

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS



« Voir » un photon sans le détruire

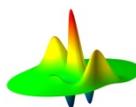
J.M. Raimond

*Université Pierre et Marie Curie
Laboratoire Kastler Brossel
Département de Physique
Ecole Normale Supérieure*



AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE
ANR

aqute



Declic

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

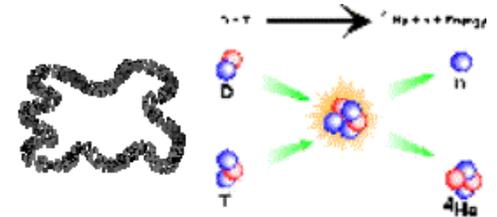
- L'exploration du monde microscopique a été la grande aventure scientifique du siècle dernier. La théorie quantique nous a donné les clés de la compréhension de ce monde...
- La théorie physique avec le plus vaste champ d'applications (des constituants élémentaires de la matière à la structure du cosmos)
- 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 »: la mécanique quantique continue à nous surprendre après près d'un siècle

Une réussite théorique sans précédent...

- Un énorme champ d'applications

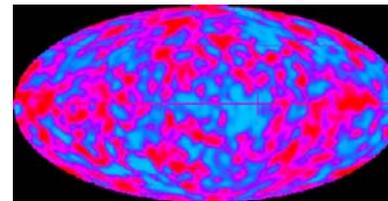
- Des constituants élémentaires (cordes et particules)

- 10^{-35} m à 10^{-15} m



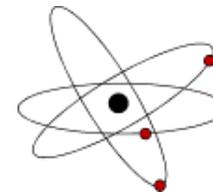
- Aux structures cosmologiques

- 10^{26} m



- En passant bien sûr par les atomes

- 10^{-10} m



- Des prédictions d'une précision extrême

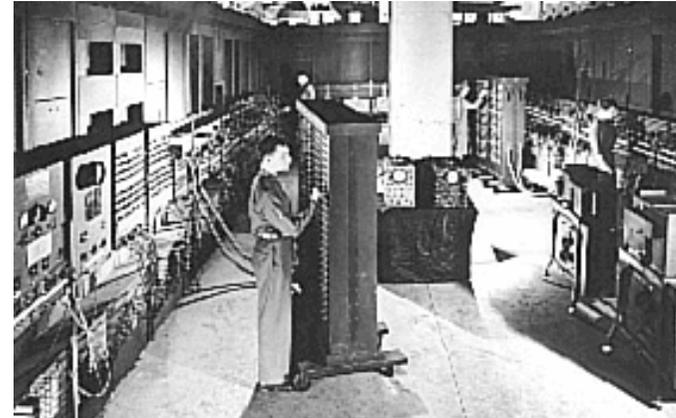
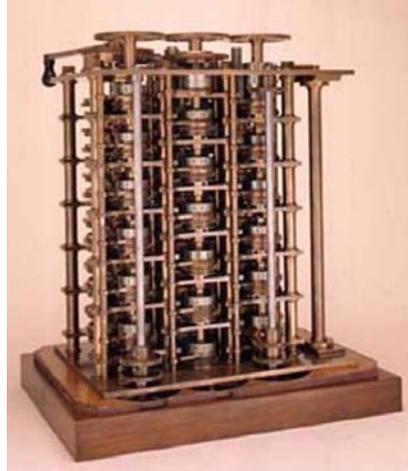
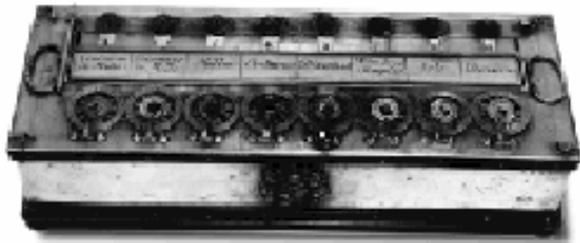
- Accord théorie-expérience sur 12 chiffres !

- Un cadre théorique universel

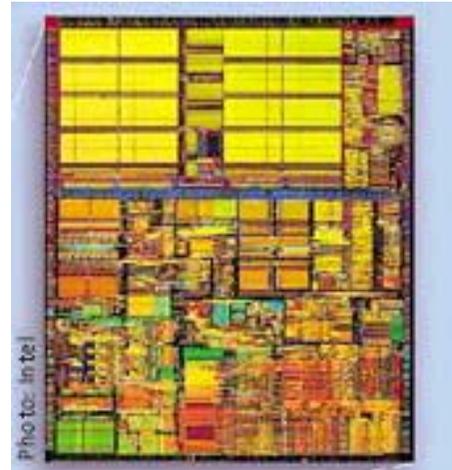
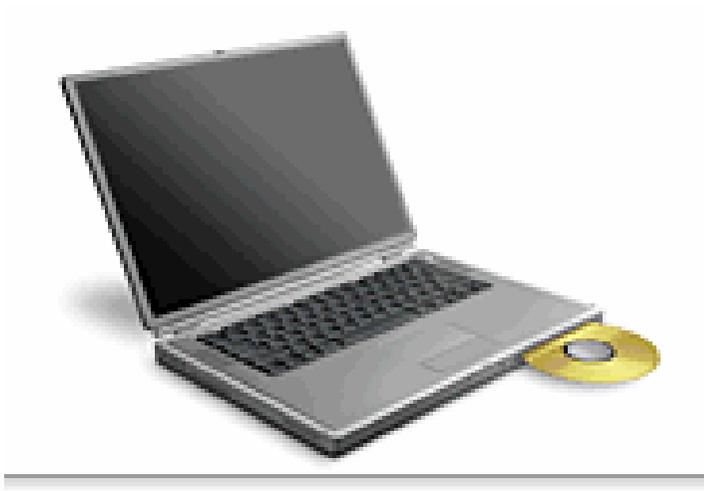
- Toutes les interactions fondamentales de la nature dans un cadre unique (sauf la gravité)

Des applications d'une importance considérable

- **Calculateurs**
 - Technologie classique: de la pascaline à l'ENIAC

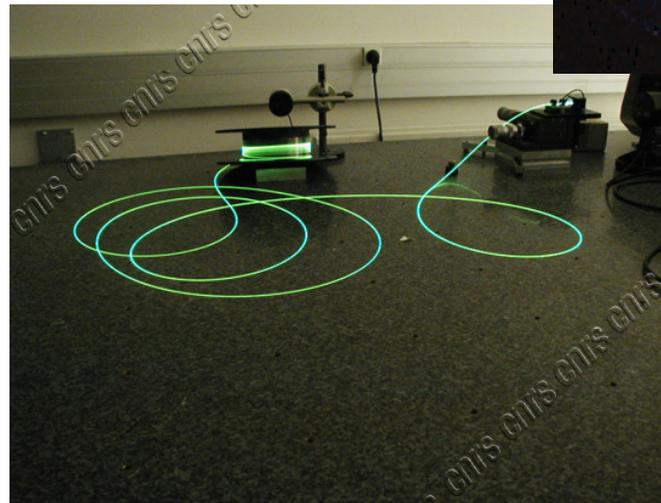
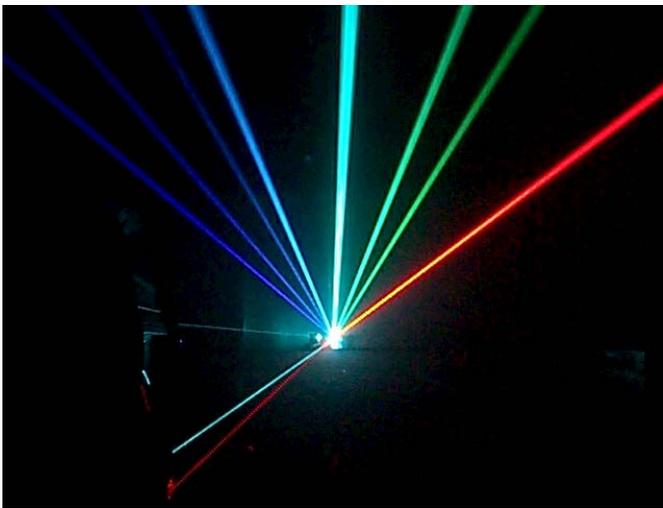


- Physique quantique des solides: transistors et circuits intégrés



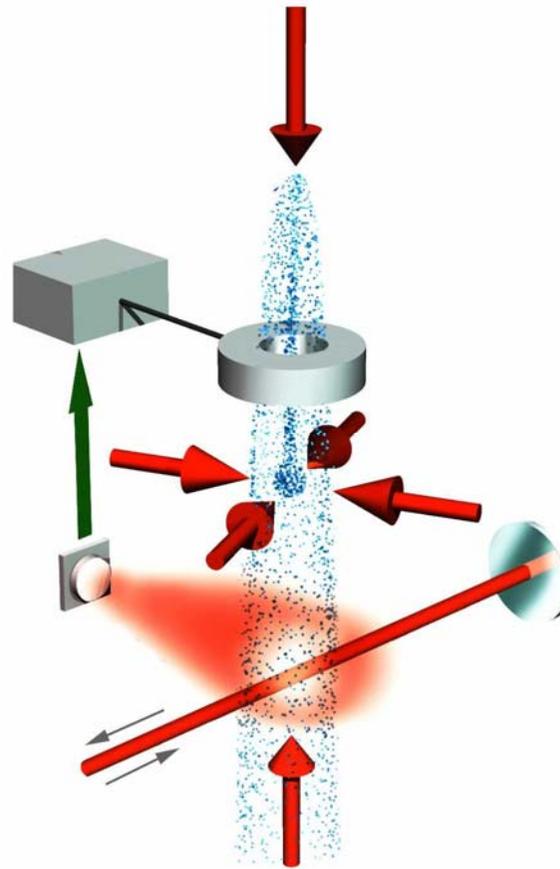
Des applications d'une importance considérable

