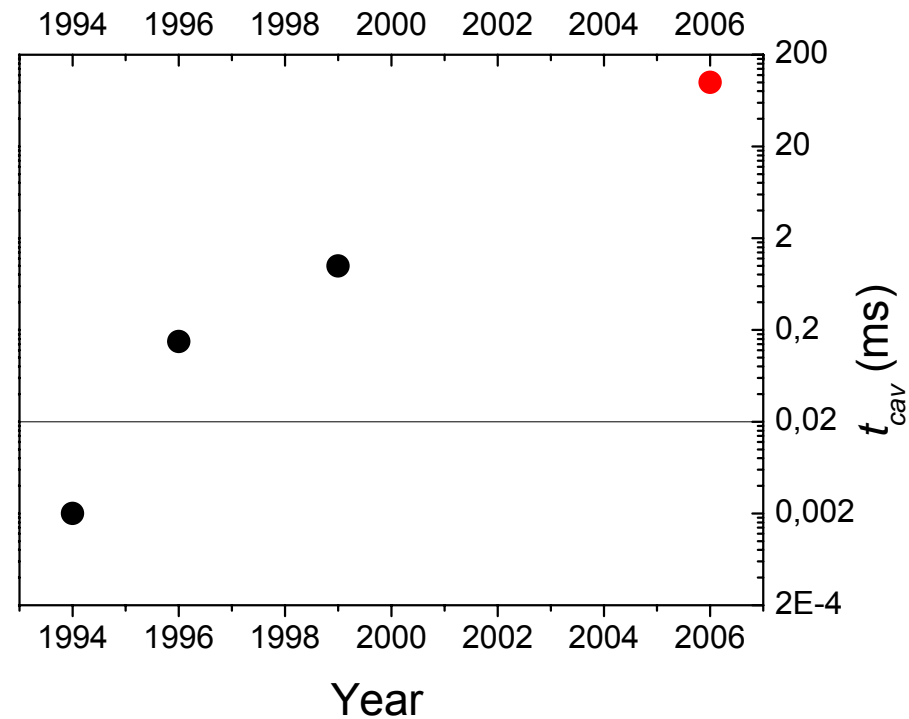
Notre boîte et nos horloges

- Boîte à photons
 - cavité microonde supraconductrice
- Horloge
 - atomes de Rydberg circulaires
- Interaction
 - Electrodynamique quantique en cavité
 - Un atome et un photon



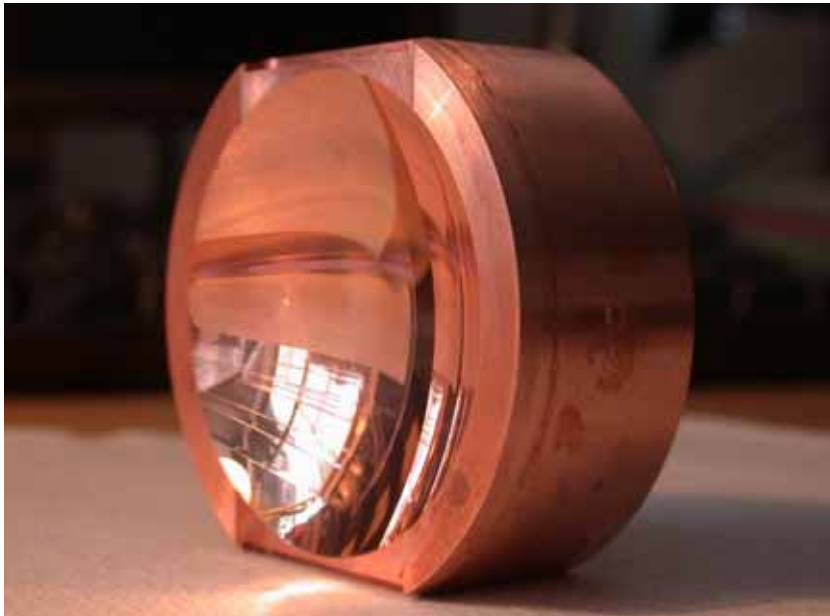
Une boîte à photons

- Les supraconducteurs sont les meilleurs miroirs possibles
- optimisation du temps de vie des photons
 - un long (et douloureux) processus



- extrapoler serait imprudent....

Des miroirs de haute technologie

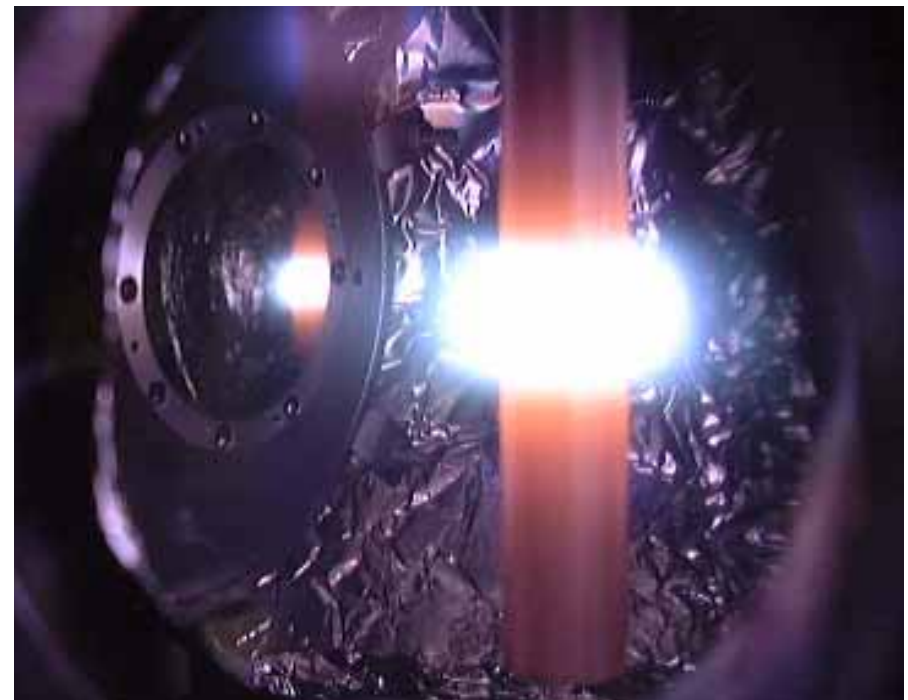


- Substrats de cuivre
usinage diamant
au nanomètre!

