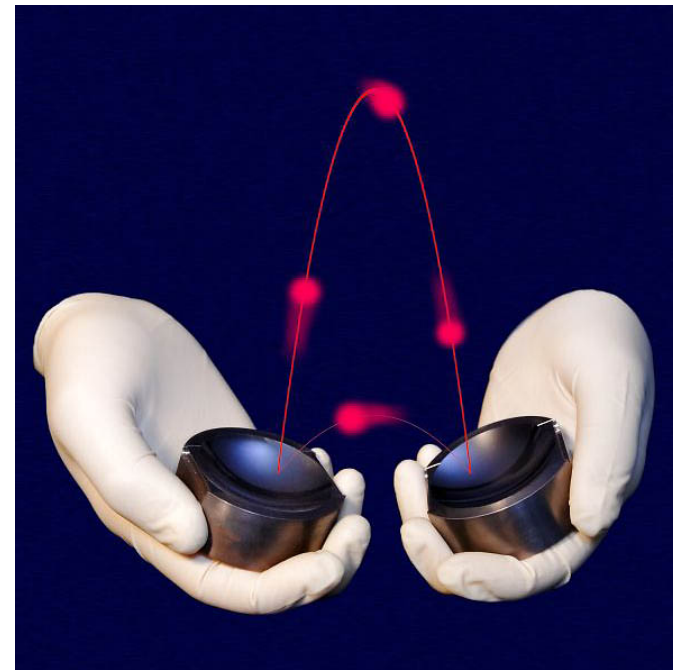


Explorer le monde quantique avec des atomes et des cavités

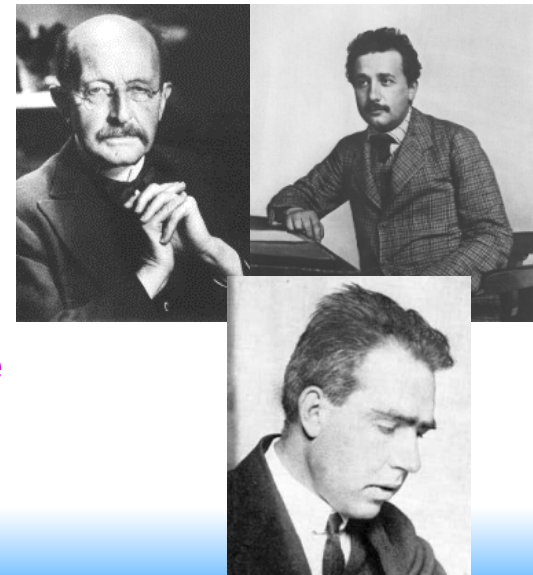
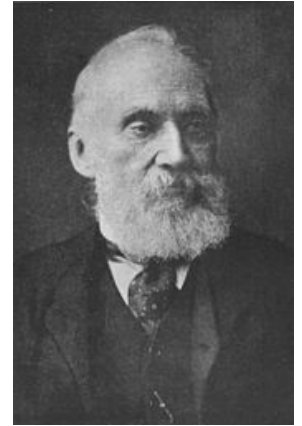
J.M. Raimond

Université Pierre et Marie Curie



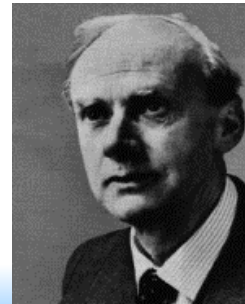
Atomes et photons au coeur de la révolution quantique

- Les « petits nuages » de Lord Kelvin...
 - Problème de l'éther
 - Rayonnement du corps noir et chaleurs spécifiques
 - Mais aussi
 - Spectres atomiques
- ... deviennent une tempête majeure
 - Pas de modèle atomique planétaire stable
 - Pas de théorie classique du rayonnement noir
- Les hypothèses quantiques
 - Planck 1900 et Einstein 1905
 - Lumière faite de quanta: onde ou particule?
 - Bohr 1913
 - Hypothèses ad hoc de quantification atomique



La naissance du quantique

- Une révolution scientifique
 - Succès impressionnants
 - Structure atomique comprise
 - Très contre-intuitive
 - Principe de superposition
 - Des questions fondamentales sur ce qu'on peut demander à la théorie
 - Renoncer au déterminisme classique: « Dieu joue aux dés »
 - Nécessité d'une interprétation
 - Lien entre le formalisme mathématique et la réalité.
 - Les « pères fondateurs » ont renouvelé totalement notre compréhension du monde



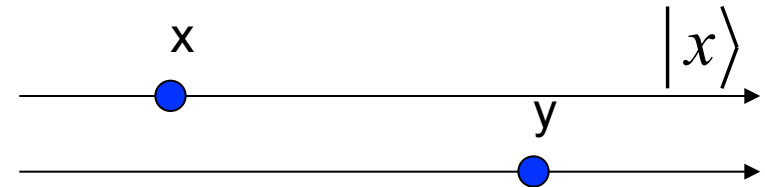
Au cœur de l'étrangeté quantique: superpositions d'états

- Etat quantique

- Un objet mathématique qui décrit toute l'information qu'on a sur le système

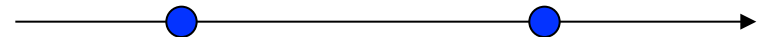
- Particule ponctuelle

- État « x »: particule localisée ici en x
- État « y »: particule localisée là en y



- La physique quantique est une théorie linéaire

- Toute somme d'états est un état possible
 - « x » + « y » est un état possible

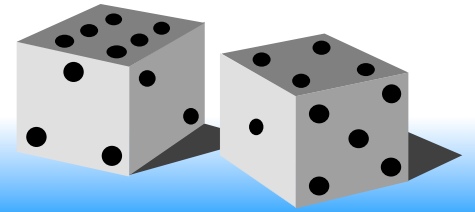


Une particule dans deux endroits *à la fois* ???

Commode, mais choquant....

Superposition quantique et mesure

- Etat « x » + « y » $\frac{1}{\sqrt{2}}(|x\rangle + |y\rangle)$
 - On mesure la position de la particule.
 - 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
- Un « pile ou face » fondamental. Rien ne permet de prédire le résultat d'une expérience quantique unique. Seules les probabilités d'occurrence sont prédictibles.
 - Renoncement au déterminisme classique (ce qui n'empêche pas de faire des prédictions extraordinairement précises).
 - Einstein « Dieu joue aux dés »
 - Bohr – « arrête de dire à Dieu ce qu'il doit faire »



Superposition quantique et mesure

- Etat après la mesure

- Mesure x: état « x » $|x\rangle$

– Ou

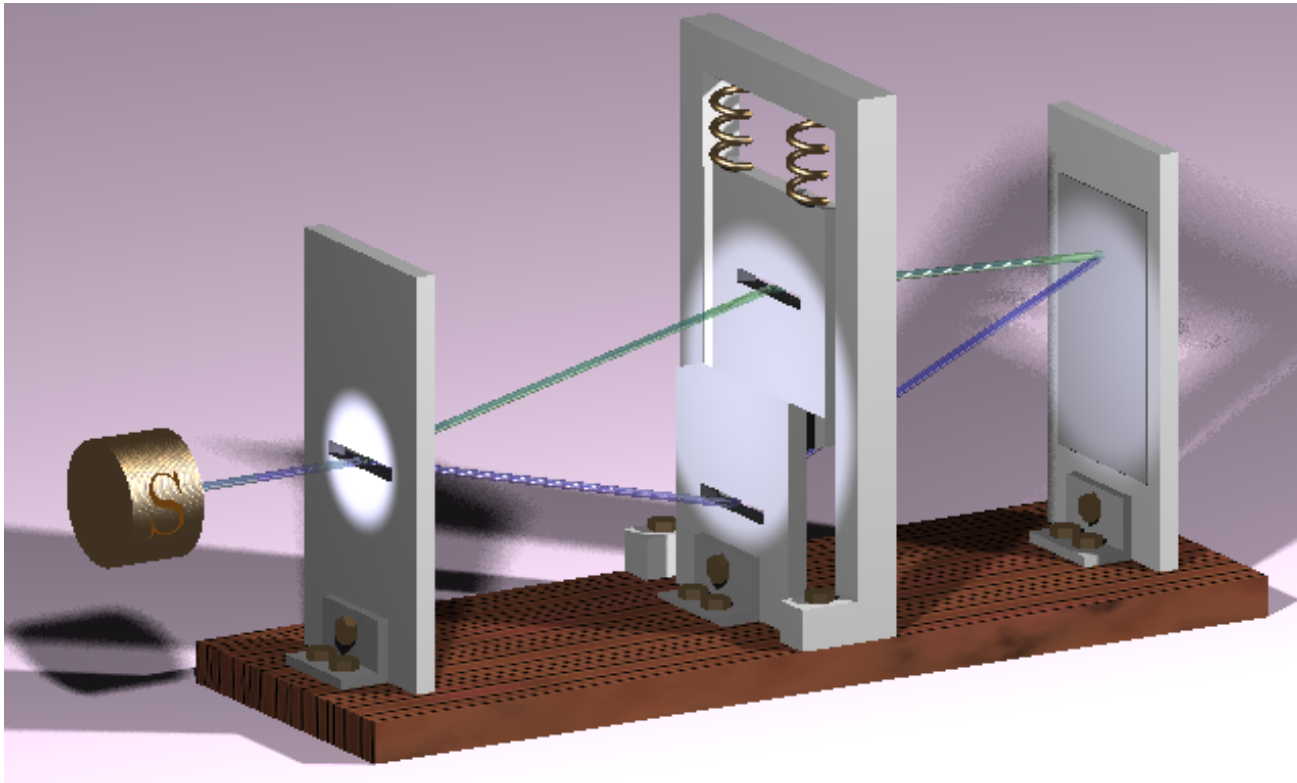
- Mesure y: état « y » $|y\rangle$

- Une seconde mesure immédiatement après la première donne le même résultat

- La mesure modifie fondamentalement et irréversiblement l'état quantique.
- Une notion nouvelle par rapport à la physique classique (on peut mesurer une quantité physique aussi précisément que possible sans perturber le système)

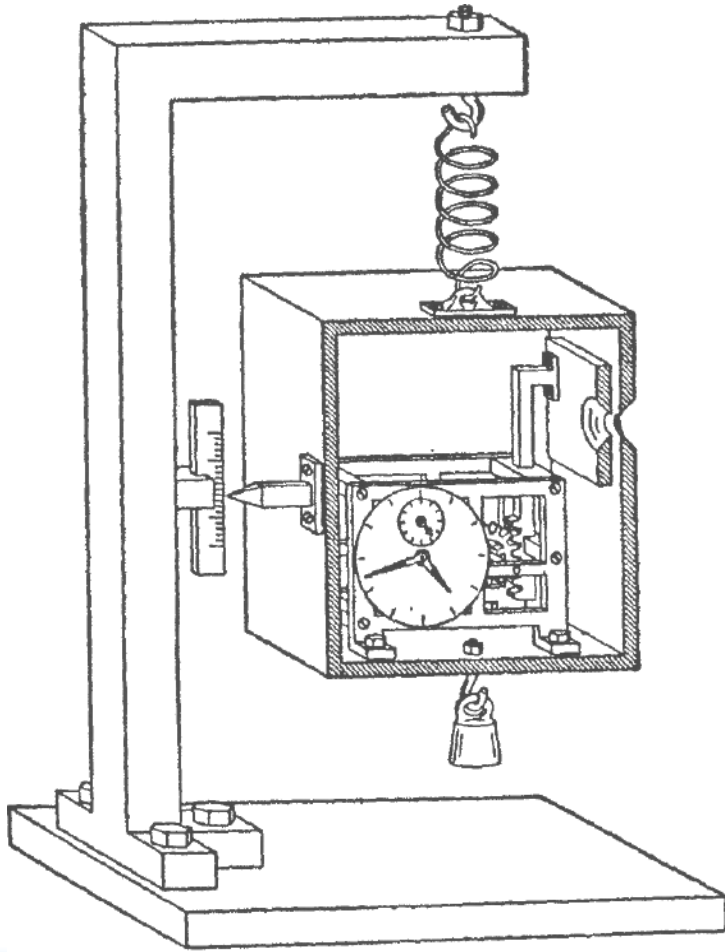
Interpréter la physique quantique

- Les expériences de pensée
 - Exagérer les comportements quantiques pour comprendre leurs conséquences logiques
 - Microscope de Heisenberg
 - Interféromètre à fente mobile (complémentarité)