- Lasers
 - Einstein 1917: émission stimulée
 - Applications considérable et énorme impact économique



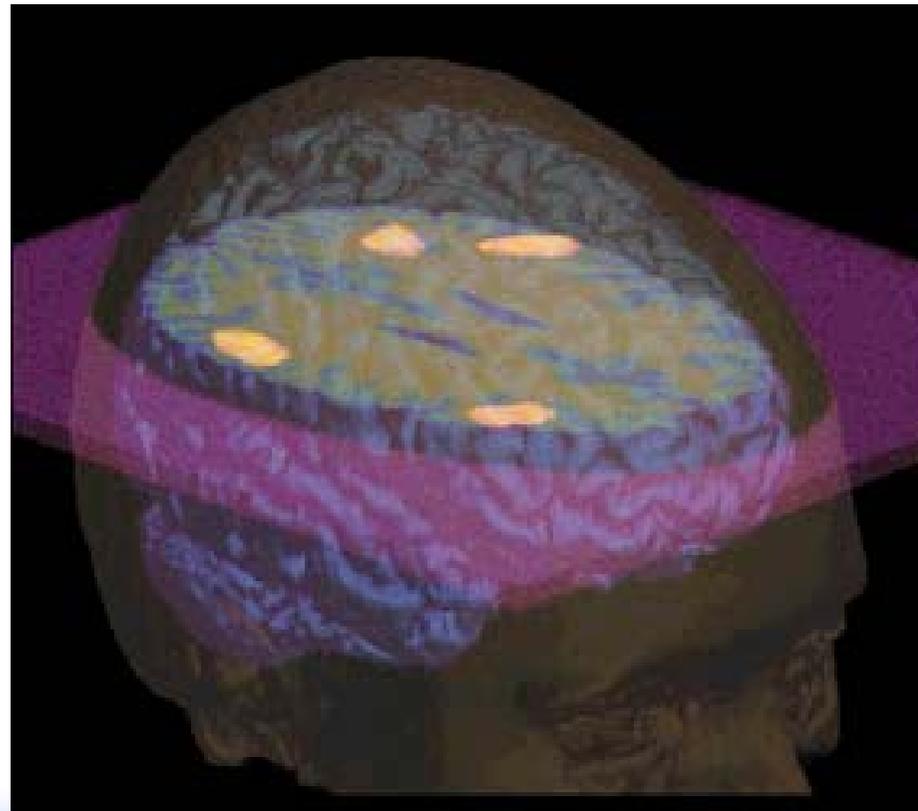
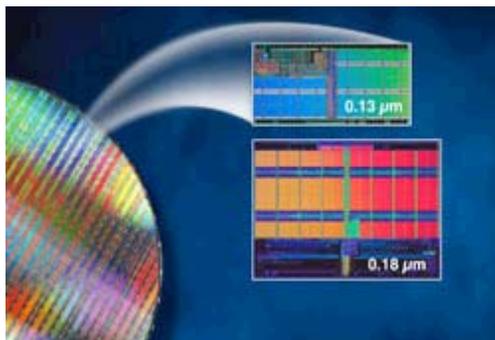
Des applications d'une importance considérable

- Horloges atomiques
 - Laser, atomes et ions
 - Une précision de 10^{-17} (1s sur l'âge de l'univers)
 - GPS etc...



Des applications d'une importance considérable

- Imagerie par résonance magnétique nucléaire
 - Danse quantique des protons (eau) dans un champ magnétique
 - Une méthode d'imagerie sans précédent
 - Repose sur trois technologies quantiques
 - Aimants supraconducteurs, RMN, et ordinateurs



Et cependant

- Sans doute la théorie physique la moins intuitive
 - De nombreux phénomènes quantiques sont totalement contraires au ‘bon sens’ et à l’intuition, formés par le monde classique
 - Superposition d’états
 - Mesure quantique
 - Intrication
 - Non-localité

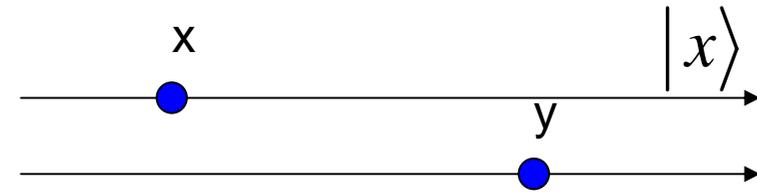
Ne sont pas appréhendables par des concepts hérités du monde classique
 - Les « pères fondateurs » de la mécanique quantique ont totalement renouvelé notre vision du réel
 - Et nous ont ouvert un monde où l’impossible devient la règle...

Superpositions quantiques

- 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

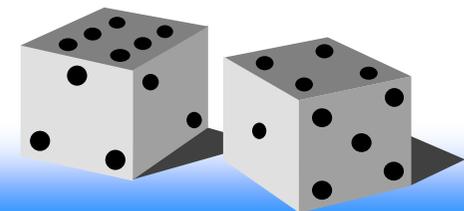


Une particule dans deux endroits *à la fois* ???

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 » $|y\rangle$

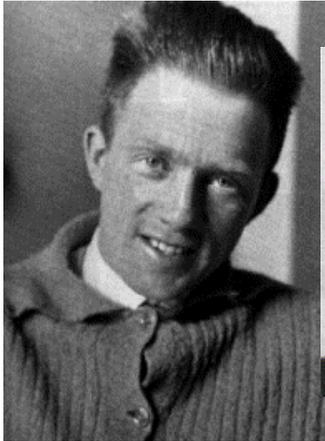
- Une seconde mesure immédiatement après la première donne le même résultat

- 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)

Genèse et expériences de pensée

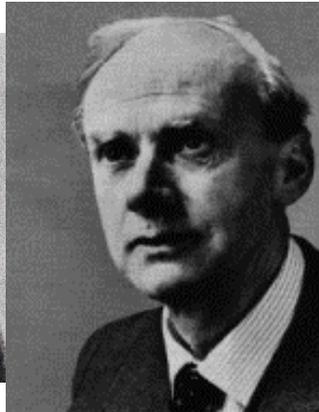
- 1925-1930: naissance de la théorie quantique moderne



Heisenberg



Schrödinger



Dirac

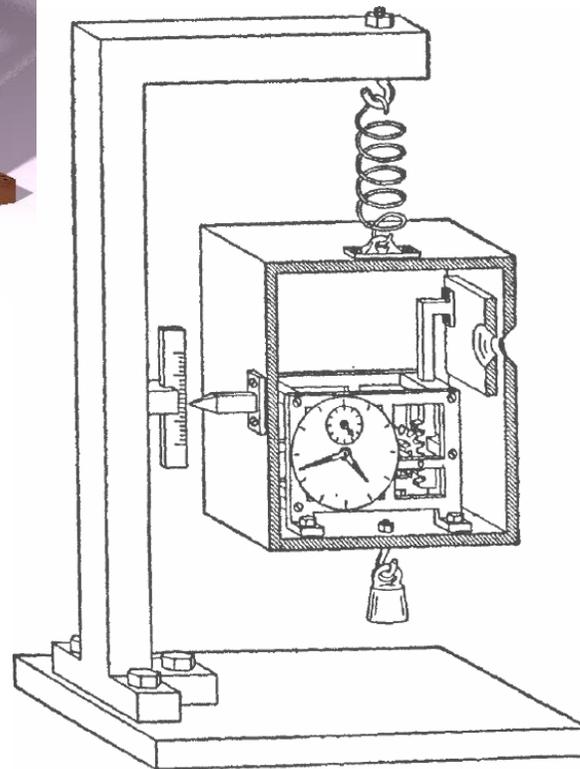
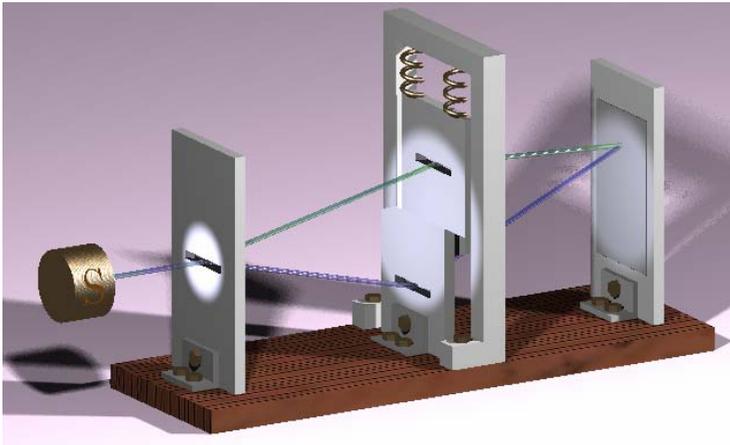