- 12 μm de niobium

*[E. Jacques, B. Visentin, P. Bosland,
CEA Saclay]*

S. Kuhr et al, APL, **90**, 164101



Une boîte pour photons microonde

- Une cavité de finesse remarquable
 - Temps de vie: 0.13 s @ 0.8 K

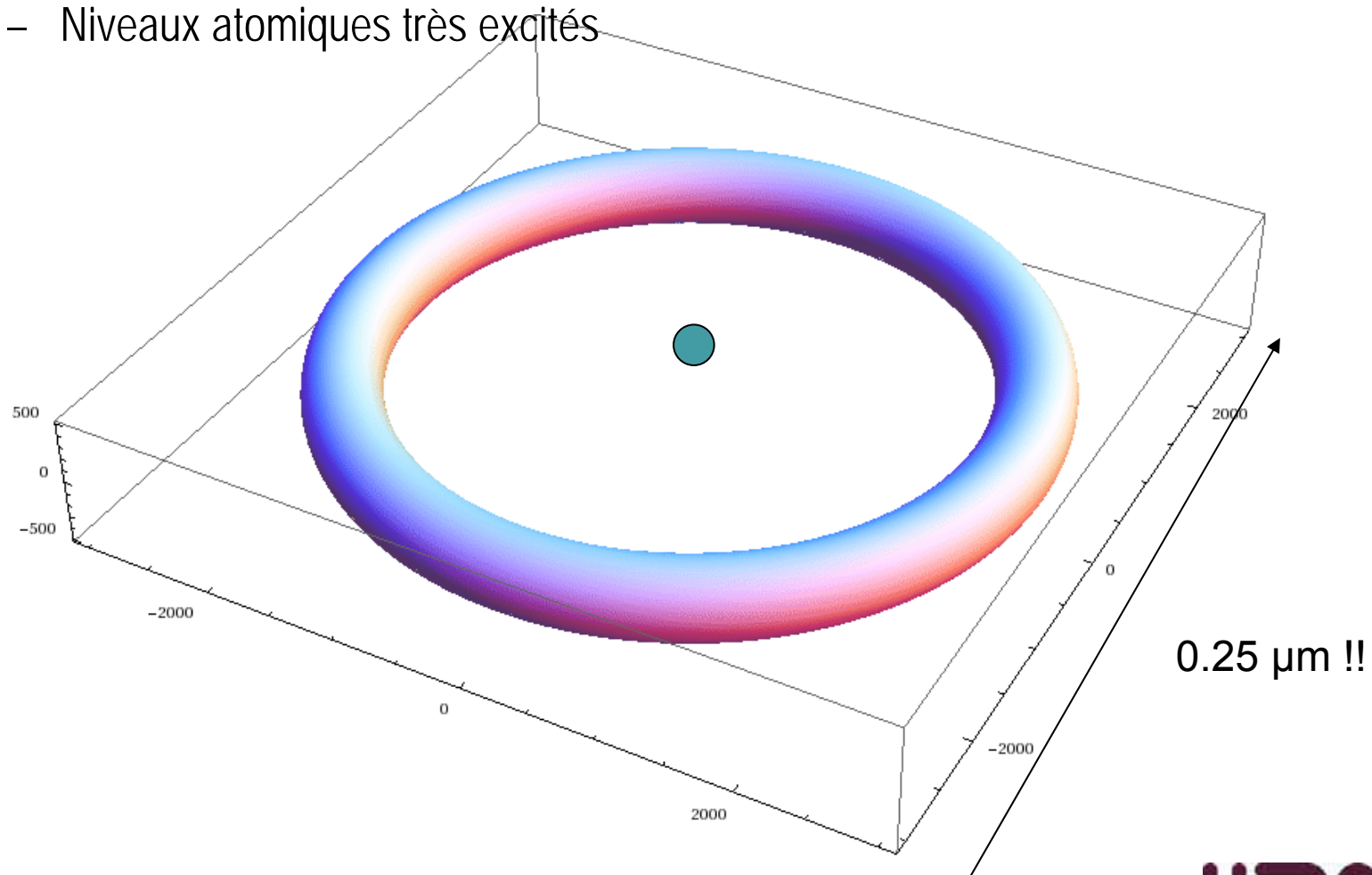
- **Facteur de qualité:**
 - $Q = \omega T_c = 4.2 \cdot 10^{10}$
- **Finesse:**
 - $F = 4.6 \cdot 10^9$

S. Kuhr et al, APL **90**, 164101 (2007)

- pendant ce temps, un photon
 - rebondit 1.1 milliards de fois sur les miroirs
 - parcourt 40 000 km
- Meilleurs miroirs jusqu'à maintenant, dans tous les domaines de fréquence !

Atomes de Rydberg circulaires

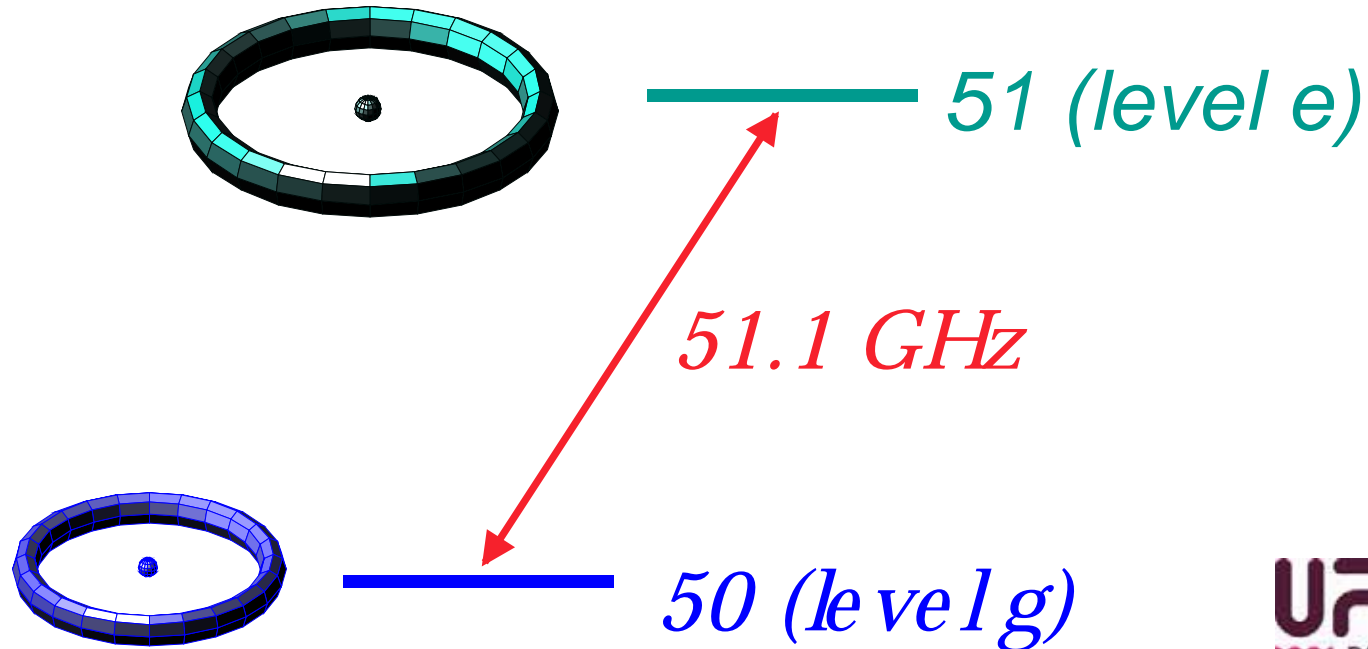
- Des atomes géants
 - Niveaux atomiques très excités



L'atome dans son état fondamental est 2500 fois plus petit!!