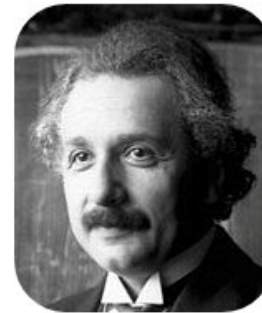
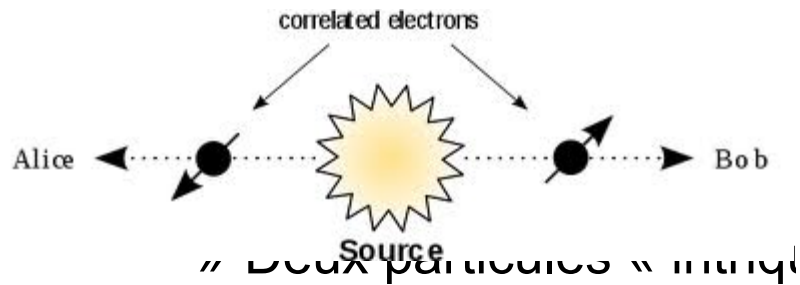
Les expériences de pensée

- La boîte à photons



Les expériences de pensée

- La situation EPR



A. Einstein



B. Podolsky

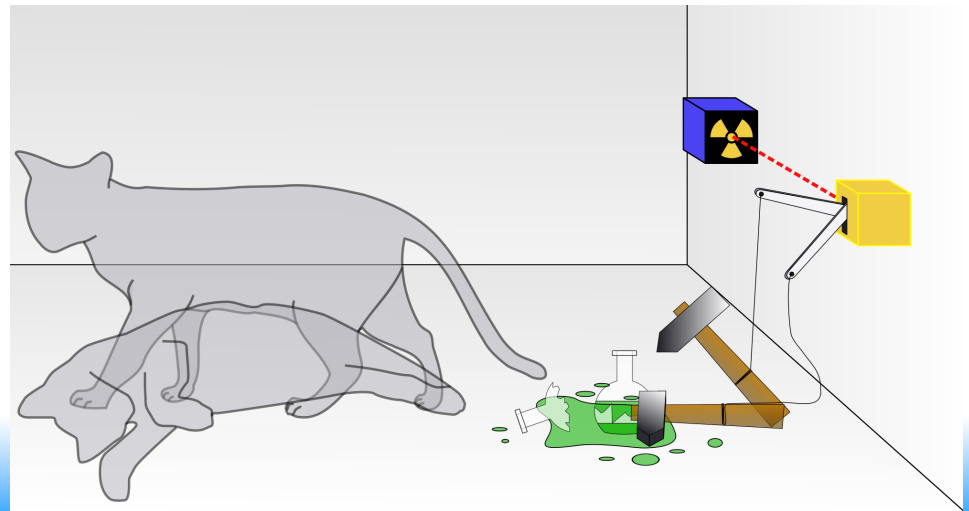


N. Rosen

- Le chat de Schrödinger

» Conséquences « ridicules » du quantique

» Le problème central de la mesure quantique

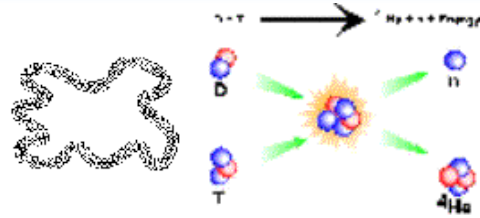


Et tout cela conduit à une réussite théorique sans précédent...

- Un énorme champ d'applications

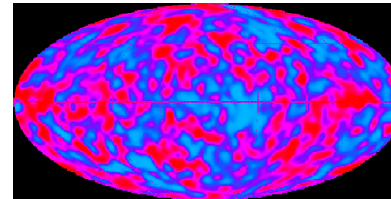
- Des constituants élémentaires (cordes et particules)

- 10^{-35} m à 10^{-15} m



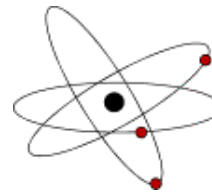
- Aux structures cosmologiques

- 10^{26} m



- En passant bien sûr par les atomes

- 10^{-10} m



- Des prédictions d'une précision extrême

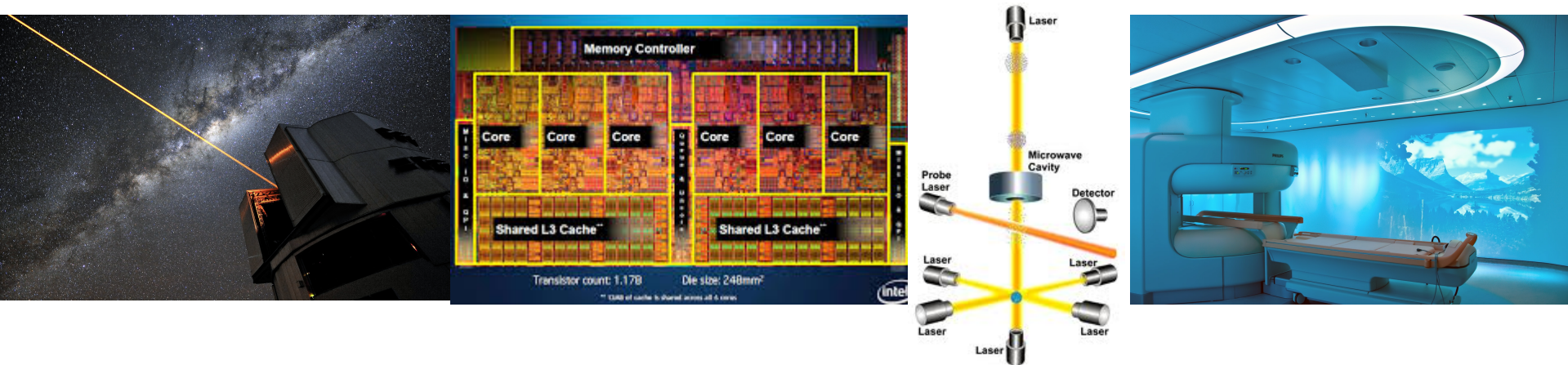
- Accord théorie-expérience sur 12 chiffres !

- Un cadre théorique universel

- Toutes les interactions fondamentales de la nature dans un cadre unique (sauf la gravité)

... à des applications sans nombre...

- 100 ans de physique quantique ont changé la société...
 - Lasers, électronique, horloges, imagerie par résonance magnétique...



- Un impact sociétal et économique considérable (et mésestimé)
 - Une grande partie du PIB résulte de technologies quantiques
 - Et aussi une part importante de notre espérance de vie!
 - Pas de société de l'information sans physique quantique
- Un exemple remarquable de l'impact à long terme de la recherche fondamentale
 - Une leçon pour nos systèmes de financement ?

...à de nouveaux outils expérimentaux...

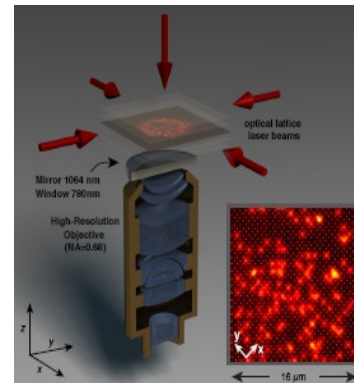
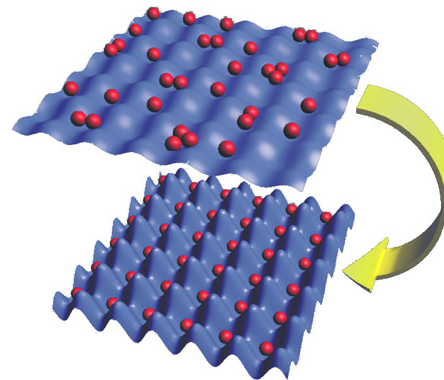
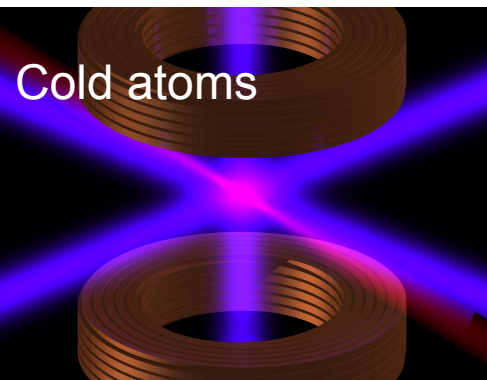
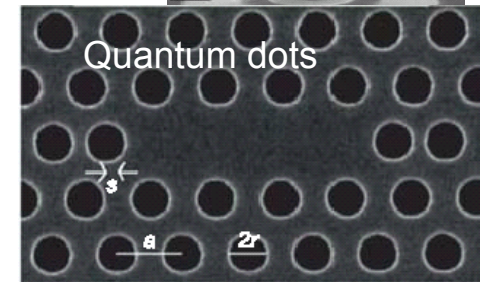
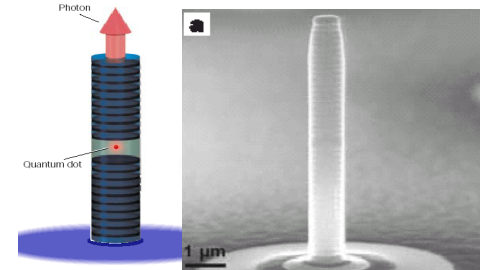
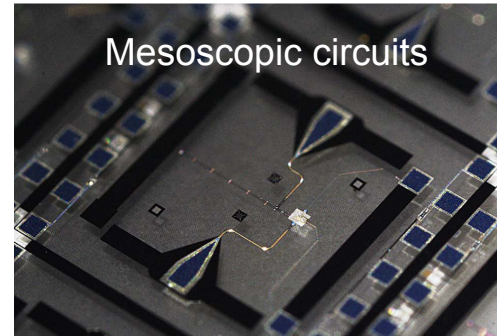
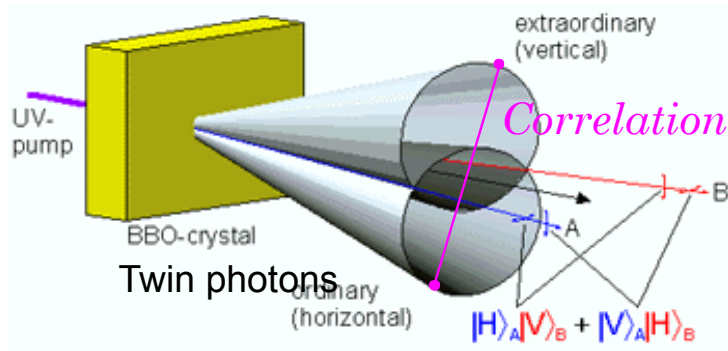
- Lasers, ordinateurs nous permettent de manipuler des systèmes quantiques
 - La technologie quantique aide à explorer le monde quantique
 - Les expériences de pensée deviennent réelles
 - Nous pouvons enfin contredire Schrödinger
 - « we never experiment with just one electron or atom or (small) molecule. In thought-experiments we sometimes assume that we do; this invariably entails ridiculous consequences.... »
- Et la physique quantique passe le test!
 - Ce que nous observons est précisément ce que les pères fondateurs avaient eu l'exceptionnel talent et l'audace d'imaginer.