1927 Congrès Solvay

- Développement du formalisme et de son interprétation
- Pas de lien direct entre les objets du formalisme et la réalité
 - Les pères fondateurs de la physique quantique utilisaient des expériences de pensée pour comprendre ce lien et interpréter la théorie

Genèse et expériences de pensée

- Interféromètres à photons uniques, boîtes à photons, chats de Schrödinger

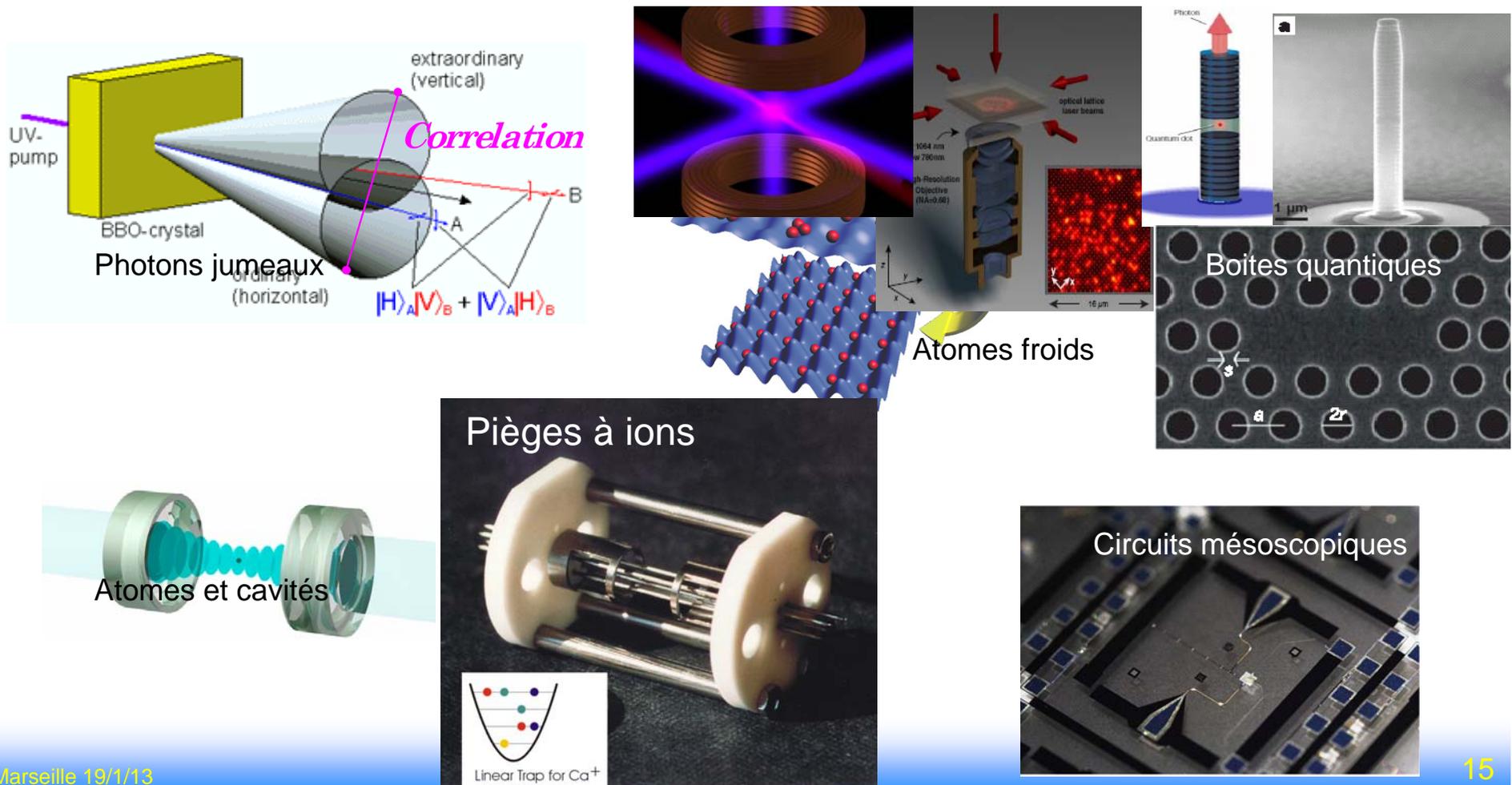


Les expériences de pensée deviennent réelles

- Des outils pour réaliser ces expériences de pensée
 - Lasers, ordinateurs.... qui nous permettent de manipuler et contrôler des particules quantiques uniques et de donner tort à 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.... »
- Pour
 - Mieux apprivoiser l'étrangeté quantique
 - Explorer la limite quantique/classique
 - Rêver à des applications
 - Traitement quantique de l'information

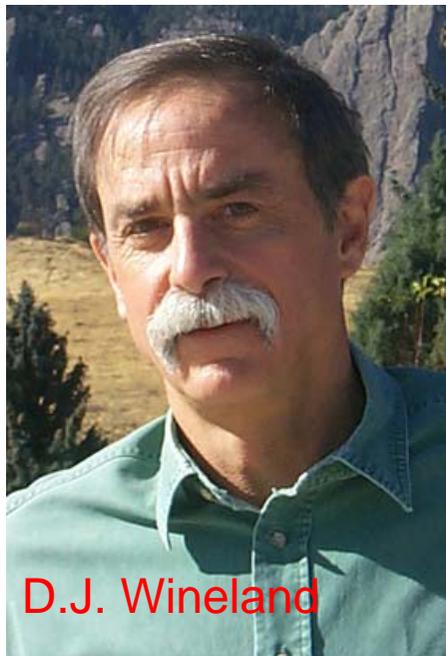
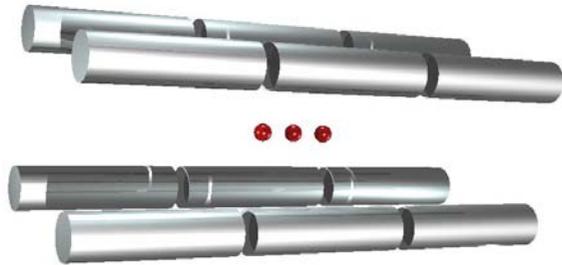
Les expériences de pensée deviennent réelles

- Comment?
 - Étudier des systèmes quantiques individuels dans un environnement parfaitement contrôlé
 - Un domaine très actif et un grand nombre de techniques



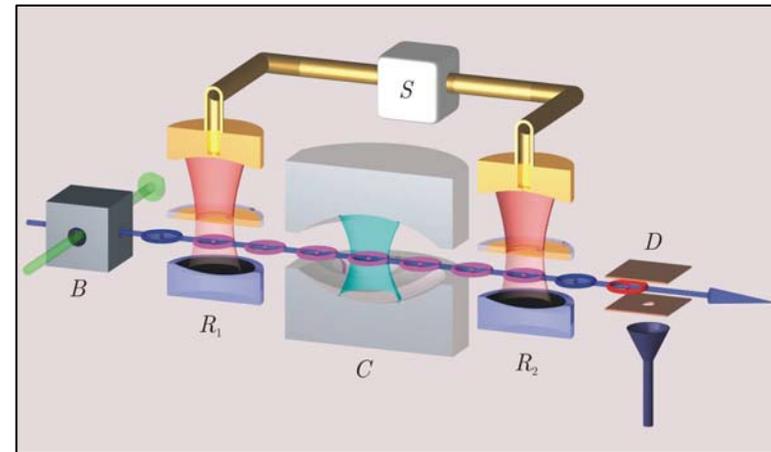
Deux architectes d'expériences de pensée réalisées