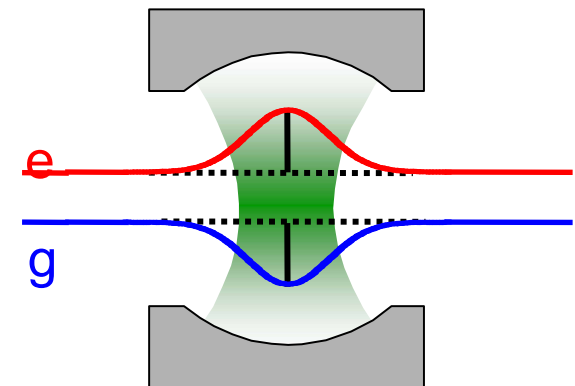
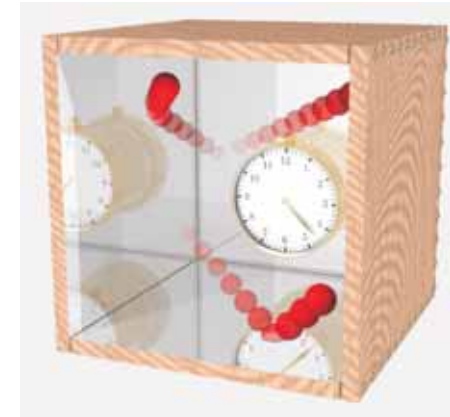
- Atomes idéaux

- Longue durée de vie (30ms)
- Fort couplage au champ
- Détection sélective efficace
- Processus d'excitation complexe depuis le fondamental

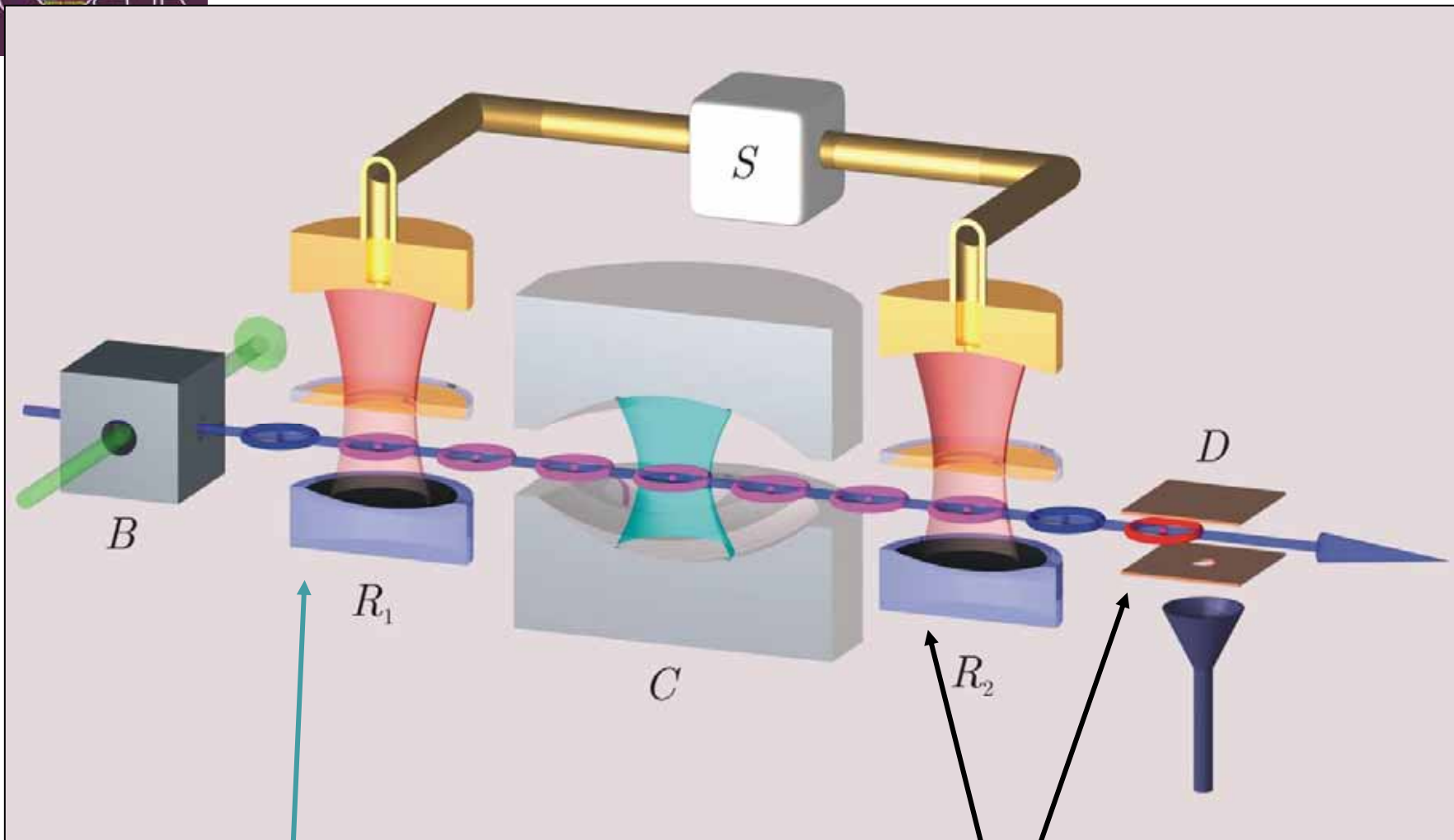


Une mesure QND du nombre de photons

- Comment 'voir' un photon sans l'absorber ?
 - Interaction non-resonante
 - Pas d'émission ou d'absorption
 - Déplacements lumineux
 - Niveaux atomiques déplacés par le champ
 - Modification d'une superposition quantique des deux niveaux équivalente à la rotation de l'aiguille de l'horloge
- Notre atome est une "horloge" qui indique le nombre de photons sans le modifier