... pour explorer le quantique

- Explorer encore le monde quantique?
 - Renforcer notre confiance dans la théorie
 - Mieux comprendre son interprétation
 - Renouveler son enseignement
 - Développer de nouvelles technologies fondées sur l'étrangeté quantique
 - Transmission quantique de l'information
 - Cryptographie quantique
 - Traitement quantique de l'information
 - Calcul/ordinateur quantique
 - Simulation quantique

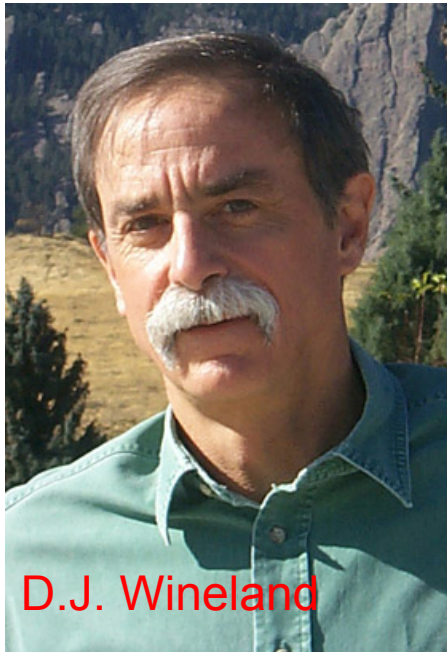
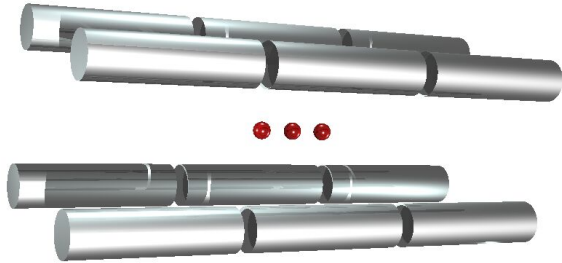
Un domaine très actif

- Beaucoup d'expériences manipulent des systèmes quantiques individuels



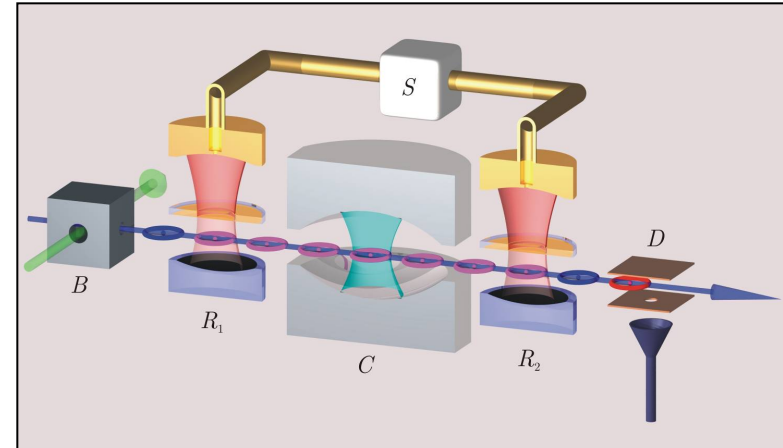
Deux domaines récemment distingués

- Pièges à ions



D.J. Wineland

- Atomes et cavités



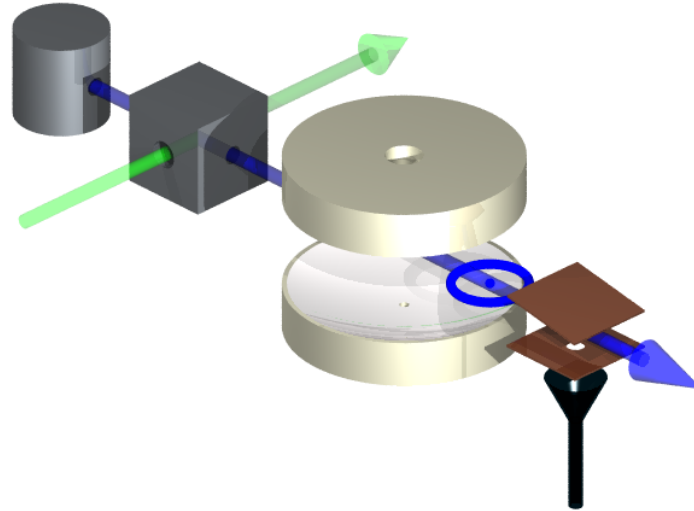
2012 Nobel Prize in Physics



S. Haroche

Electrodynamique quantique en cavité (EDQC)

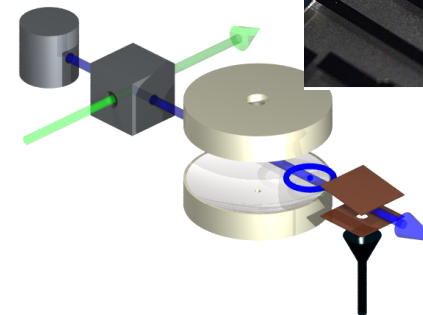
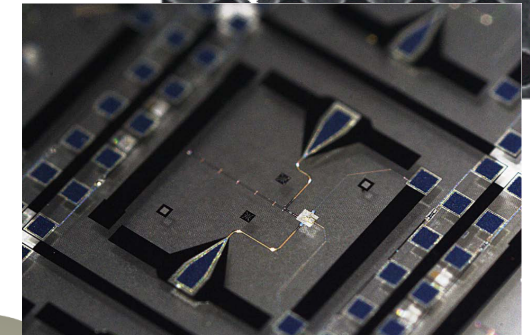
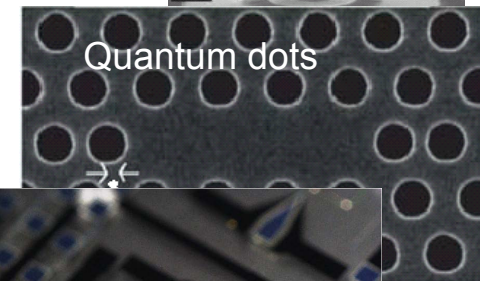
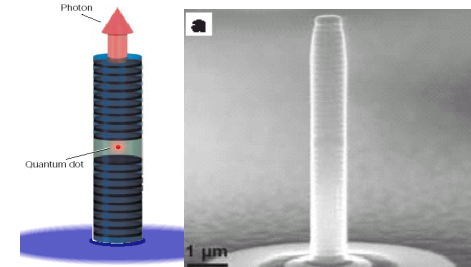
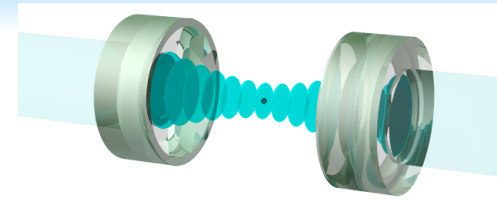
- Système matière-rayonnement le plus simple



- un seul atome à deux niveaux interagissant avec quelques photons dans un seul mode du champ.
 - Première proposition théorique: Purcell 1946
 - Premières évidences expérimentales 1983-1985
 - Kleppner, Walther, Haroche
- Illustration directe des postulats quantiques
- Un système prototype pour l'information quantique

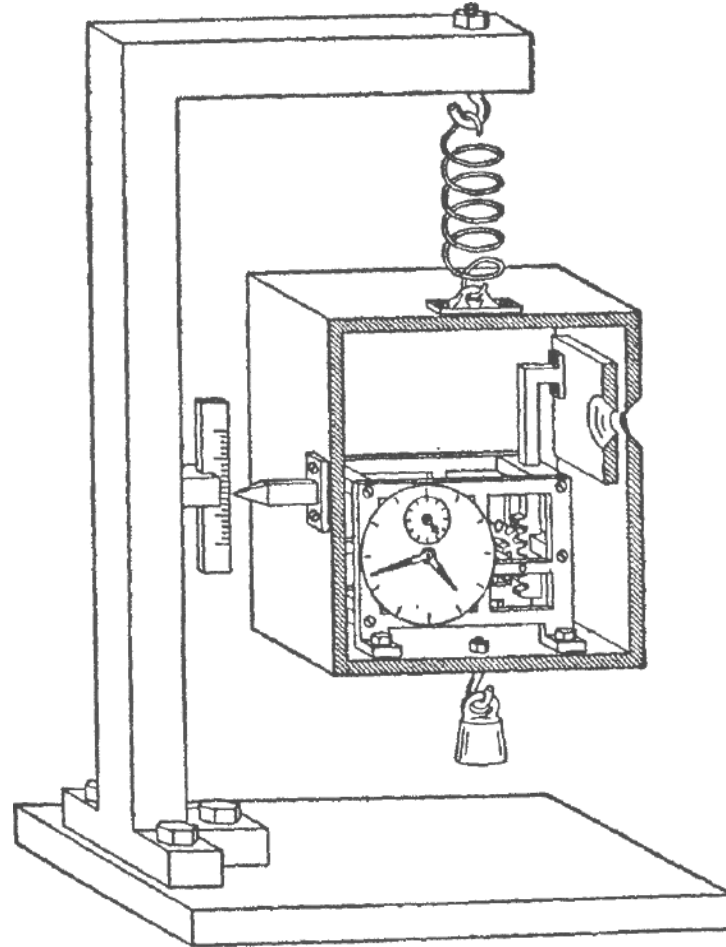
Les quatre « saveurs » de l'EDQC moderne

- EDQC optique
 - Transitions optiques et cavités FP
- EDQC à l'état solide
 - Boîtes quantiques et structures résonantes
- EDQC des circuits
 - Qubits supraconducteurs et cavités intégrées
- EDQC Microonde
 - Atomes de Rydberg (circulaires) et cavités supraconductrices micro-onde



Piéger et peser un photon ?

- Une expérience de pensée dans le débat Einstein/Bohr



- Une mesure quantique idéale de l'intensité lumineuse.