- Ions piégés



D.J. Wineland

- Atomes et cavités



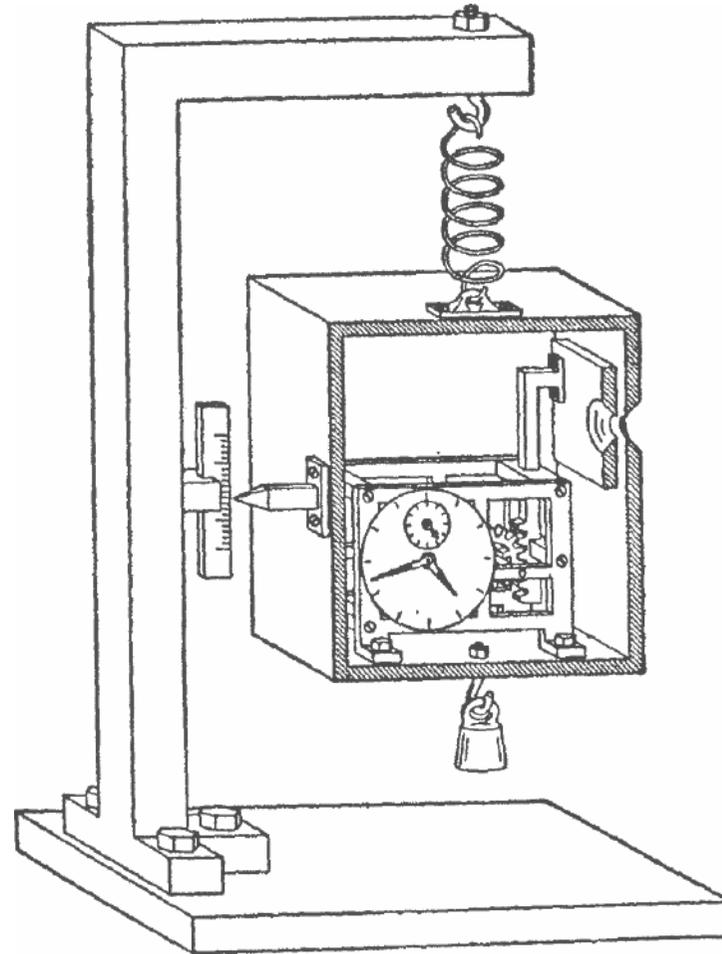
Prix Nobel de physique 2012



S. Haroche

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

- Retour sur les postulats de la mesure quantique

- Pour une mesure idéale

- Discontinuité quantique

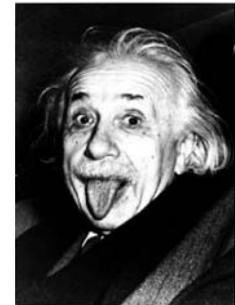
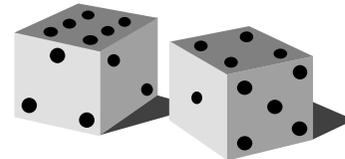
- tous les résultats ne sont pas autorisés

- $E=nh\nu$

- Probabilités

- prédiction des probabilités d'obtention des résultats

- » 'Dieu joue aux dés'



- Répétabilité ou projection de l'état

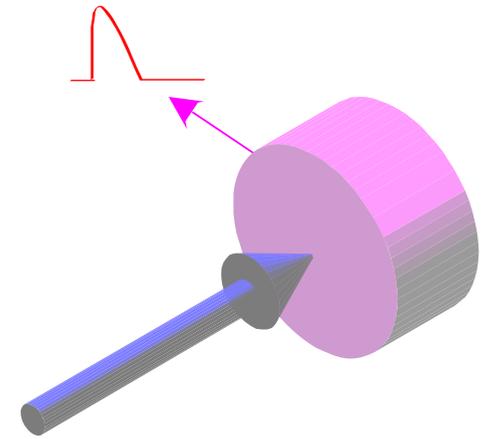
- deux mesures identiques dans un court intervalle de temps donnent le même résultat

Mesures idéales et mesures réelles

- La plupart des mesures sont loin d'être idéales

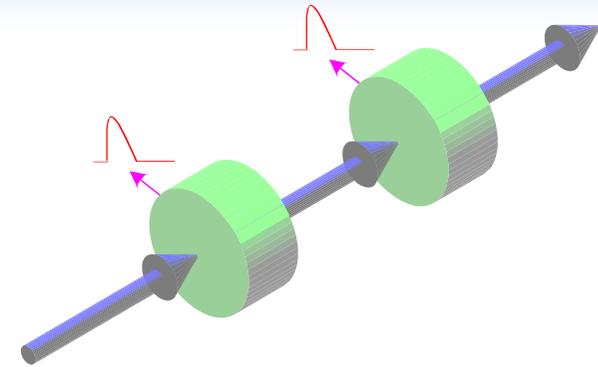
- Photodétection

- 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...)**
 - La seconde détection donne toujours zéro: on ne peut voir deux fois le même photon
 - **Démolition de l'état quantique par la détection**
- **Cette démolition n'est pas exigée par la mécanique quantique**

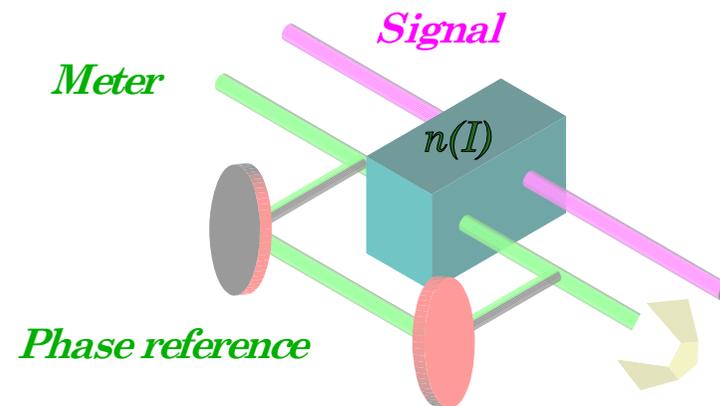


Comptage idéal de photons

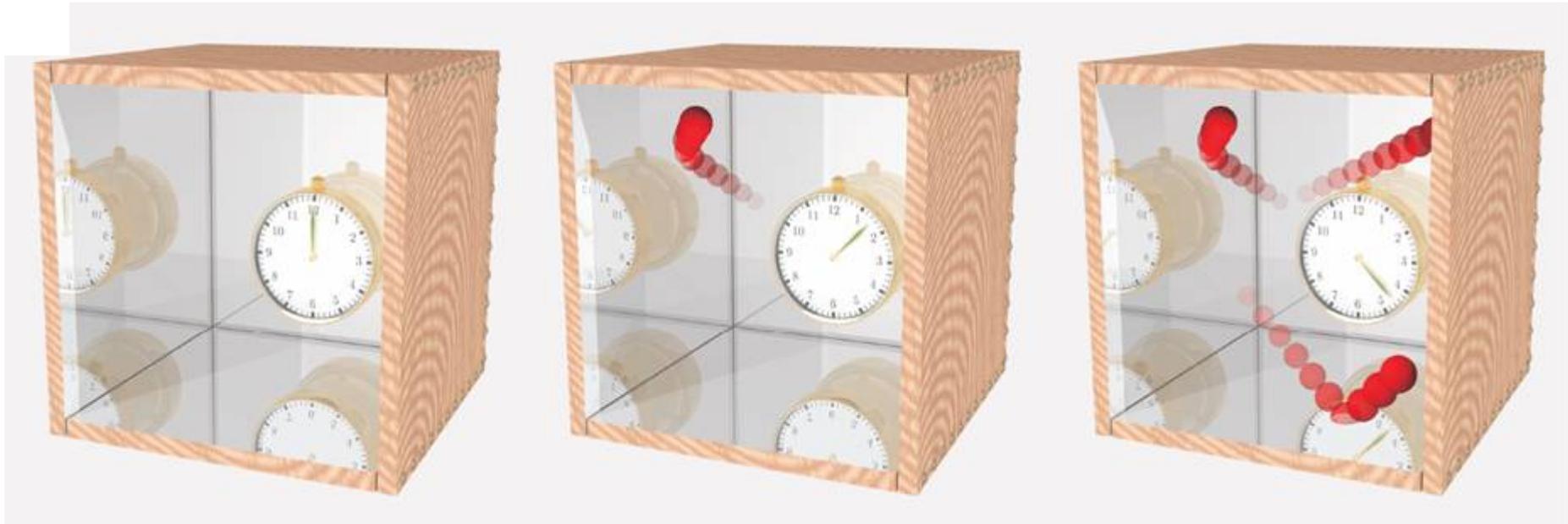
- Mesures sans démolition quantique (Braginsky, 70s)
 - Un détecteur transparent
 - voit et revoit le même photon



- Réalisé dans le domaine optique (Grangier et al, Nature, 396, 537)
 - pas au niveau du photon unique
 - non linéarité faible
 - faisceaux propageants:
 - répétition difficile et coûteuse



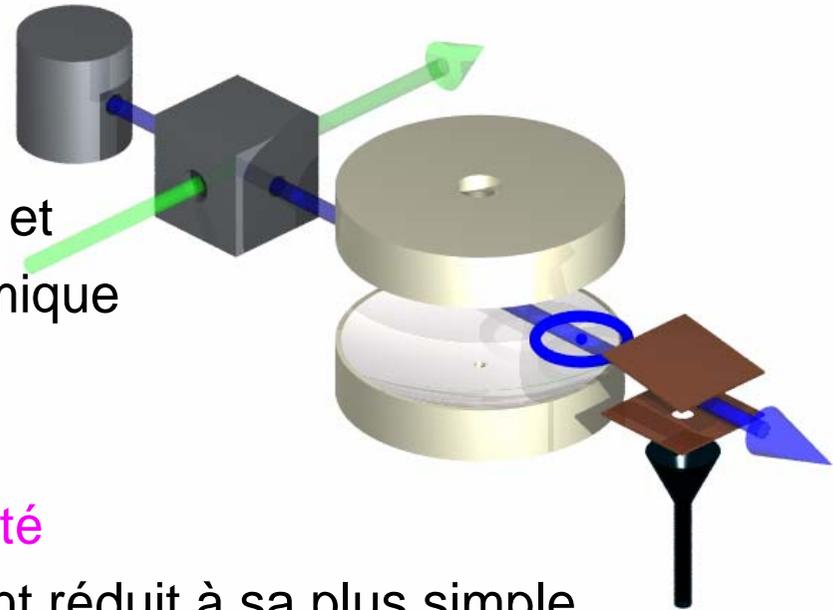
Peser un photon: une autre expérience de pensée