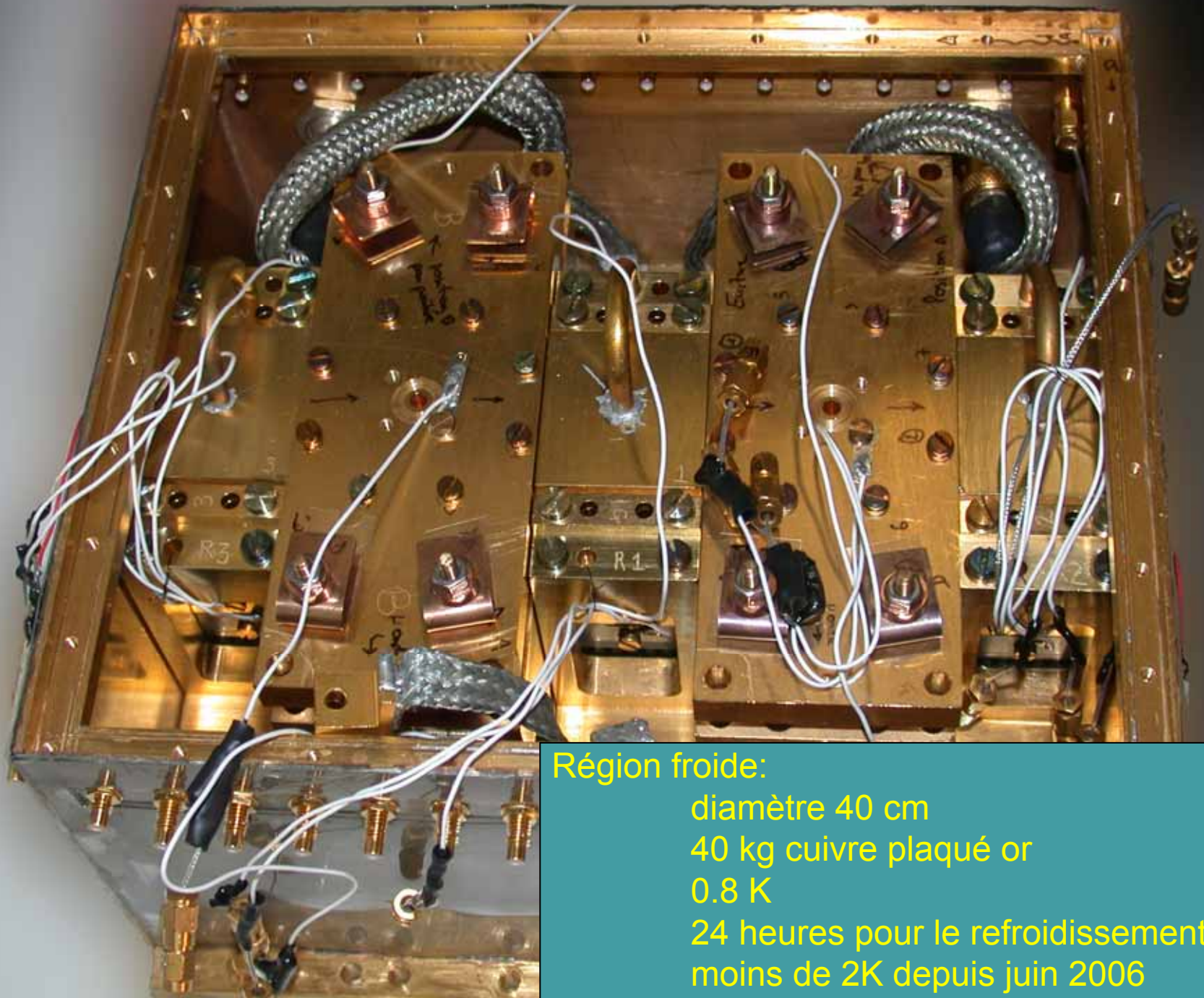


Dispositif expérimental



Préparation
d'une superposition
Démarrage horloge

Lecture de « l'heure »



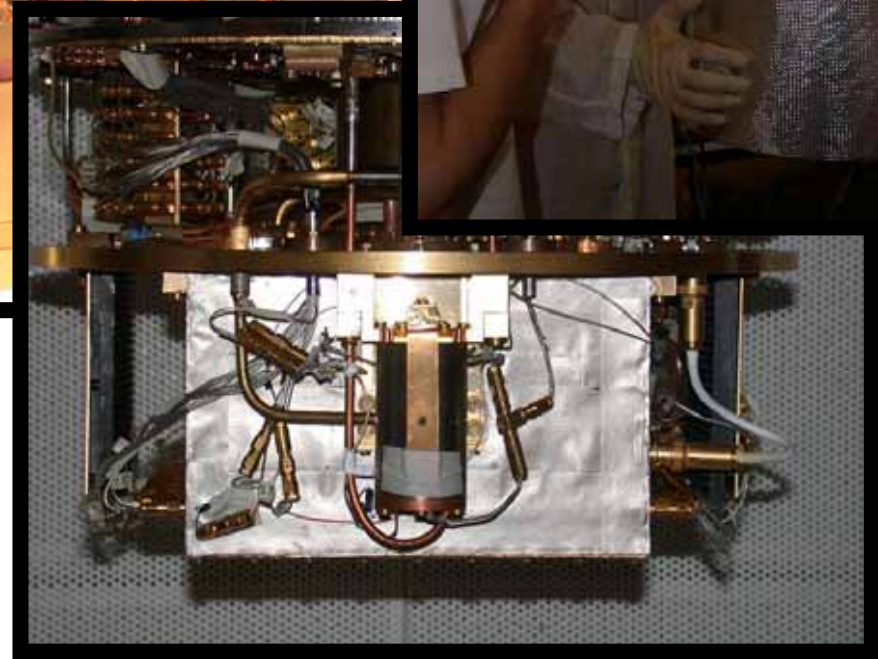
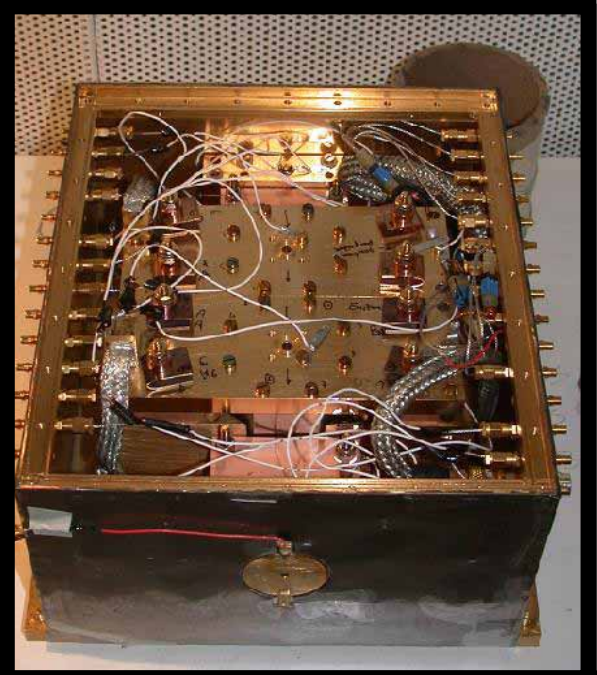
Région froide:

diamètre 40 cm

40 kg cuivre plaqué or

0.8 K

24 heures pour le refroidissement
moins de 2K depuis juin 2006

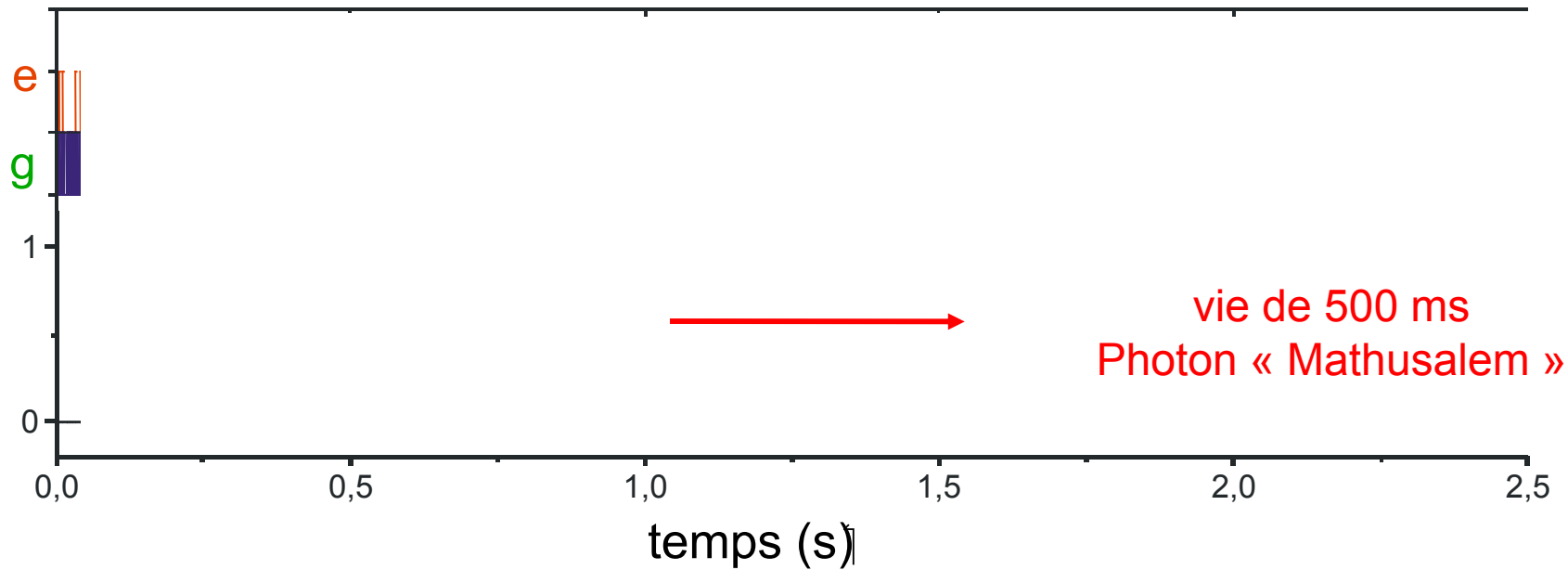


Une situation simple

- Champ contenant Zéro ou un photon
 - Champ thermique résiduel à 0.8 K.
 - 0.05 photons en moyenne
 - 95% du temps la cavité est vide
 - 5% du temps elle contient un photon pour 0.13s en moyenne
- Etat final de l'atome:
 - Atome dans g si la cavité est vide
 - Atome dans e si elle contient un photon

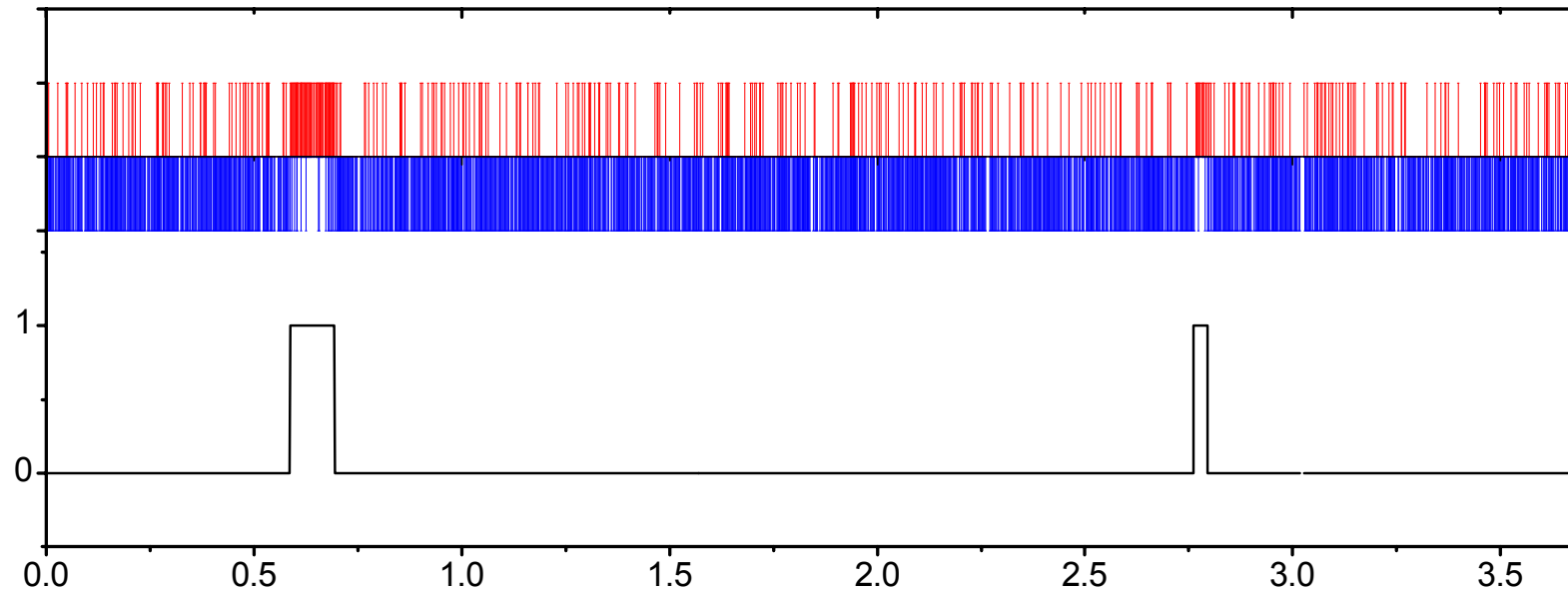
Naissance, vie et mort d'un photon

Champ thermique résiduel $T=0.8\text{ K}$ $n_{\text{th}}=0.05$



Gleyzes et al, Nature, **446**, 297 (2007)