Mesure quantique idéale

- Postulats de la mesure quantique

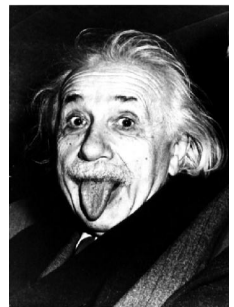
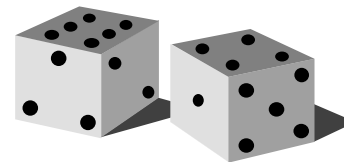
- Pour une mesure idéale

- Discontinuité quantique

- tous les résultats ne sont pas autorisés
 - Energie du champ: multiple de celle du photon

- Probabilités

- prédiction des probabilités d'obtention des résultats
 - » 'Dieu joue aux dés'



- Répétabilité ou projection de l'état

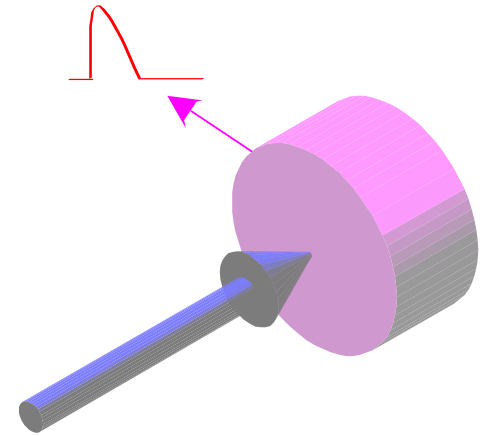
- deux mesures identiques dans un court intervalle de temps donnent le même résultat

Mesures idéales et mesures réelles

- La plupart des mesures sont loin d'être idéales

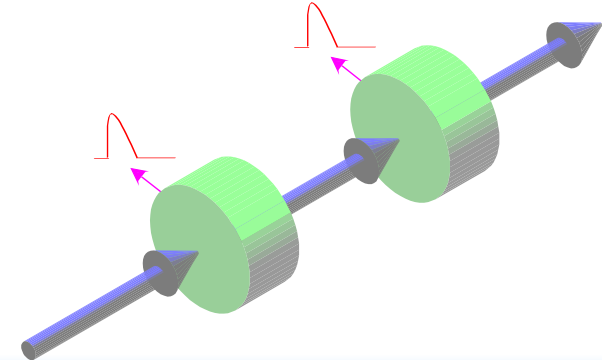
- Photodétection

- mesure de l'énergie du champ
 - quantification: nombre de photons
 - probabilités: statistique de photons
 - Répétabilité ?
- Photodétecteurs (PM, photodiode, rétine) absorbent les photons et convertissent leur énergie en signal (chimique, électrique...)
 - Démolition de l'état quantique par la détection
- Cette démolition n'est pas exigée par la mécanique quantique

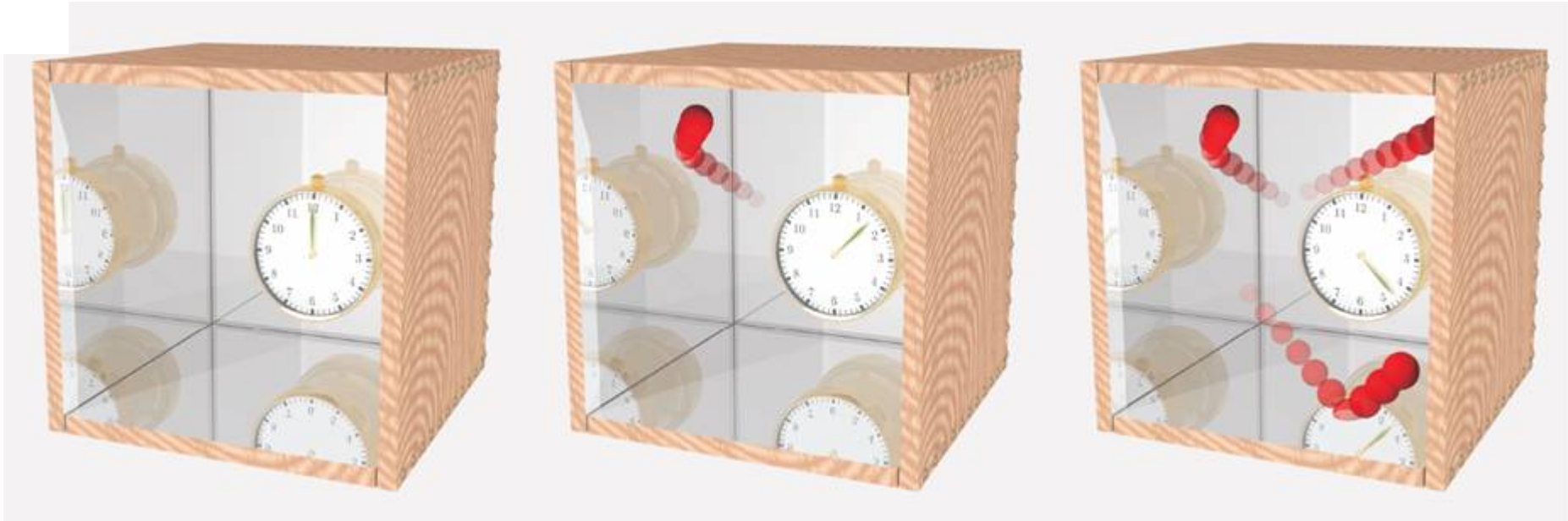


- Mesures sans démolition quantique (Braginsky, 70s)

- Un détecteur transparent
 - voit et revoit le même photon



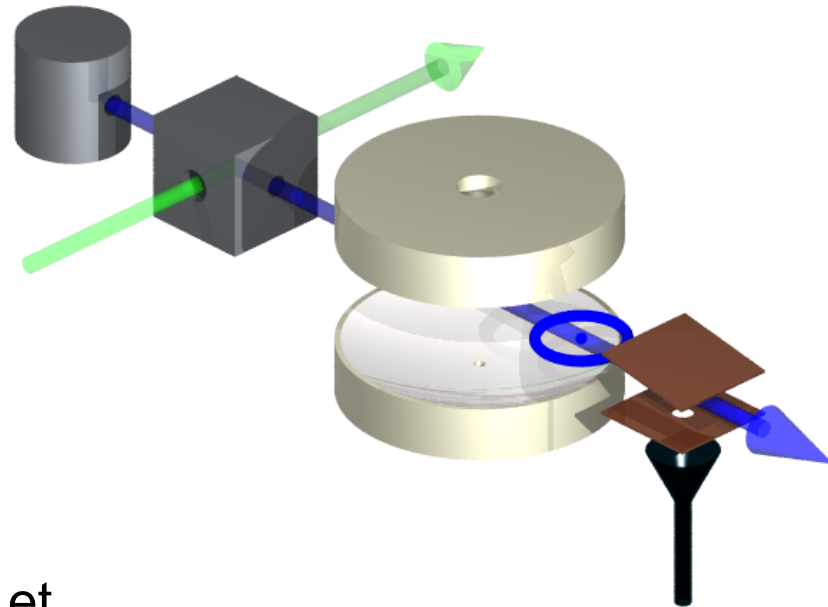
Peser un photon: une autre expérience de pensée



- 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 micro-onde (51 GHz) supraconductrice
 - le plus long temps de stockage



- Horloge
 - atomes de Rydberg circulaires
 - superpositions d'états préparées et sondées par interférométrie atomique

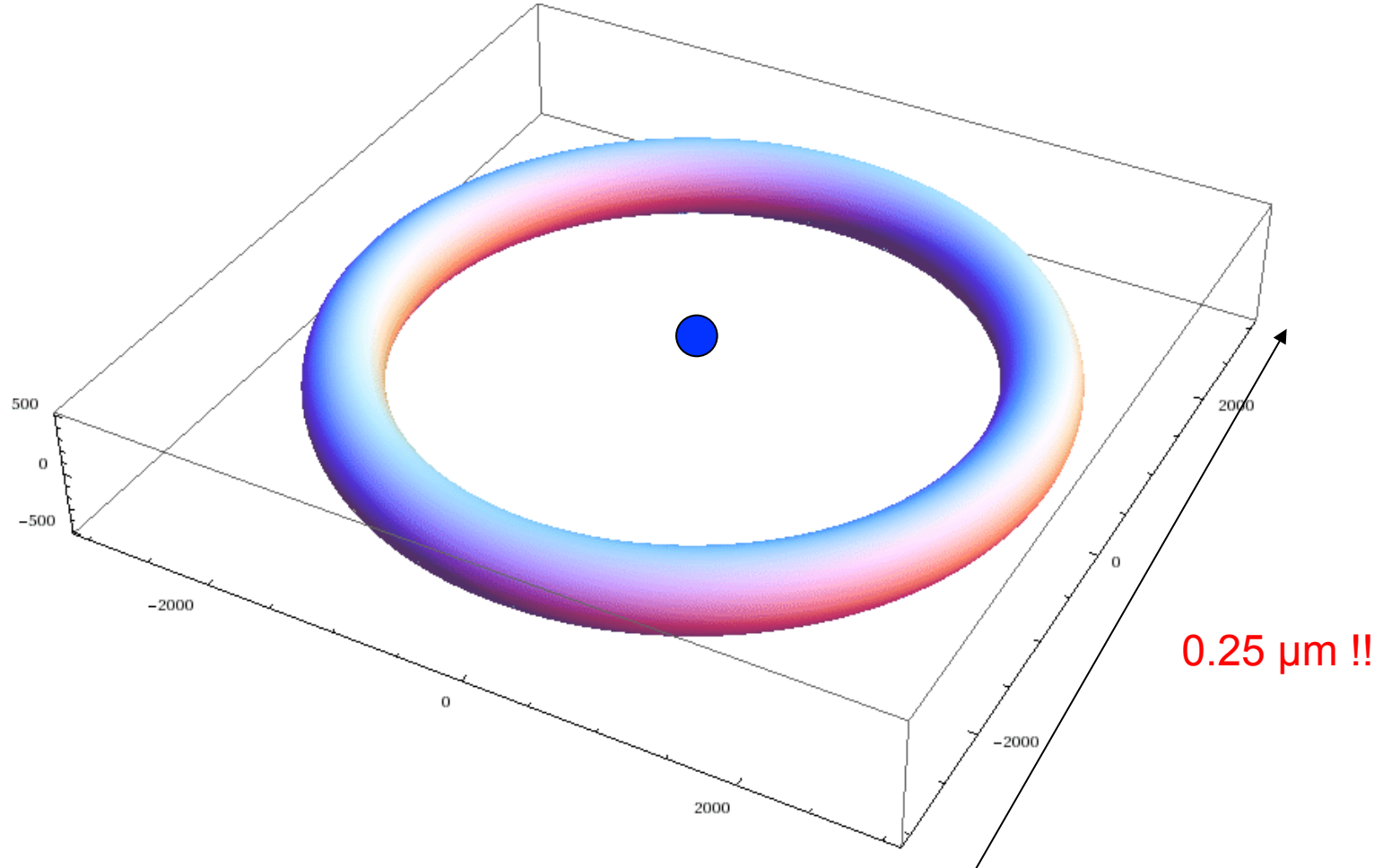
Une boîte à photons presque idéale

- Deux miroirs face à face
 - Séparation 3 cm
 - longueur d'onde 6 mm, 51 GHz
 - Supraconducteurs
 - pas de perte
 - réflexion presque parfaite
 - Temps de vie du photon 0.13s !
 - 1 milliard de rebonds
 - 40000km parcourus
 - Les meilleurs miroirs au monde



Atomes de Rydberg circulaires

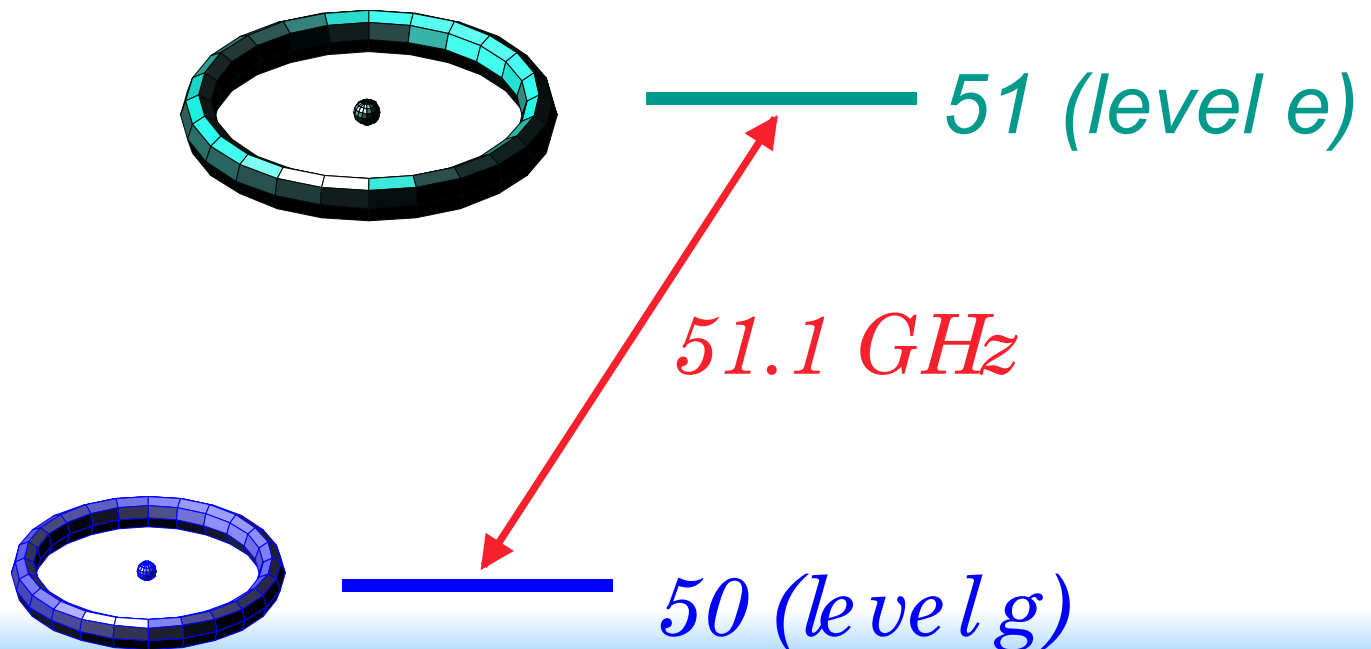
- Des atomes géants
 - Niveaux atomiques très excités