- 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
- Interaction
 - Electrodynamique quantique en cavité
 - Le couplage matière rayonnement réduit à sa plus simple expression:
 - Un seul atome
 - Un seul 'mode' du champ avec quelques photons



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**



Des atomes ultra-sensibles

- 'Atomes de Rydberg circulaires'

- Deux niveaux e et g

- Nombres quantiques 51 et 50

- Très stables

- Durée de vie 30 ms

- Transitions micro-onde

- Proche de la cavité

- Antennes géantes

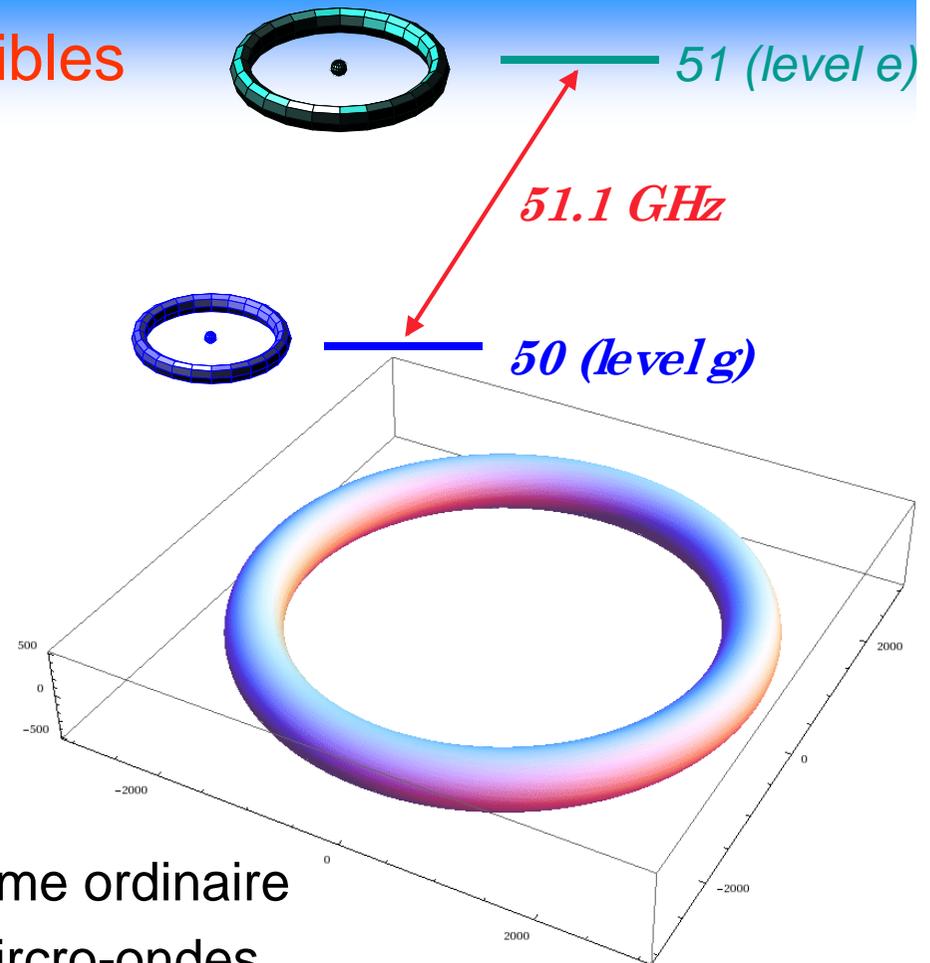
- Taille de l'ordre du μm
- 2500 fois plus 'gros' qu'un atome ordinaire
- Très fortement couplés aux micro-ondes

- Détectables un par un

- Mesure de leur état quantique (e ou g)