Naissance, vie et mort de deux photons

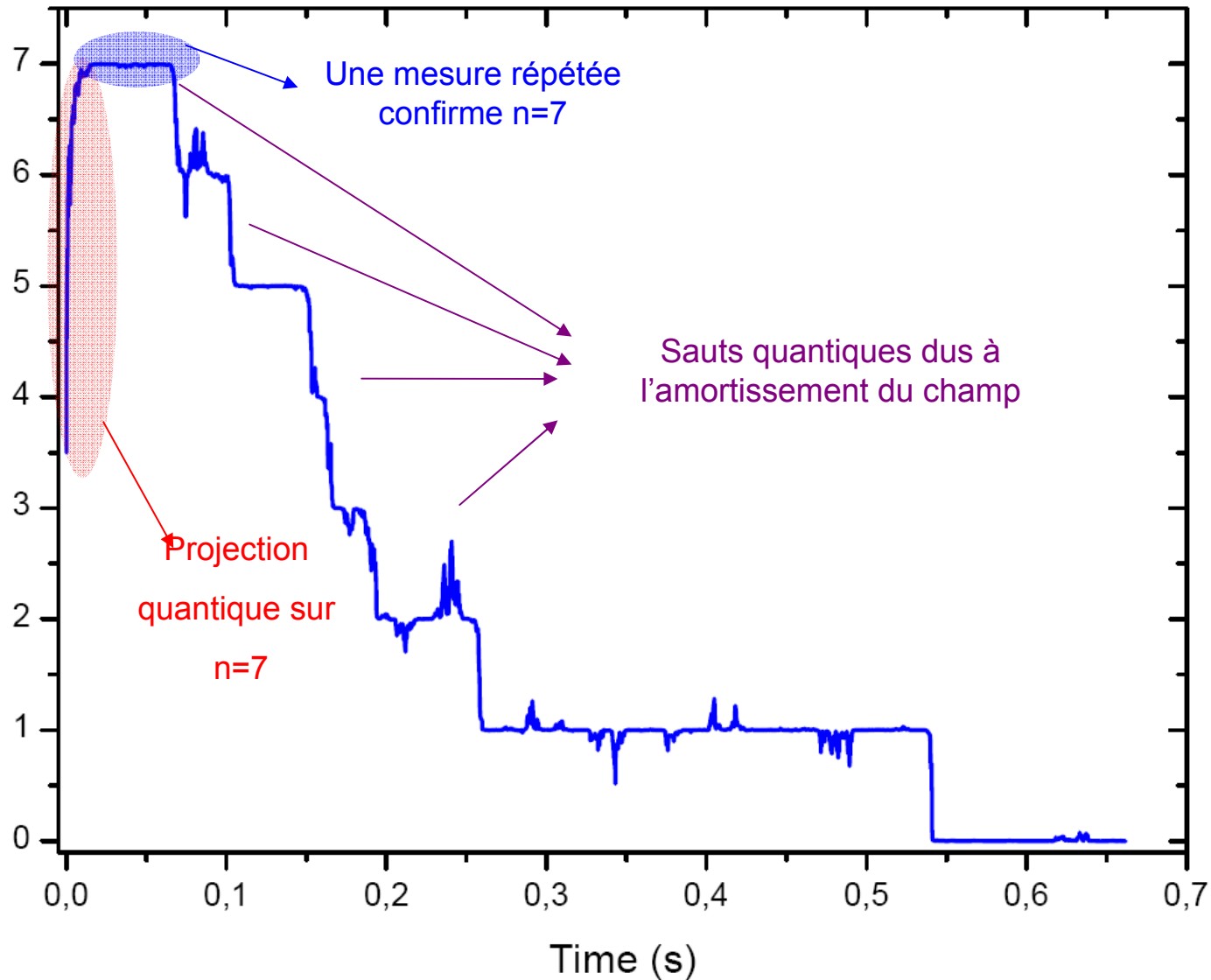


Gleyzes et al, Nature, **446**, 297 (2007)

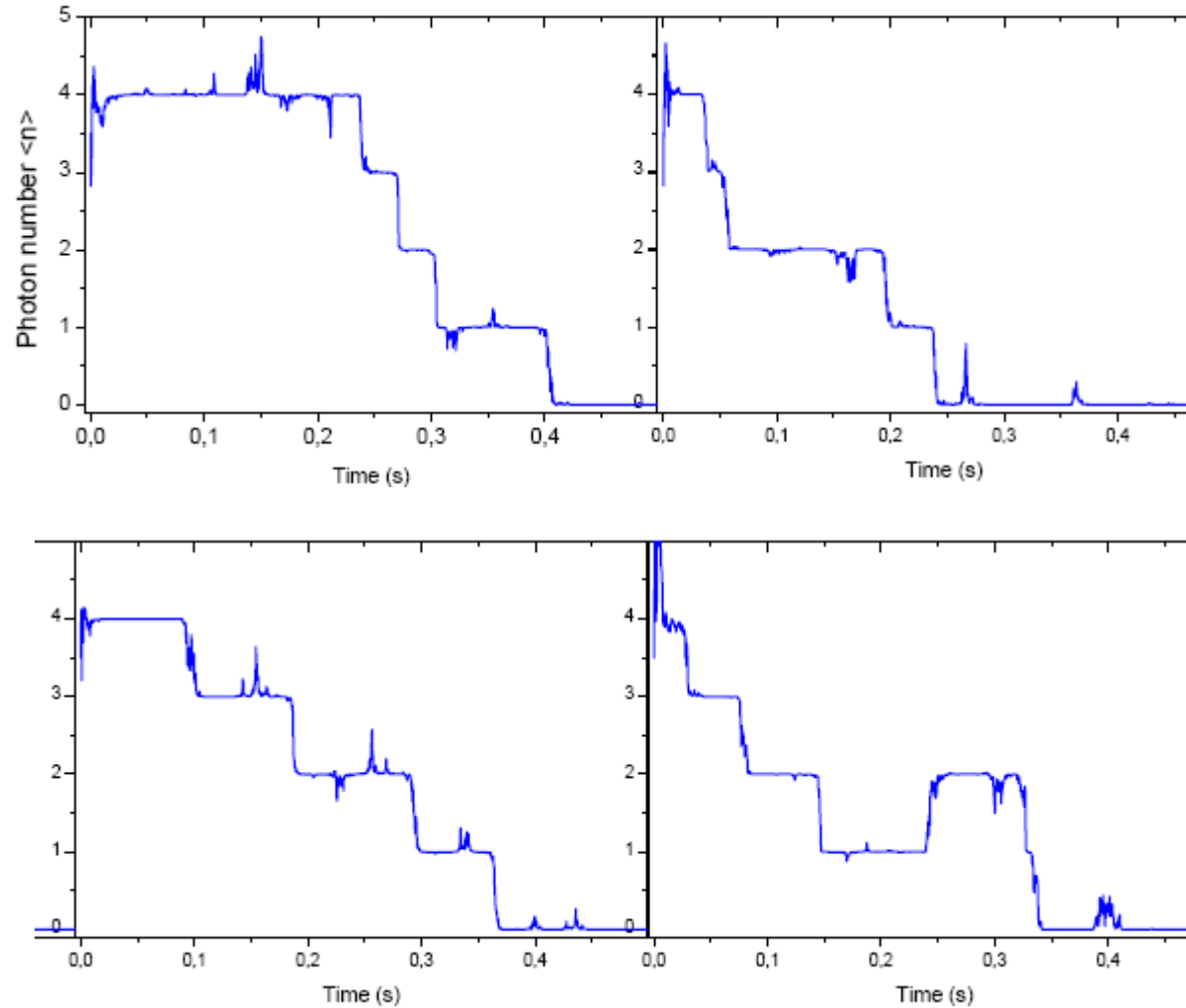
Compter jusqu'à 7 ?

- Un atome ne suffit pas
 - Impossibilité de mesurer l'état quantique d'un atome unique
 - Impossibilité de compter de 0 à 7 avec un bit !
- Exploiter l'information fournie par N atomes
 - Les atomes ne changent pas le nombre de photons !
 - En pratique, 110 atomes détectés en 26 ms