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

Atomes de Rydberg circulaires

- 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-résonnante (dispersive)
 - Pas d'échange d'énergie
 - Pas d'émission ou d'absorption
- Déplacements lumineux (Cohen-Tannoudji)
 - 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

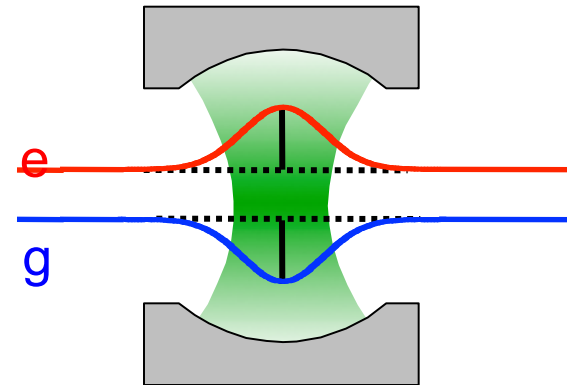
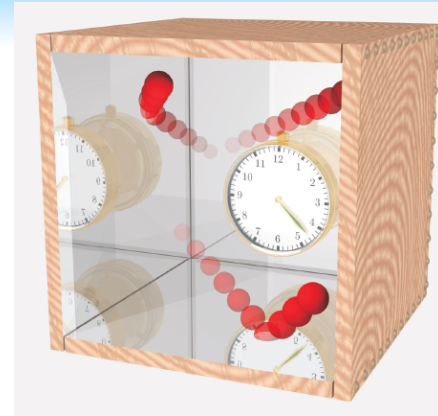
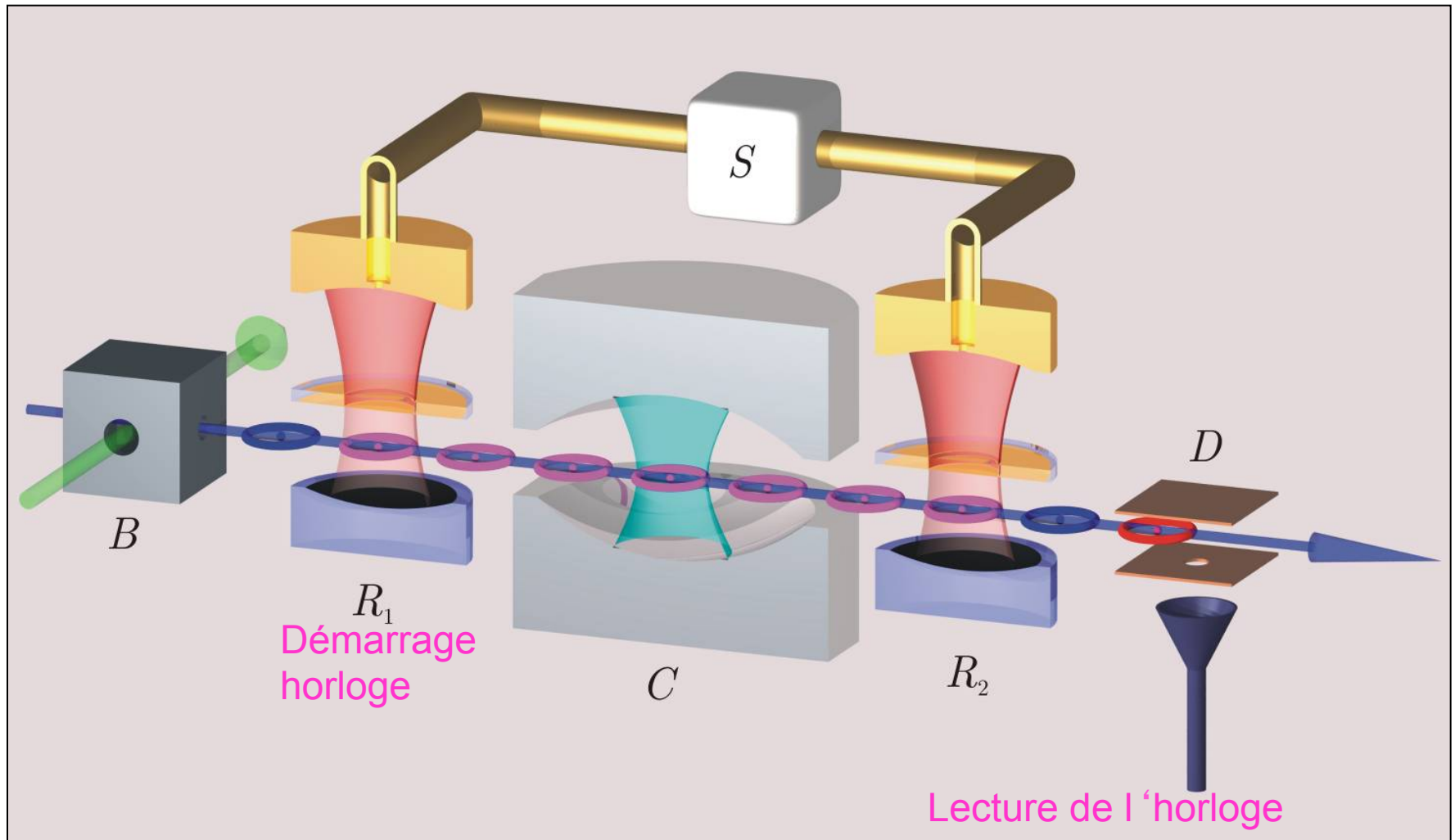
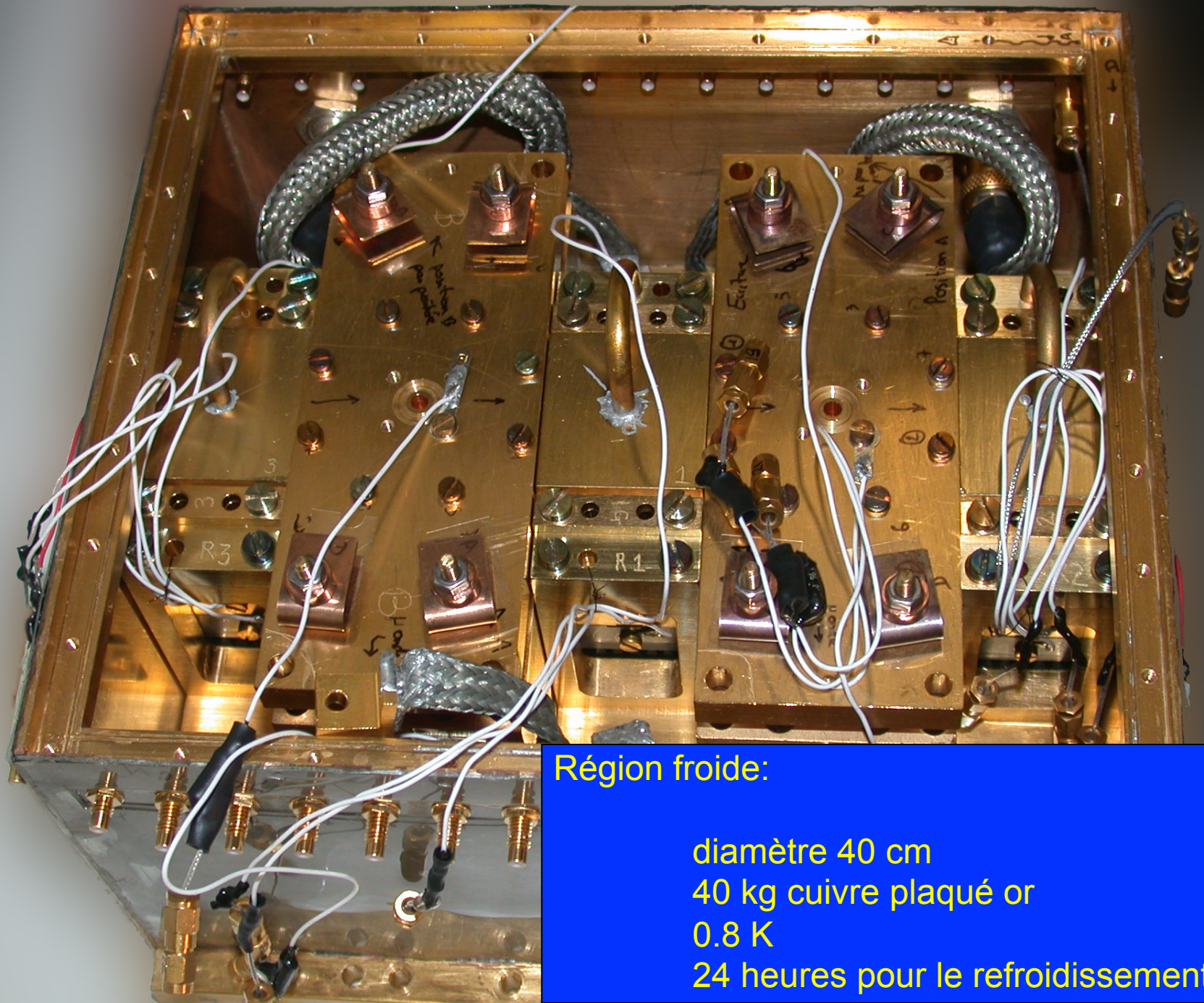


Schéma de l'expérience



La probabilité finale de détecter l'atome dans e ou g mesure le retard de l'horloge et dépend du nombre de photons