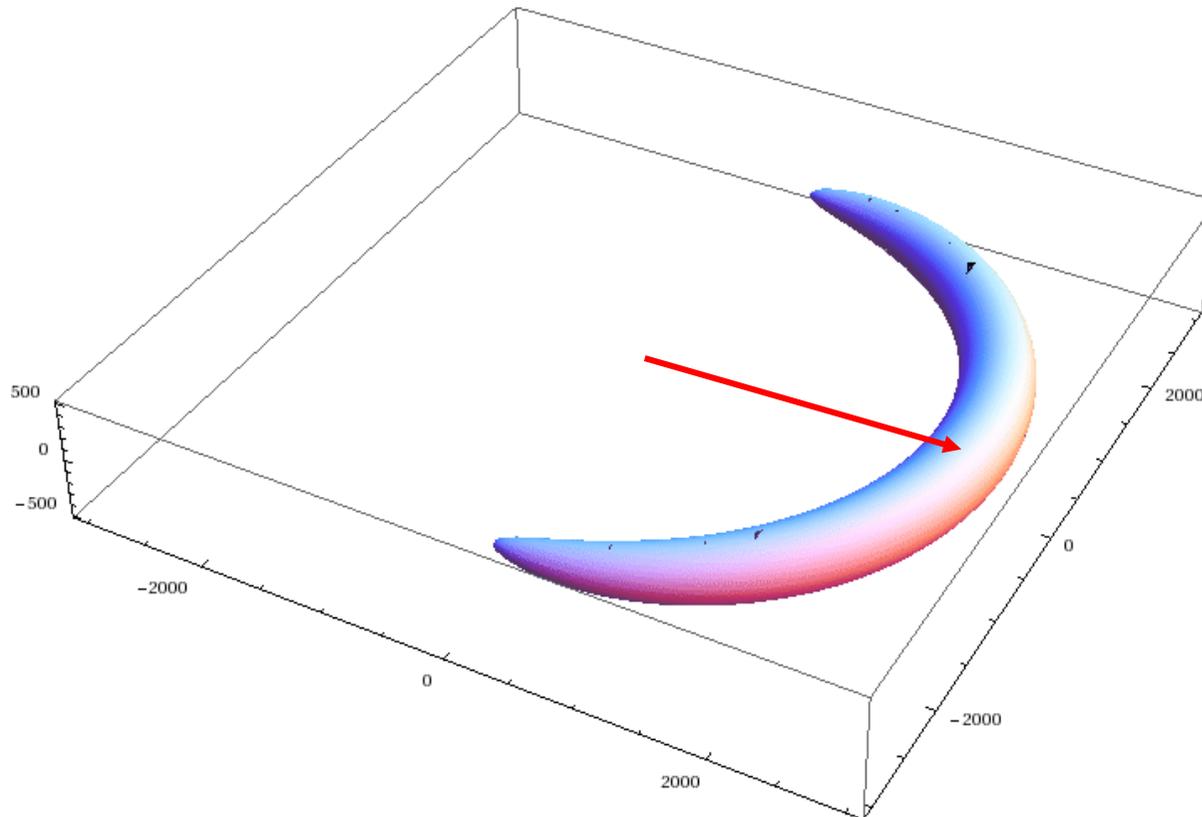
- Et 'faciles' à préparer

- Excitation laser, radiofréquence et microonde du rubidium



Transformer l'atome en horloge

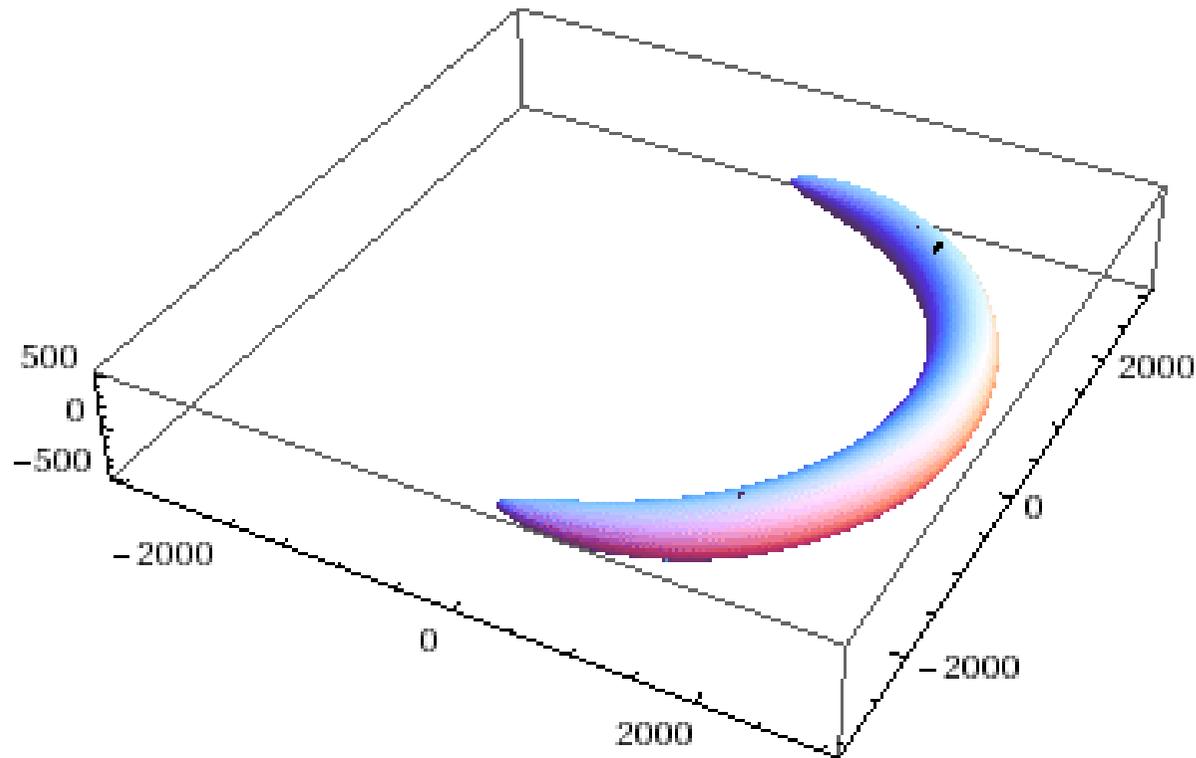
- Une superposition d'états
 - Prépare une superposition quantique des états e et g
 - Une fonction d'onde moins symétrique



- La position moyenne de l'électron est l'aiguille de notre horloge.

Un tic-tac rapide

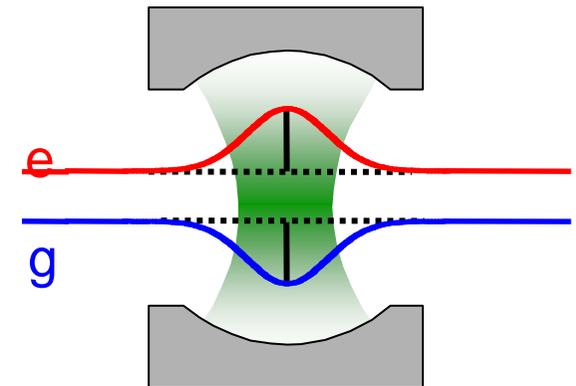
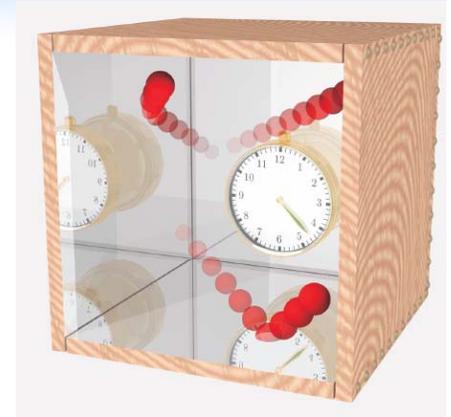
- La superposition évolue à la fréquence de la transition atomique
 - L'électron tourne à 51GHz



- Mesurer avec précision cette rotation!

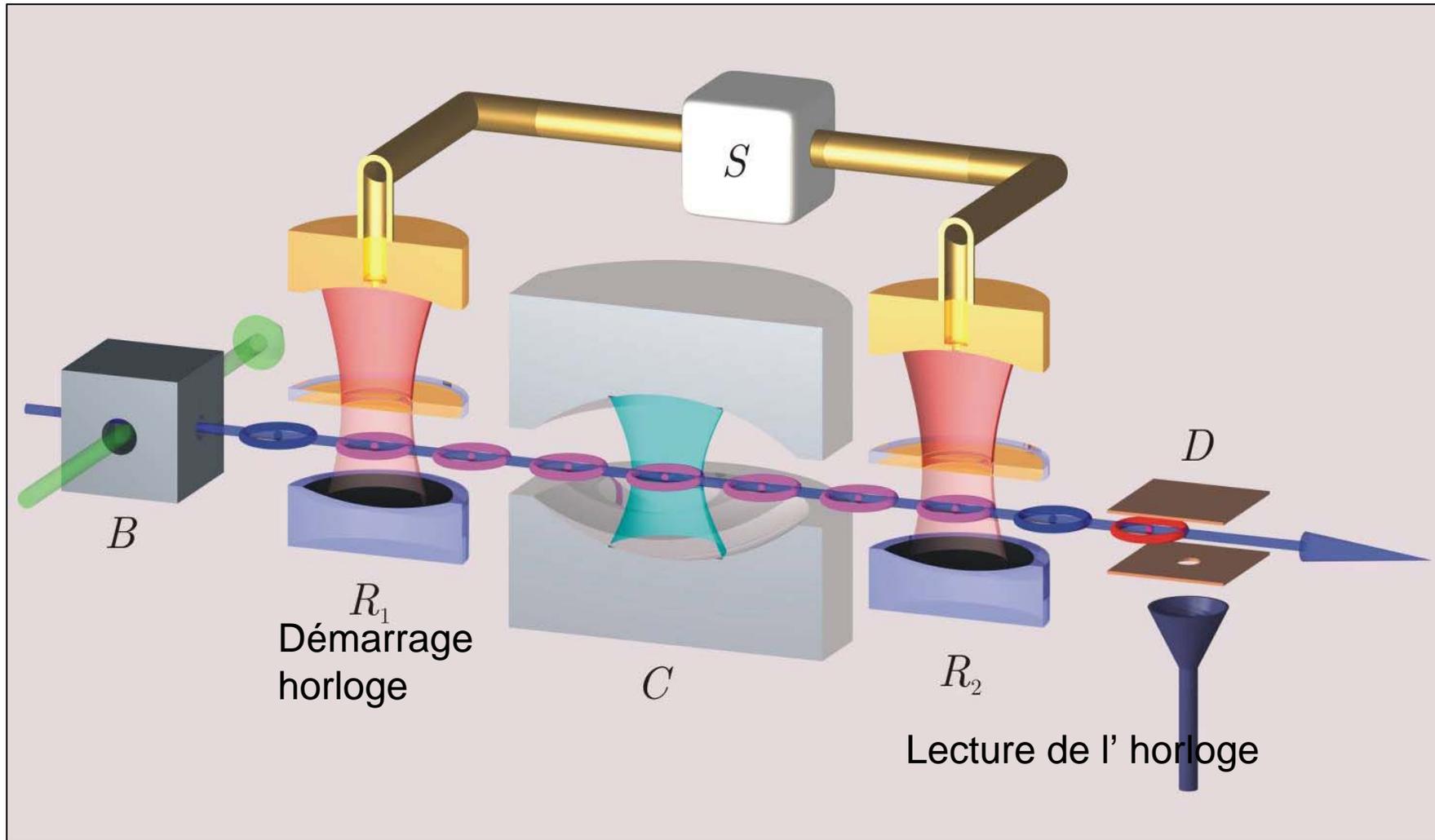
Sonder les photons avec délicatesse

- Voir un photon sans l'absorber ?
 - Interaction non-résonnante (dispersive)
 - Pas d'échange d'énergie
 - Pas d'émission ou d'absorption
 - Déplacements lumineux
 - Niveaux atomiques déplacés par le champ
 - Modification de la fréquence atomique