Une trajectoire quantique

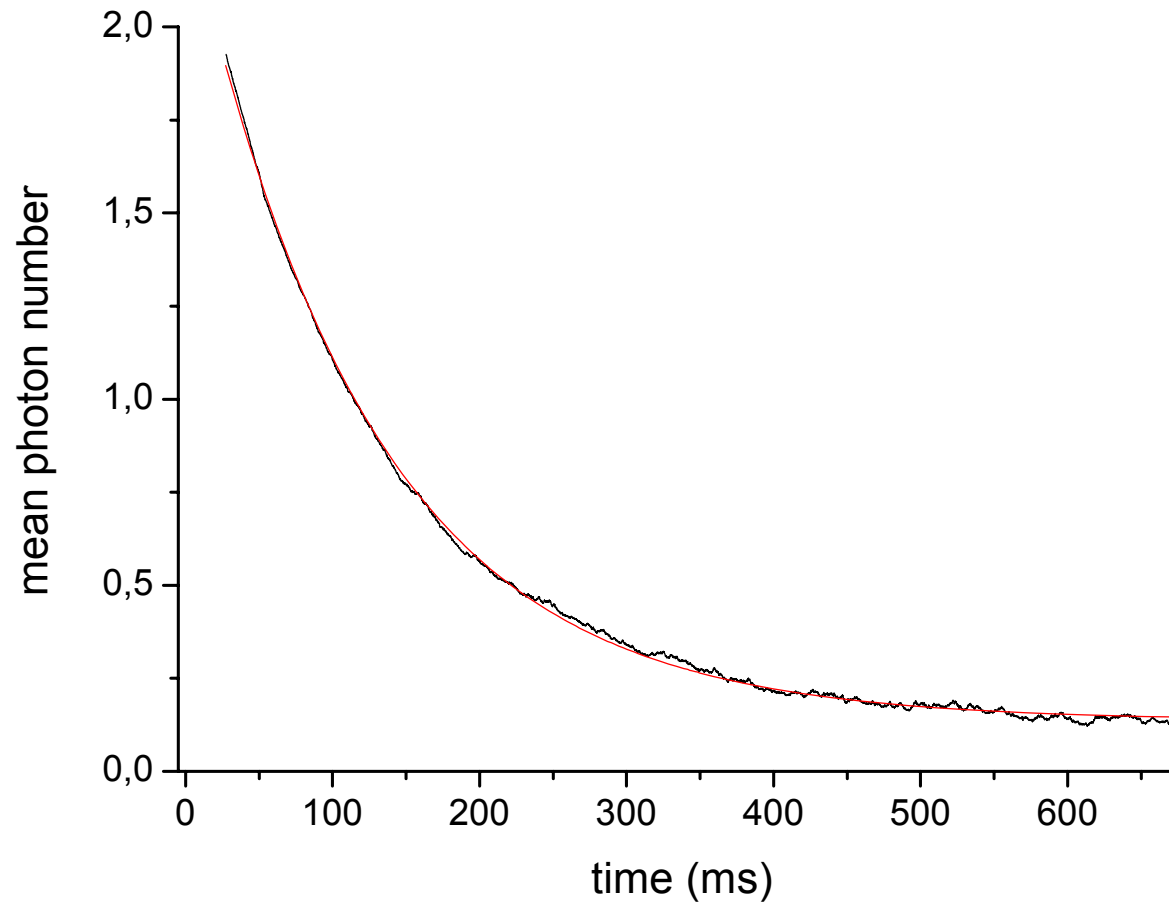


Quelques trajectoires remarquables



Retrouver les moyennes d'ensemble

- Nombre de photons moyens



- On retrouve l'amortissement exponentiel de l'énergie !



Une mesure quantique idéale du nombre de photons

- Mesure sans démolition quantique
 - Un résultat quantifié
 - L'énergie du champ dans une boîte est un multiple de $h\nu$
 - Un résultat aléatoire
 - Rien ne permet de prédire le résultat d'une expérience unique
 - Dieu joue aux dés
 - Un résultat répétable
 - Observation du même photon plusieurs centaines de fois
 - Une mesure quantique idéale !

**Quantum Nondemolition Measurement of Small Photon Numbers
by Rydberg-Atom Phase-Sensitive Detection**

M. Brune, S. Haroche, V. Lefevre, J. M. Raimond, and N. Zagury^(a)

*Département de Physique de l'Ecole Normale Supérieure, Laboratoire de Spectroscopie Hertzienne,
24 rue Lhomond, F-75231 Paris CEDEX 05, France*

(Received 18 April 1990)

We describe a new quantum nondemolition method to monitor the number N of photons in a microwave cavity. We propose coupling the field to a quasiresonant beam of Rydberg atoms and measuring the resulting phase shift of the atom wave function by the Ramsey separated-oscillatory-fields technique. The detection of a sequence of atoms reduces the field into a Fock state. With realistic Rydberg atom-cavity systems, small-photon-number states down to $N=0$ could be prepared and continuously monitored.

La théorie précède l'expérience de 17 ans !!



Le XXème siècle fut celui de la mécanique quantique. le XXIème siècle le sera aussi, sans doute...

Une théorie parfaitement bien établie, mais très contraire à notre intuition, forgée à la mesure du monde macroscopique.

- Des illustrations expérimentales des postulats de base
 - Apprivoiser l'étrangeté quantique
- Des questions ouvertes fondamentales
 - Théorie de la mesure, compréhension et interprétation des postulats
 - Limites monde quantique/monde classique, décohérence
- Des applications à explorer:
 - Utiliser l'étrangeté quantique pour traiter et transmettre de l'information

Cryptographie quantique

Cryptographie:

- Coder un message avec une clé (opération facile)
- Décoder avec la clé (facile)
- Décoder sans la clé (très difficile)

Exemple: one-time pad

Addition du message avec un clé de même longueur

0 3 3 1 1	0 8 7 6 7	0 8 7 6 2	6 3 / 8 3	7 6 4 8 7	0 6 2 6 7	6 7 0 6 1
6 1 8 4 4	6 8 4 3 2	4 6 0 3 7	8 7 9 3 1	7 8 2 7 2	0 3 0 2 3	4 6 2 7 1
6 9 / 4 0	1 0 3 7 9	9 4 7 1 3	4 0 0 1 4	4 4 6 7 9	0 9 2 8 0	0 7 7 7 6
7 3 7 9 7	6 8 2 7 9	6 5 8 6 7	0 8 7 0 9	5 8 3 7 5	9 6 3 8 8	7 2 3 7 7
6 2 7 7 3	4 1 1 4 5	4 2 3 5 7	4 7 4 5 1	4 2 1 3 3	7 1 3 7 0	9 5 5 1 1
8 5 6 8 0	0 9 3 3 6	0 7 1 1 9	4 5 1 2 4	1 0 4 2 8	7 7 7 7 8	7 7 8 2 3
4 3 0 9 5	8 7 0 8 9	5 6 6 7 2	7 1 5 7 8	7 1 8 4 3	9 3 7 0 9	4 9 8 7 6
4 8 7 9 9	0 7 0 8 6	4 9 1 2 6	6 0 0 2 8	4 2 5 5 5	4 8 4 5 6	8 7 7 1 4
0 1 9 8 9	8 4 8 6 9	9 2 9 9 7	5 7 5 7 4	3 4 7 2 2	7 1 3 7 5	2 8 7 8 6
3 1 7 2 6	5 0 8 3 3	8 2 0 8 8	2 8 7 2 7	6 8 4 2 6	3 1 8 3 3	7 8 1 1 1
8 4 8 6 0	1 9 4 7 7	7 8 2 1 3	7 6 6 9 9	5 8 1 3 0	4 2 5 4 0	6 4 6 1 0
1 4 2 7 6	6 9 2 0 4	5 0 2 9 1	9 4 3 1 1	5 4 9 5 6	7 3 3 7 3	3 5 7 4 1
7 7 7 7 7	2 8 3 6 6	5 6 9 7 6	4 6 7 6 0	9 7 6 1 3	0 5 8 6 7	6 3 2 3 9
1 2 3 4 4	3 5 6 0 1	9 4 5 0 8	5 2 0 4 0	5 7 8 7 1	5 2 5 0 4	7 8 6 6 3
8 9 7 8 1	5 3 5 6 7	4 2 4 7 4	9 8 7 2 0	4 4 4 8 4	5 7 3 6 1	3 1 8 7 4
2 1 7 3	7 8 2 0 8	7 6 9 2 6	3 9 3 9 6	3 2 4 7 6	0 3 9 4 6	4 7 4 8 3
6 7 1 1 8	0 0 4 2 1	0 7 4 0 8	7 5 5 7 6	6 7 2 3 0	6 7 8 0 8	8 7 7 2 2
8 0 0 0 1	7 8 8 2 9	7 3 3 2 9	0 3 8 8 1	9 9 8 0 6	6 0 7 4 4	2 4 1 7 5
1 5 4 3 9	7 6 8 5 8	9 8 7 4 7	2 6 7 7 6	5 9 3 7 7	9 3 9 8 7	6 2 7 4 6
2 8 7 7 2	3 0 5 4 2	3 8 0 9 1	4 0 1 0 9	4 8 4 2 3	4 6 6 2 5	7 3 1 7 1
3 1 2 7 1	0 6 3 1 0	2 4 7 3 8	6 1 8 9 5	9 7 7 9 0	3 9 7 0 2	3 5 0 4 7
5 8 7 2 8	7 3 3 3 3	0 0 0 7 7	1 5 8 3 7	4 5 8 5 0	6 5 8 7 2	8 6 7 2 8
0 4 3 8 9	2 1 0 6 7	3 2 2 4 8	8 8 8 1 1	8 2 8 8 3	3 2 3 2 1	2 2 7 7 1
5 4 0 8 2	9 8 3 3 2	3 2 2 1 4	9 3 1 9 3	6 7 9 3 3	9 7 1 5 3	0 0 5 1 3