Région froide:

diamètre 40 cm

40 kg cuivre plaqué or

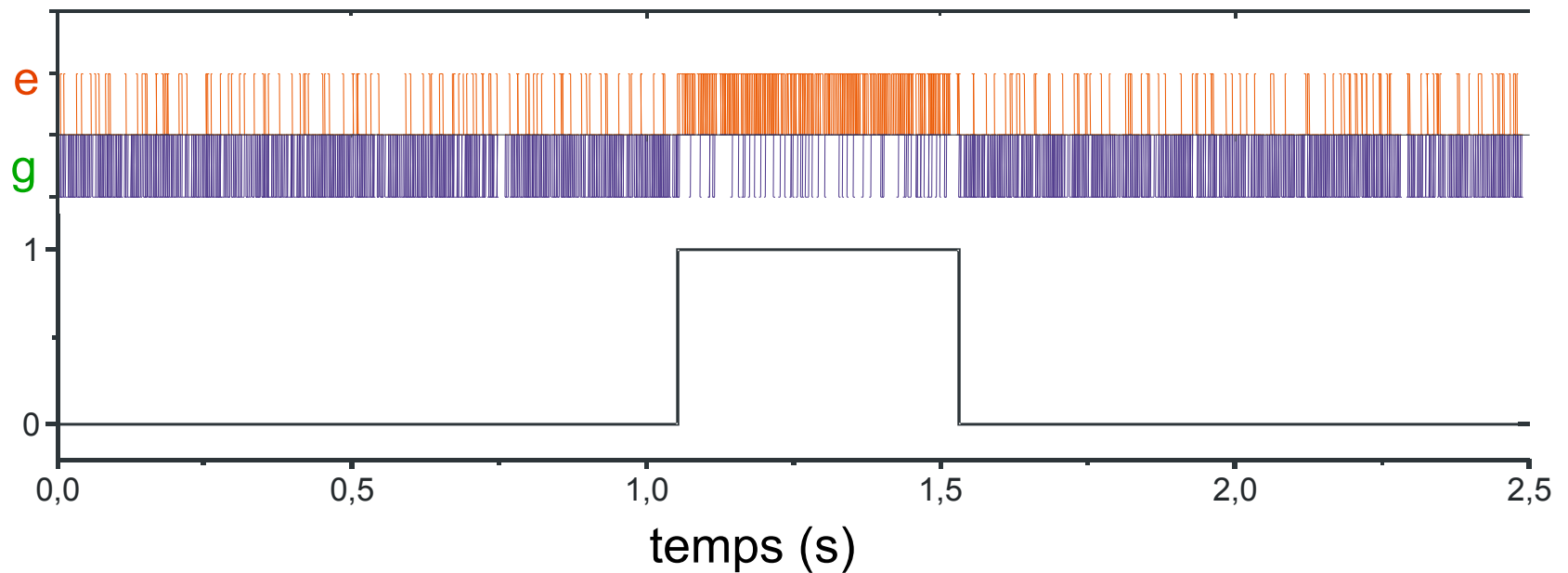
0.8 K

24 heures pour le refroidissement

Une situation simple

- La cavité contient zéro ou un photon
 - Champ thermique résiduel à 0.8 K.
 - 0.05 photons en moyenne
 - Cavité vide 95% du temps
 - Contient un photon 5% du temps
 - Photons présents pendant 0.13s en moyenne
- Réglage de l'horloge
 - Atome dans g si la cavité est vide
 - Atome dans e si elle contient un photon
 - NB l'énergie provient des champs classiques, pas de la cavité.
 - Il suffit d'un atome pour « voir » le photon
 - La détection de l'état atomique final donne directement le nombre de photons

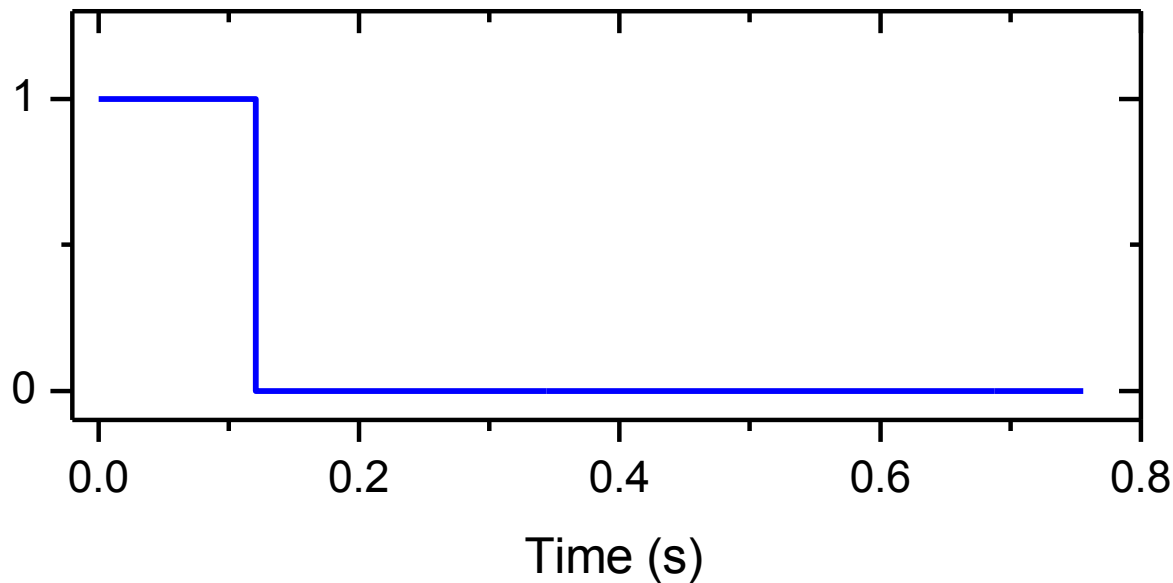
Naissance, vie et mort d'un photon unique



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

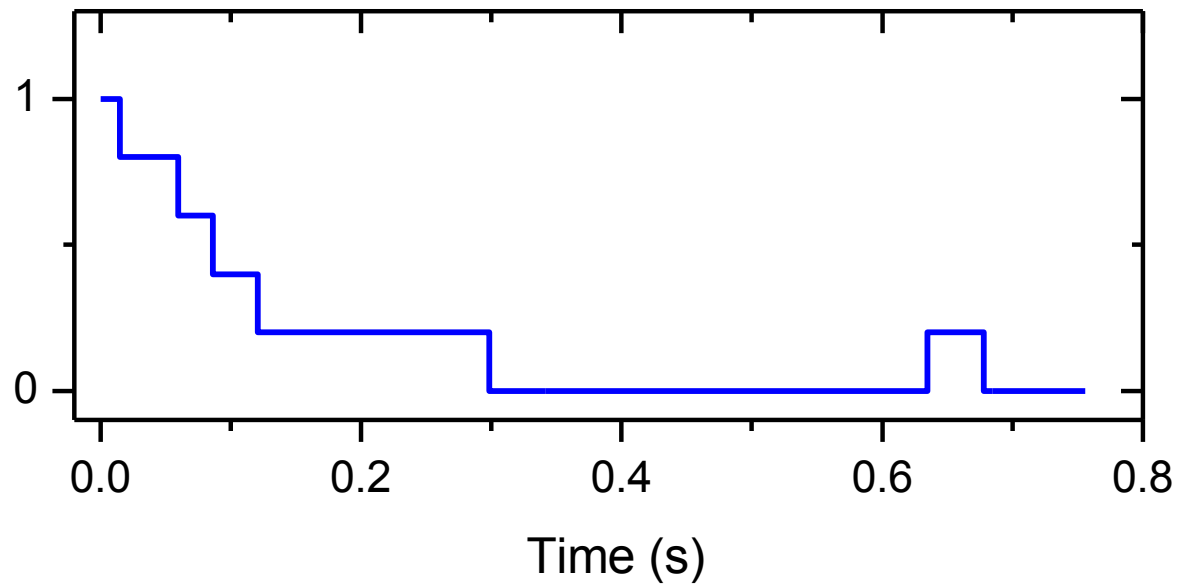
Mort d'un photon

1 séquence :

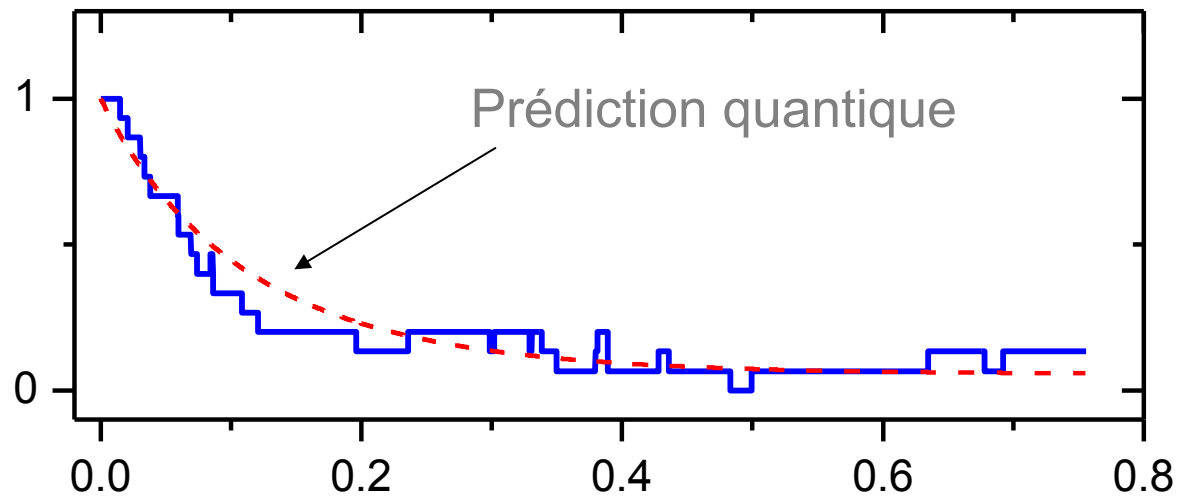


Signal 'télégraphique' complètement différent de la prédiction classique et de la prédiction quantique (amortissement graduel de l'énergie) ?

5 séquences :

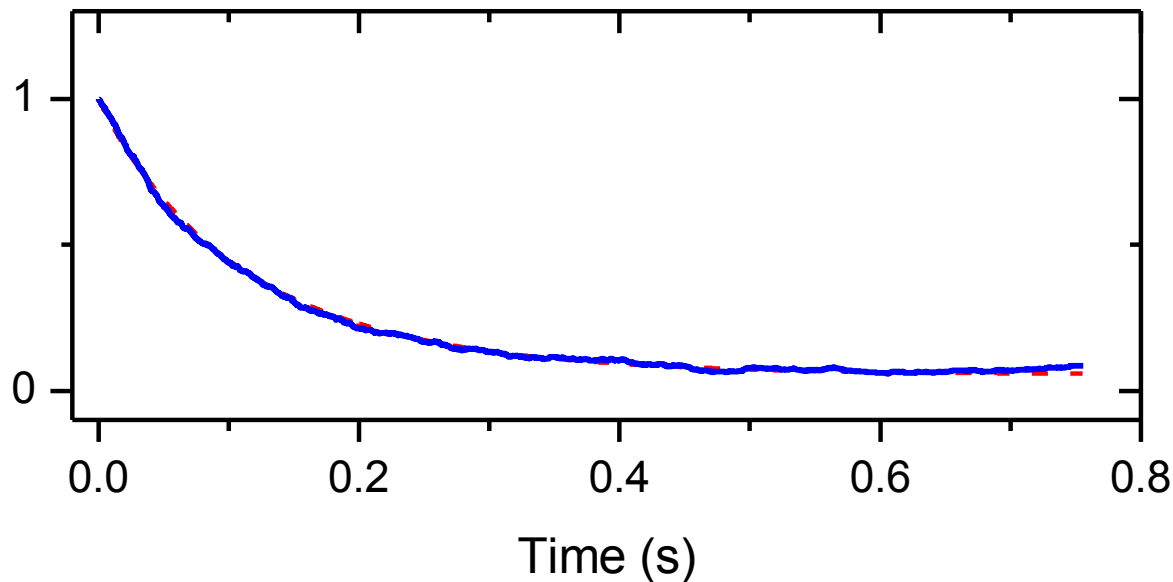


15 séquences :



Mort d'un photon

904 séquences :