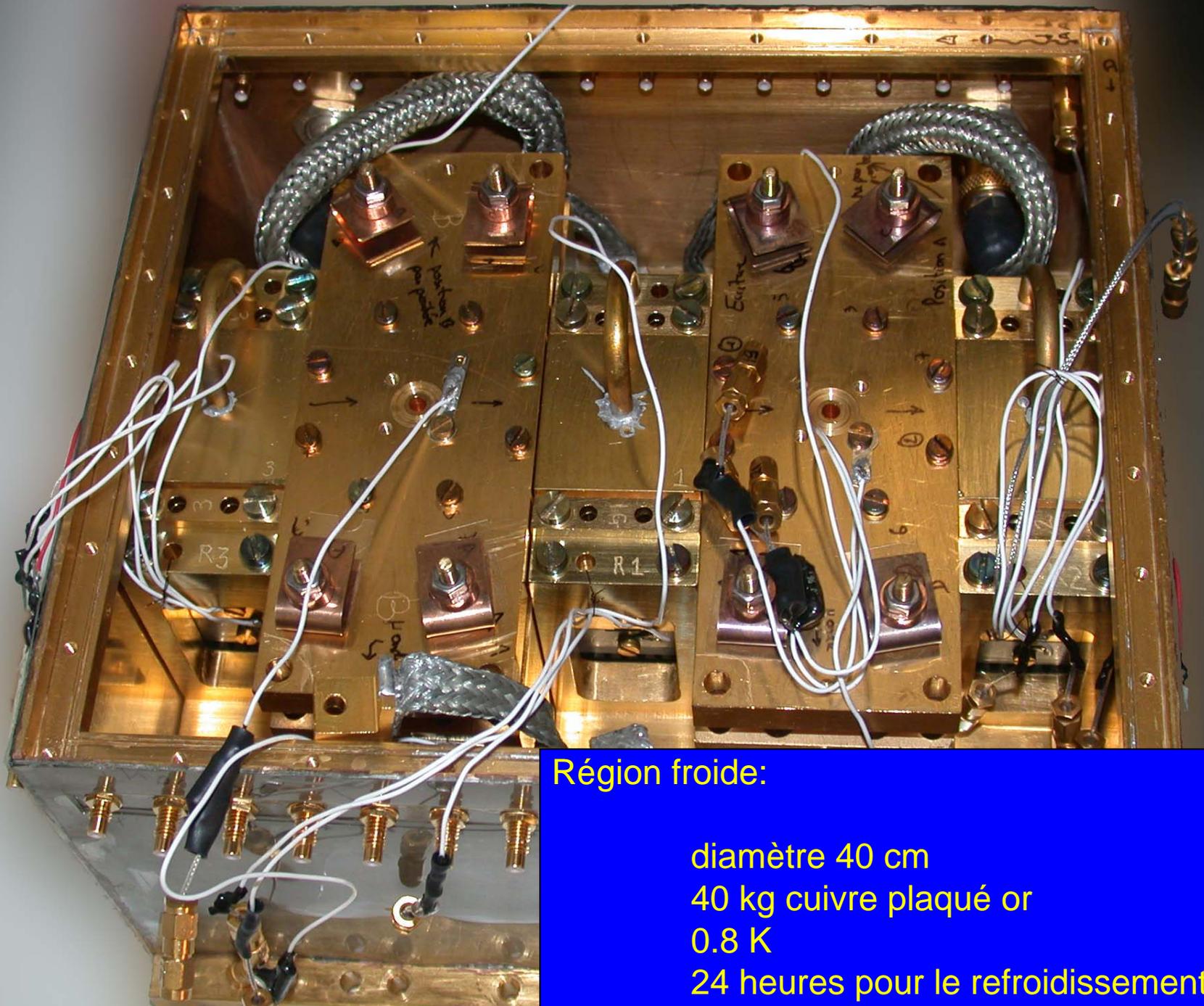


- Modification du rythme du tic-tac dû au champ
- L'horloge atomique avance ou retarde d'une quantité proportionnelle au nombre de photons

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

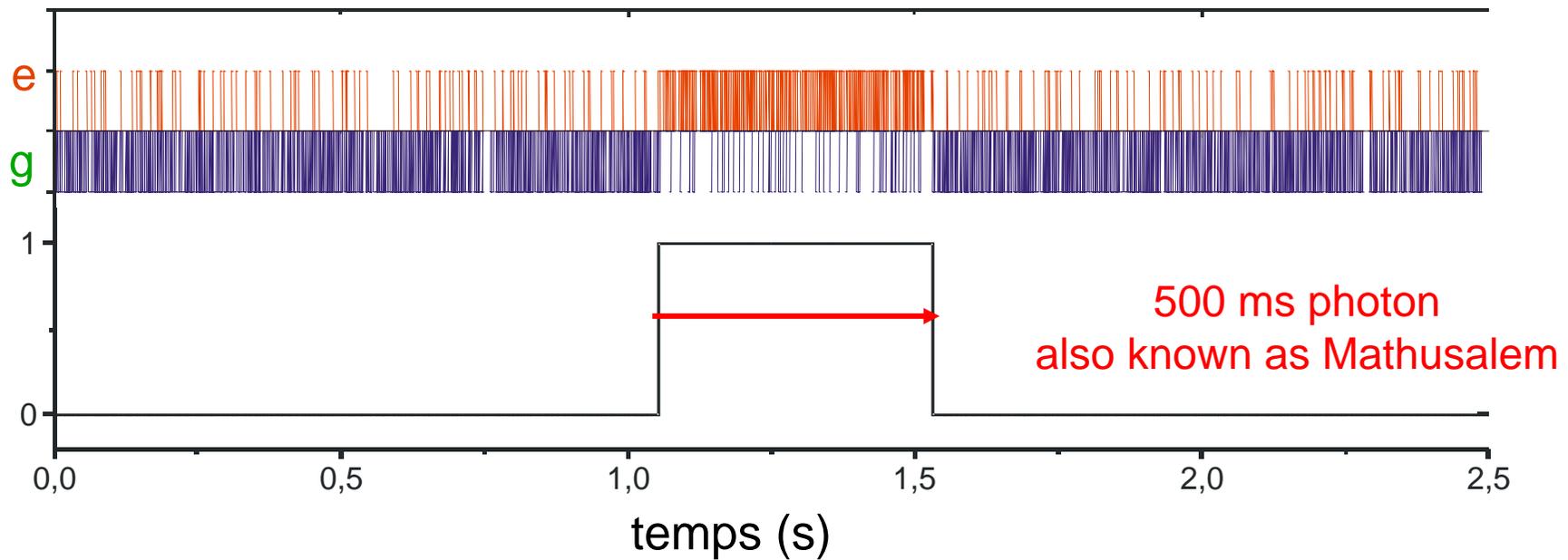
0.8 K

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 mesurer la probabilité de e et g
 - La détection de l'état atomique final donne directement le nombre de photons

Naissance, vie et mort d'un photon unique

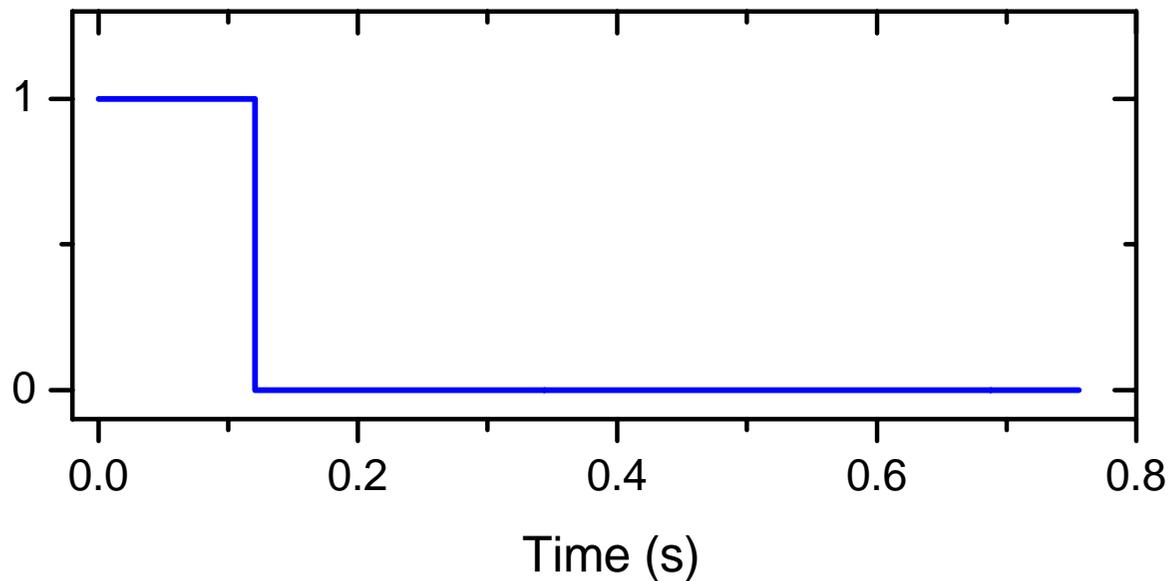


Gleyzes et al, Nature, **446**, 297 (2007)



Mort d'un photon

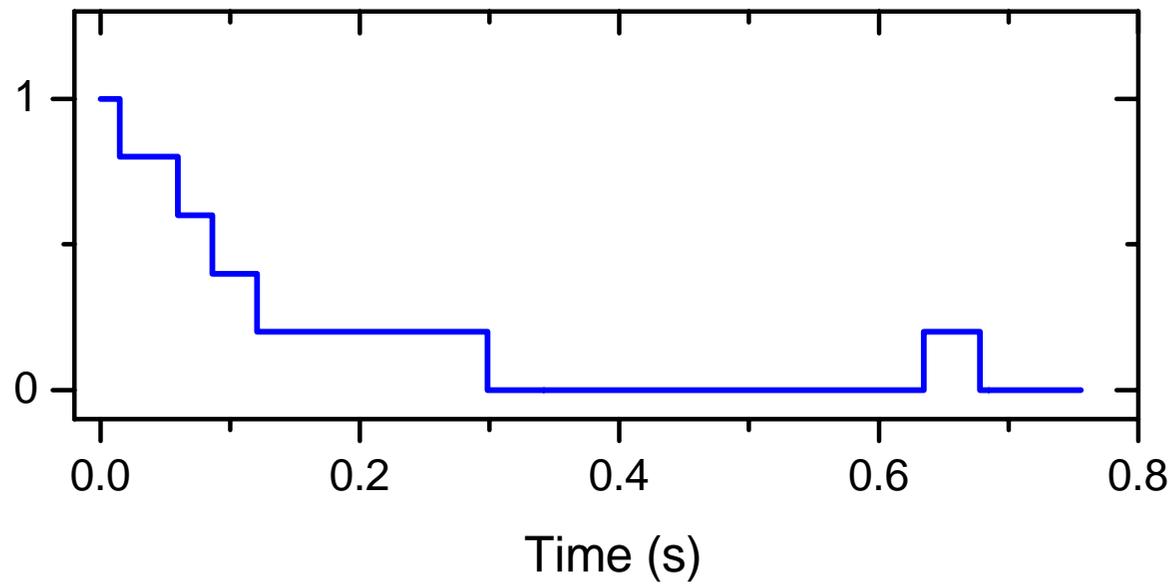
1 séquence :