Problème essentiel: distribuer des clés sûres

Utilisation des états intriqués

Deux particules intriquées:

- Mesures par deux observateurs corrélés
- Pas d'espionnage sans changer les corrélations

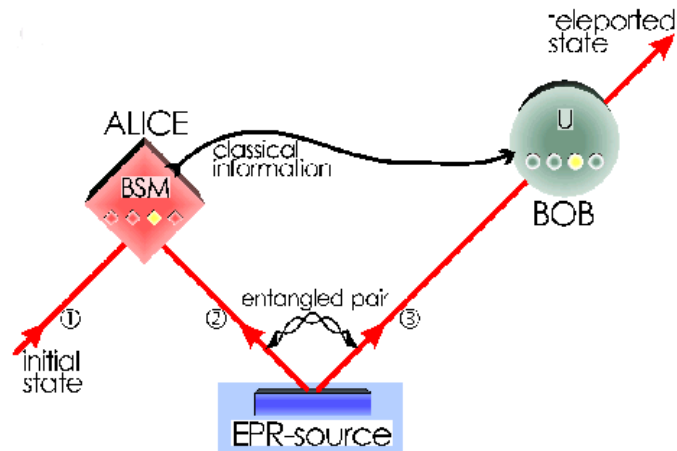
Un outil sûr pour distribuer des clés.

Déjà commercial!

Fonctionne avec des fibres optiques sur des distances ~100 km.

Téléportation quantique

Principe



Utilise des états intriqués pour transporter un état quantique d'un point à un autre.

Ce que ce n'est pas:

Téléportation de matière

Supraluminique

Une solution au problème des transports en commun

Ce que c'est:

Une très belle illustration de la non-localité quantique

Déjà démontré avec des photons intriqués

Ordinateur quantique

Principe

Ordinateur classique manipule des bits (0 ou 1)

- Un calcul à la fois.
- Problèmes difficiles (factorisation)

Ordinateur quantique manipule des systèmes quantiques (qubits)

- Superposition.
- Qubits: 0 et 1 à la fois!

Tous les calculs possibles simultanément.

Rend facile des problèmes difficiles (factorisation).

Le rêve

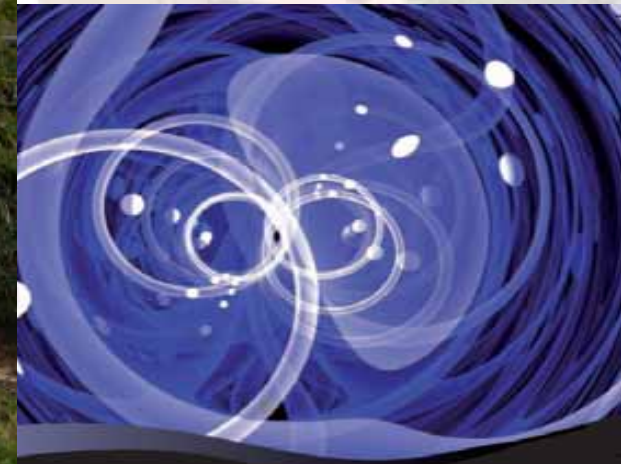


La réalité

- Décohérence: un obstacle formidable
- Quelques opérations, quelques qubits
- Des algorithmes spécialisés
- Sans doute pas de calculateur à grande échelle

Notre équipe

- Permanents:
 - S. Haroche, M. Brune, G. Nogues, JM Raimond
- Electrodynamique en cavité
 - S. Kuhr, I. Dotsis
 - S. Gleyzes, C. Sayon
- Puces à atomes sélénisés
 - A. Lupascu
 - T. Nirrengarten
- www.cqed.org
- €€:
 - JST (ICORP)
 - EC (Conquest, Qgates, Scala)
 - CNRS
 - UMPC
 - IUF
 - CdF



Exploring the Quantum

Atoms, Cavities, and Photons

Serge Haroche and
Jean-Michel Raimond

OXFORD GRADUATE TEXTS



Pour en savoir plus

- **Ouvrages de vulgarisation (tous publics)**
 - La cantique des quantiques (Ortoli et Pharabod, La découverte)
 - Initiation à la physique quantique (Scarani, Vuibert)
 - Numéro spécial de Sciences et Avenir (décembre 2008)
 - Numéro spécial de Science et Vie (Février 2009)
- **Articles de vulgarisation**
 - S. Haroche, J.M. Raimond, M. Brune, **La Recherche**, Septembre 1997, p. 50 "Le chat de Schrödinger se prête à l'expérience". Réimprimé dans les dossiers de la Recherche, n°18 (2005)
 - J.M. Raimond, **Revue du Palais de la Découverte**, Vol. 5 n° 249 p. 23 (1997): "Atomes, cavités et Chats de Schrödinger, les monstres et prodiges de la mécanique quantique".
- **Manuels (niveau L3)**
 - Physique quantique (M. Le Bellac, CNRS éditions)
 - Mécanique quantique (C. Aslangul, de Boeck)
- **Monographies (niveau M1)**
 - Introduction à l'information quantique (M. Le Bellac, Belin)
 - Exploring the quantum (S. Haroche, J.M. Raimond, OUP)