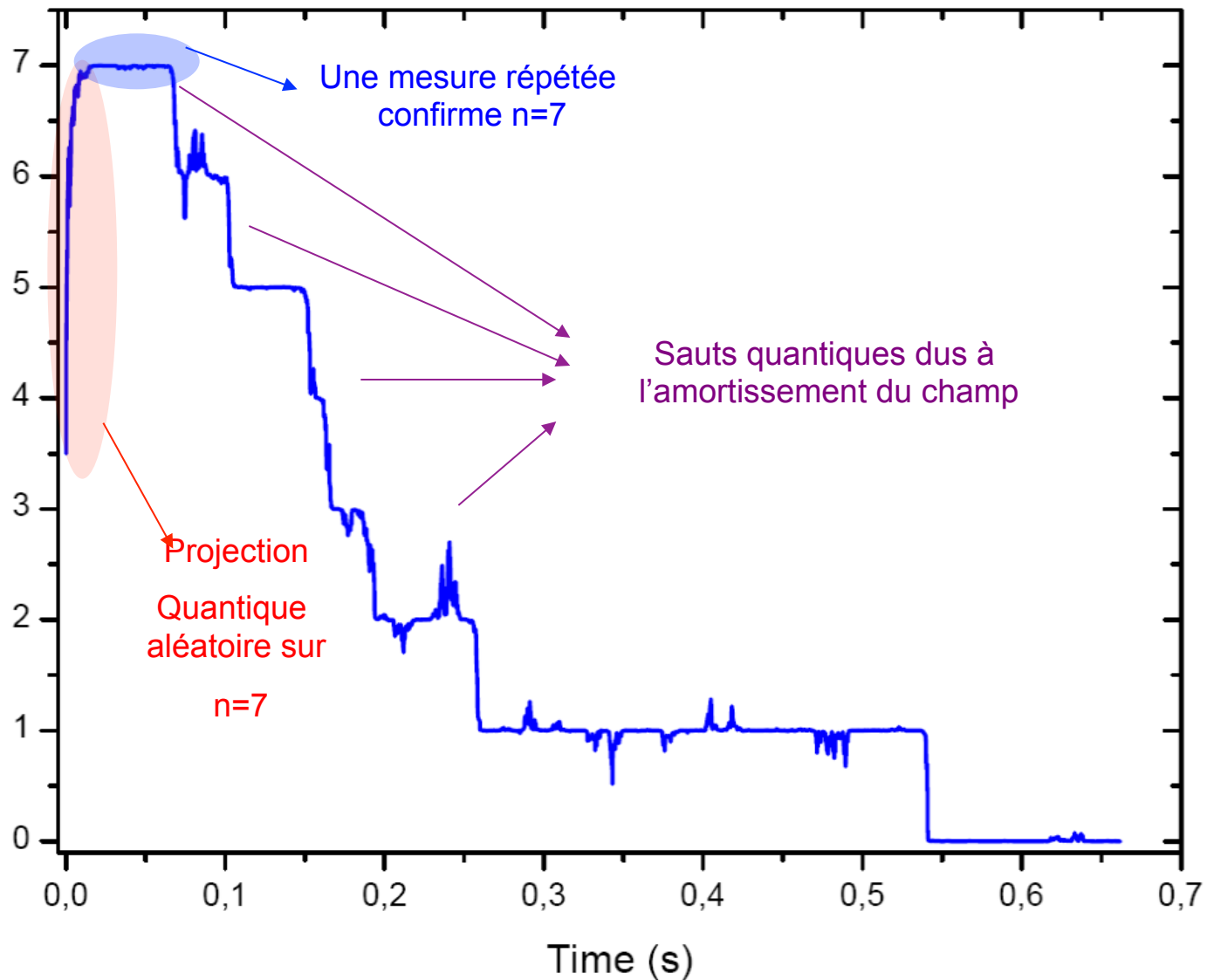
La mécanique quantique ne prédit pas le résultat d'une expérience unique
elle ne prédit que des probabilités d'occurrence
ou des moyennes sur un grand nombre de réalisations

Illustration directe des postulats de la physique quantique

Compter jusqu'à 7 ?

- Un atome ne suffit pas
 - On ne peut pas compter de 0 à 7 avec un seul bit
- Utiliser l'information fournie par un grand nombre d'atomes
 - QND : les atomes ne changent pas le nombre de photons qu'ils mesurent ensemble
 - En pratique, 100 atomes détectés en 26 ms déterminent suffisamment les probabilités de détection de e et g pour mesurer le nombre de photons.

Une trajectoire quantique



Une mesure idéale du nombre de photons

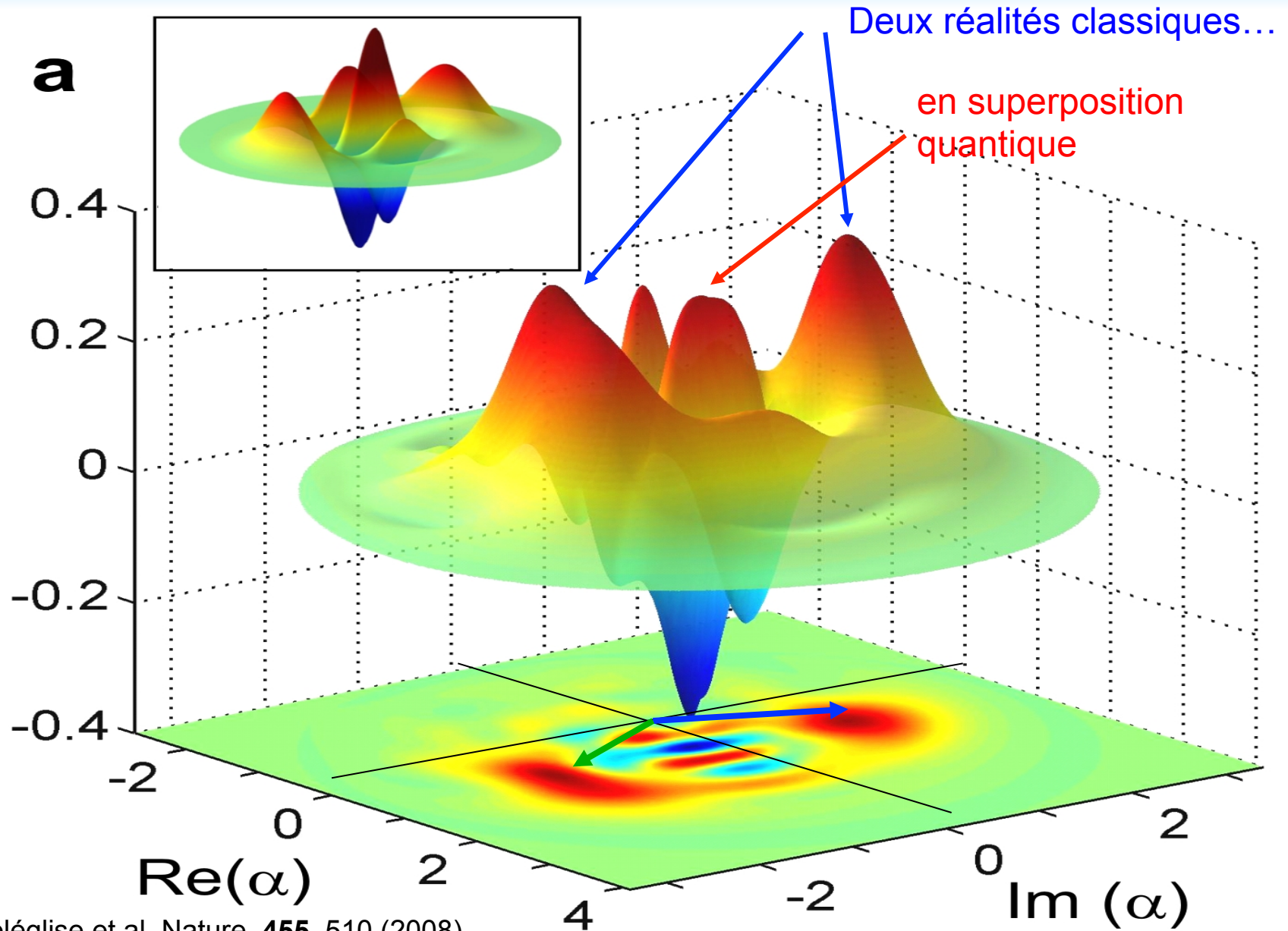
- Mesure sans démolition quantique (QND)
 - Un résultat quantifié
 - L'énergie du champ dans une boîte est quantifiée en multiples d'une quantité fondamentale $h\nu$
 - Un résultat aléatoire
 - Le résultat d'une expérience unique ne peut être prédit
 - 'Dieu joue aux dés'
 - Un résultat répétable
 - Le même photon est observé par des centaines d'atomes
 - Illustre tous les postulats de la mesure quantique
 - Prépare des états à nombre de photons certain
 - Des états fortement quantiques
 - Champ électrique nul mais énergie non nulle !

Fragilité des états quantiques

- Statistique des sauts quantiques
 - Durée de vie des états à nombre n de photon certains
 - T_c/n
 - D'autant plus courte que le nombre n de photons est plus grand
- Certains états quantiques (ceux qui ne 'ressemblent' pas à des états classiques) sont fragiles,
 - D'autant plus qu'ils sont 'grands' ou complexes.
 - Decohérence
 - Explique que nous n'observons à notre échelle qu'une petite partie des états possibles
 - Pas de superpositions
 - Pas d'intrication
 - Pas de chats de Schrödinger
 - Mais n'exclut pas des chatons...



Portrait d'un chat de Schödinger



Sonder et apprivoiser la décohérence

- Premières explorations de la frontière classique-quantique
 - Mise en évidence directe de la décohérence
 - Un phénomène redoutablement efficace
 - Un obstacle à l'utilisation de l'étrangeté quantique à l'échelle macroscopique (ordinateur quantique)
- Mieux comprendre la décohérence...
 - « métrologie de la décohérence »
- Pour mieux la combattre
 - Correction d'erreurs quantique
 - Rétroaction quantique
 - Mesurer, estimer réagir
 - Stabilisation d'états à nombre de photons certain

X. Zhou *et al.*, PRL **108**, 243602 (2012) C. Sayrin *et al.* Nature, **477**, 73 (2011)

Conclusions et perspectives

- Une mesure presque idéale du nombre de photons
 - Illustre tous les postulats de la mesure
 - Prépare des états de Fock
- Une première exploration de la fragilité des états quantiques mésoscopiques
 - La vie d'un chat
- Un mécanisme de rétroaction quantique
 - Préparation d'états de Fock à la demande
 - Répare l'effet néfaste des sauts quantiques
- Perspectives
 - Une mesure QND optimale
 - Préservation d'états quantique par ingénierie de réservoir
 - Dynamique de Zénon quantique (QZD)

Le XXème siècle fut celui de la mécanique quantique.

Le XXI^{ème} siècle le sera aussi, sans doute...

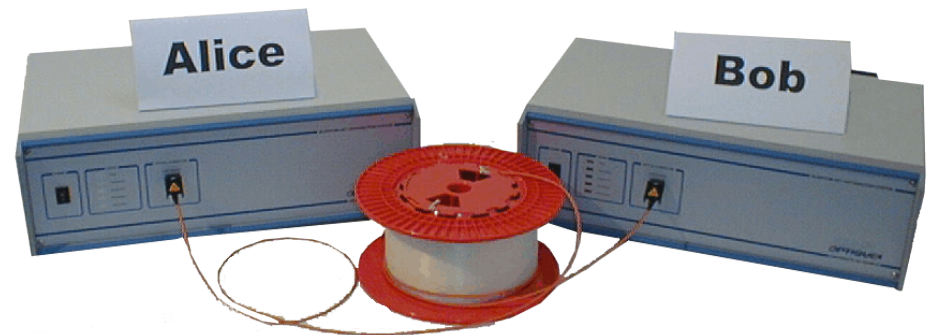
- Des illustrations expérimentales des postulats de base
 - Apprivoiser l'étrangeté quantique
- Des questions ouvertes fondamentales
 - Théorie de la mesure, compréhension et interprétation des postulats
 - Limites monde quantique/monde classique, décohérence
- Des applications à explorer:
 - Utiliser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

Cryptographie quantique

- Partager des clés secrètes
 - One-time pad
 - Méthode de codage sûre
 - Autant de clé que de message
 - Transmission par un canal quantique
 - Mesure (espion) change l'information
 - Toute écoute décelable
 - Déjà commercial
 - Utile?



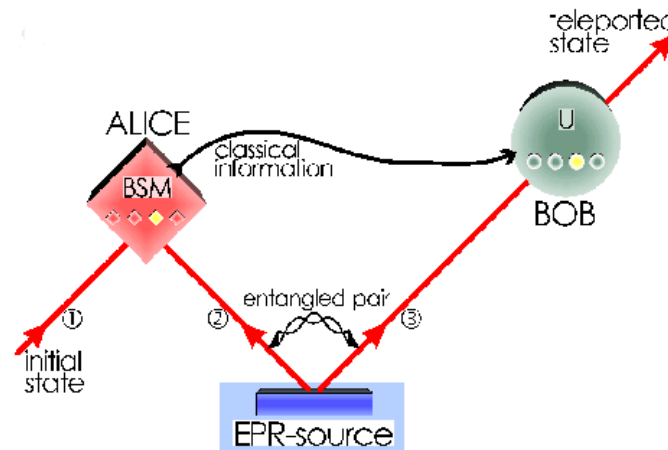
08316	88767	08762	63/83	76487	06267	69068
61844	68432	46051	81931	78272	03023	46991
69140	10399	44713	40019	44679	09280	05756
23797	48279	65867	08709	58395	94588	72377
62793	41149	42357	47451	62133	71390	45511
85680	09338	07119	45824	10428	47878	17823
63095	87089	58672	71528	72843	93707	49876
48794	07884	49128	80098	62982	98696	87716
01989	84869	96997	51516	34722	71395	28786
32726	50833	82088	28727	68626	31833	75111
84860	19471	78213	76699	88830	42540	66610
16276	69204	50291	94311	56456	73373	35741
77727	28366	58976	46760	97613	05867	63237
12864	35601	94508	52060	57871	52509	78663
89721	53567	42474	98720	44484	57361	31872
21773	78208	76926	38396	32676	03946	41883
61818	00621	07408	75575	67230	67808	81772
80001	78829	73324	03881	99806	60744	28175
15439	76858	98767	26796	59377	93987	62946
28897	30542	38091	48169	48423	46825	73171
31221	06910	26758	61895	97740	39702	35067
58728	73333	00077	15882	45850	65672	88728
06389	25067	32247	88011	82423	32381	22798
54082	98332	32214	93193	67933	97153	00513



Téléportation quantique

- Un fax quantique

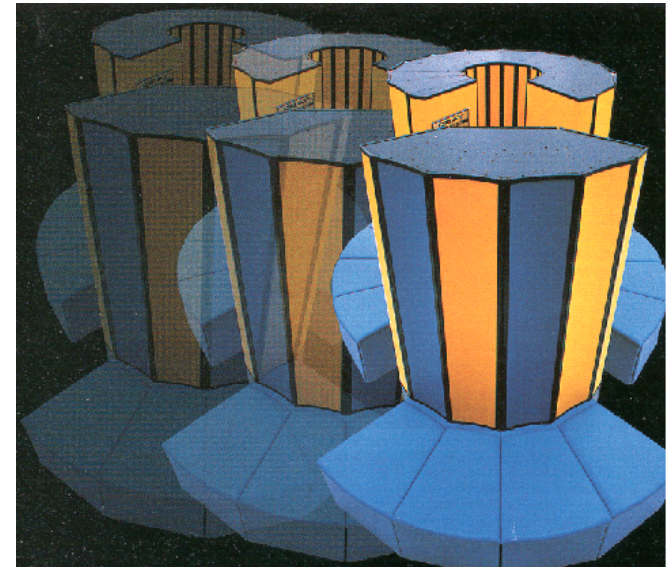
- Transmet a distance, à la vitesse de la lumière, l'état quantique d'une particule



- Fonctionne avec des photons et des atomes
- Une superbe illustration de la non-localité quantique
- Un outil pour la communication quantique
- Pas une solution au problème des transports en commun

Ordinateur quantique

- Des bits et des qubits
 - Ordinateur classique manipule des bits: 0 OU 1
 - Ordinateur quantique manipule des qubits: 0 ET 1
 - Superposition quantique de tous les calculs possibles
 - Infiniment plus efficace qu'une machine classique
- Réalisé: quelques opérations, quelques qubits
Intéressant pour la simulation de systèmes quantiques
- Difficulté essentielle
 - Décohérence: l'ordinateur quantique est un chat de Schrödinger !



Explorer le monde quantique avec des atomes et des cavités

- I. Introduction à l'électrodynamique quantique en cavité
- II. Un spin, un oscillateur: le modèle de Jaynes et Cummings
- III. Voir un photon sans l'absorber
- IV. Complémentarité, chats de Schrödinger et décohérence
- V. Combattre la décohérence

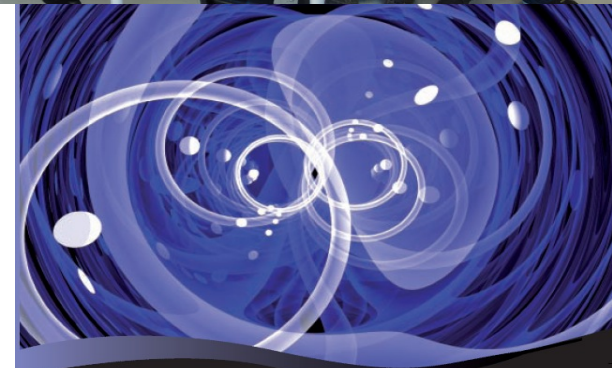
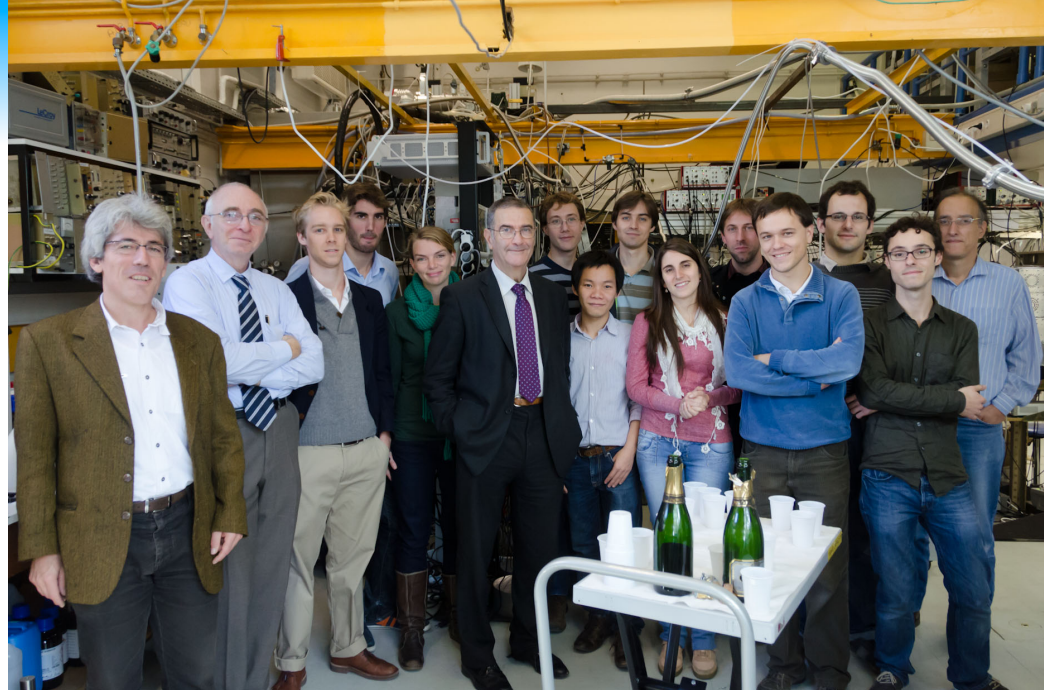
Un travail d'équipe

- Serge Haroche et Michel Brune



Un travail d'équipe

- S. Haroche, M. Brune, JM Raimond, S. Gleyzes, I. Dotsenko,
- Cavity QED experiments
 - S. Gerlich
 - C. Sayrin, X. Zhou,
 - B. Peaudecerf, T. Rybarczyk,
 - A. Signolles, A. Facon, E. Dietsche
- Superconducting atom chip
 - R. Teixeira, C. Hermann,
 - Thanh Long Nguyen, T. Cantat-Moltrecht
- Collaborations:
 - **Cavités**: P. Bosland, B. Visentin, E. Jacques
 - CEA Saclay (DAPNIA)
 - **Rétroaction**: P. Rouchon, M. Mirrahimi, A. Sarlette
 - Ecole des Mines Paris
 - **QZD**: P. Facchi, S. Pascazio
 - Uni. Bari and INFN
- €€:ERC (Declic), EC (Aqute, CCQED),
 - ANR (QUSCO), CNRS, UMPC, IUF, CdF



Exploring the Quantum

Atoms, Cavities, and Photons

www.cqed.org

Serge Haroche and
Jean-Michel Raimond

OXFORD GRADUATE TEXTS

Un travail d'équipe... sur la durée (1973-2014)

- Par ordre d'entrée en scène

- Serge Haroche

- Michel Gross

- Claude Fabre

- Philippe Goy

- Pierre Pillet

- Jean-Michel Raimond

- Guy Vitrant

- Yves Kaluzny

- Jun Liang

- Michel Brune

- Valérie Lefèvre-Seguin

- Jean Hare

- Jacques Lepape

- Aephraim Steinberg

- Andre Nussenzveig

- Frédéric Bernardot

- Paul Nussenzveig

- Laurent Collot

- Matthias Weidemuller

- François Treussart

- Abdelamid Maali

- David Weiss

- Vahid Sandoghdar

- Jonathan Knight

- Nicolas Dubreuil

- Peter Domokos

- Ferdinand Schmidt-Kaler

- Jochen Dreyer

- Ed Hagley

- Xavier Maître

- Christoph Wunderlich

- Gilles Nogues

- Vladimir Ilchenko

- Jean-François Roch

- Stefano Osnaghi

- Arno Rauschenbeutel

- Wolf von Klitzing

- Erwan Jahier

- Patrice Bertet

- Alexia Auffèves

- Romain Long

- Sébastien Steiner

- Paolo Maioli

- Philippe Hyafil

- Tristan Meunier

- Perola Milman

- Jack Mozley

- Stefan Kuhr

- Sébastien Gleyzes

- Christine Guerlin

- Thomas Nirrengarten

- Cédric Roux

- Julien Bernu

- Ulrich Busk-Hoff

- Andreas Emmert

- Adrian Lupascu

- Jonas Mlynek

- Igor Dotsenko

- Samuel Deléglise

- Clément Sayrin

- Xingxing Zhou

- Bruno Peaudecerf

- Raul Teixeira

- Sha Liu

- Theo Rybarczyk

- Carla Hermann

- Adrien Signolles

- Adrien Facon

- Eva Dietsche

- Stefan Gerlich

- Than Long Nguyen

- Mariane Penasa

- Dorian Grosso

- Tigrane Cantat

- ...