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

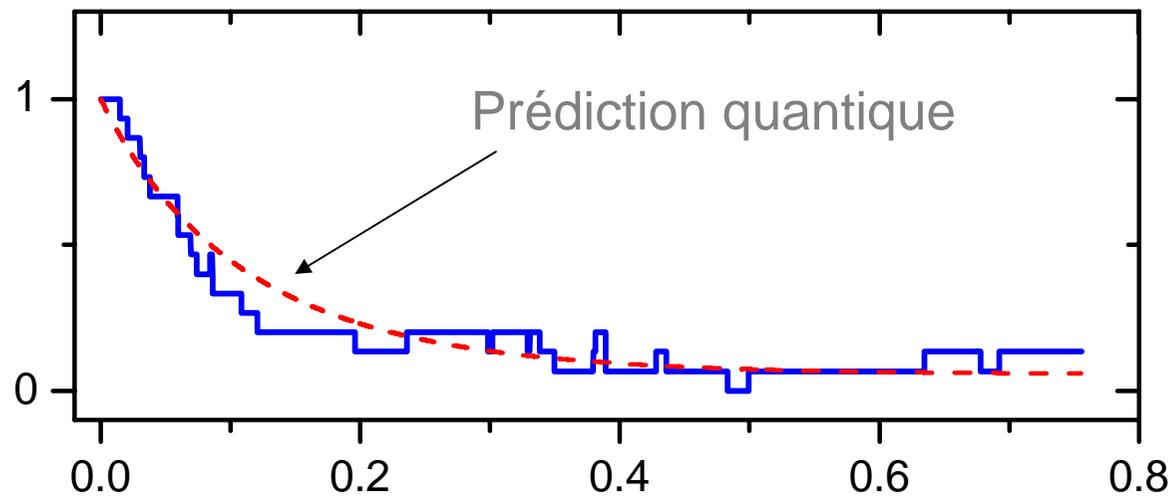
Mort d'un photon

5 séquences :



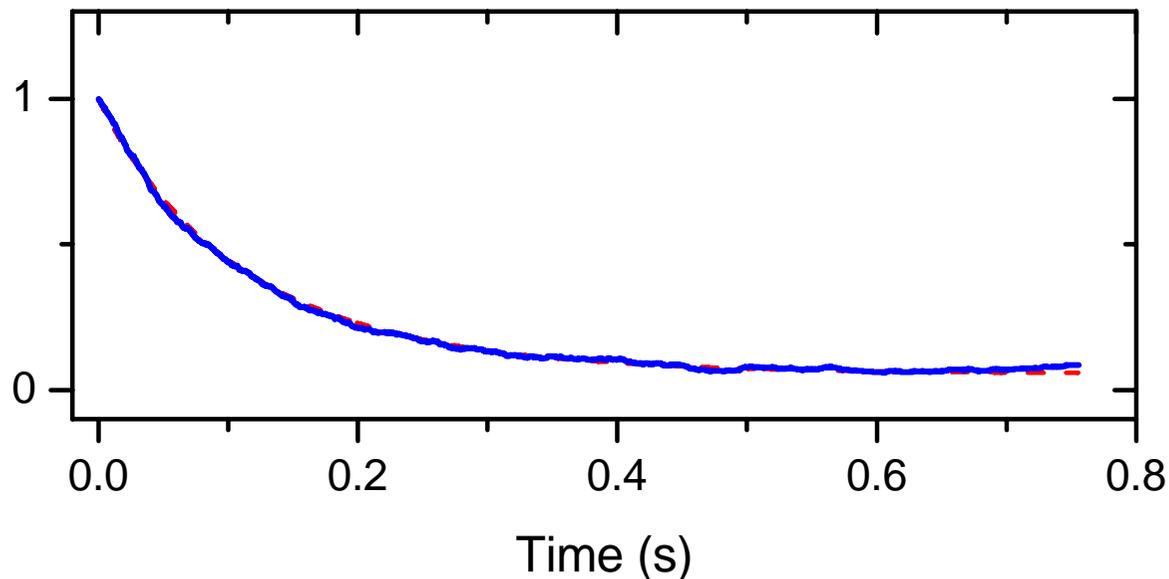
Mort d'un photon

15 séquences :



Mort d'un photon

904 séquences :



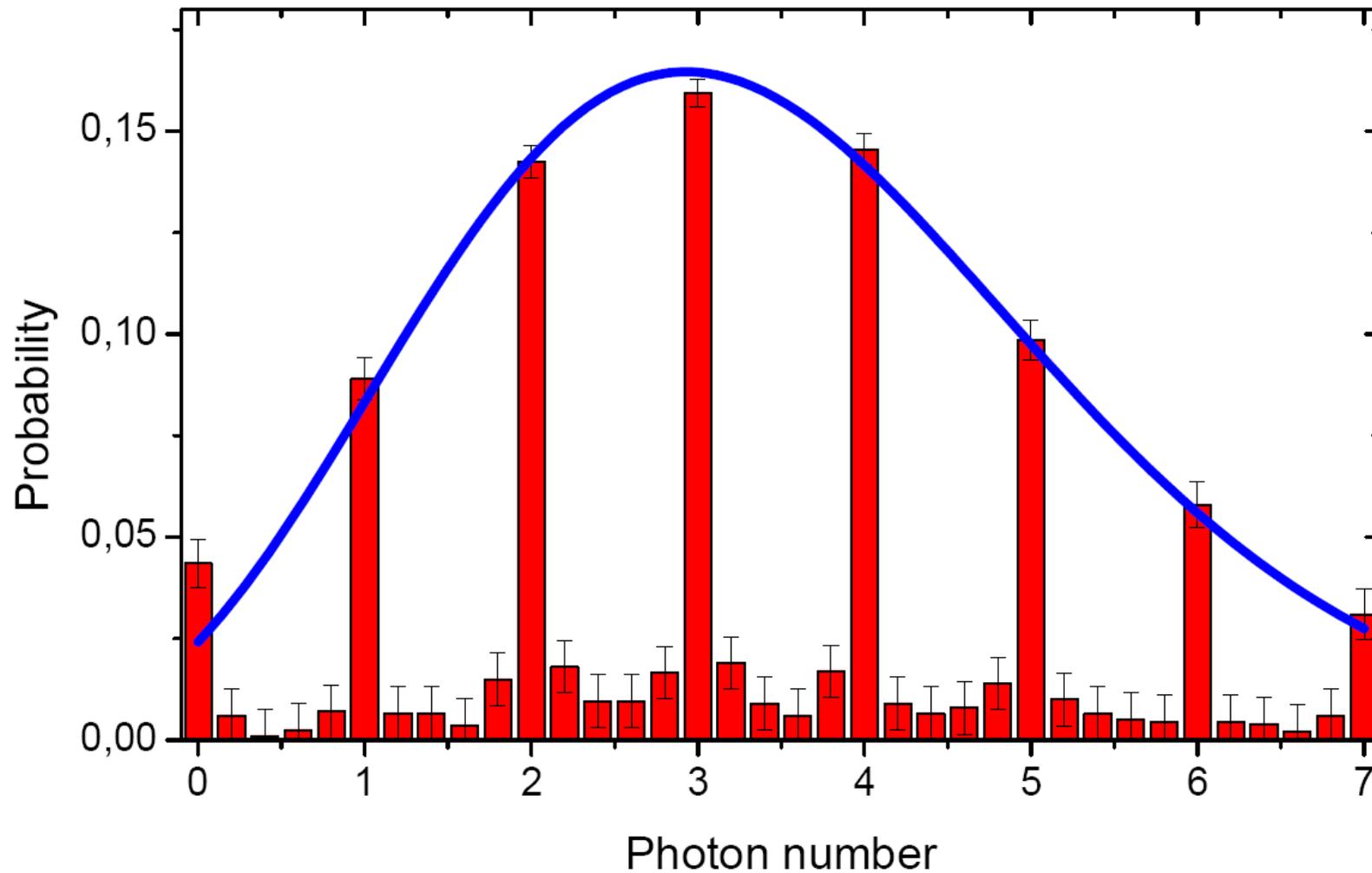
La mécanique quantique ne prédit pas le résultat d'une expérience unique
elle ne prédit que des probabilités d'occurrence
ou des moyennes sur un grand nombre de réalisations

Illustration directe des postulats de la physique quantique

Compter jusqu'à 7 ?

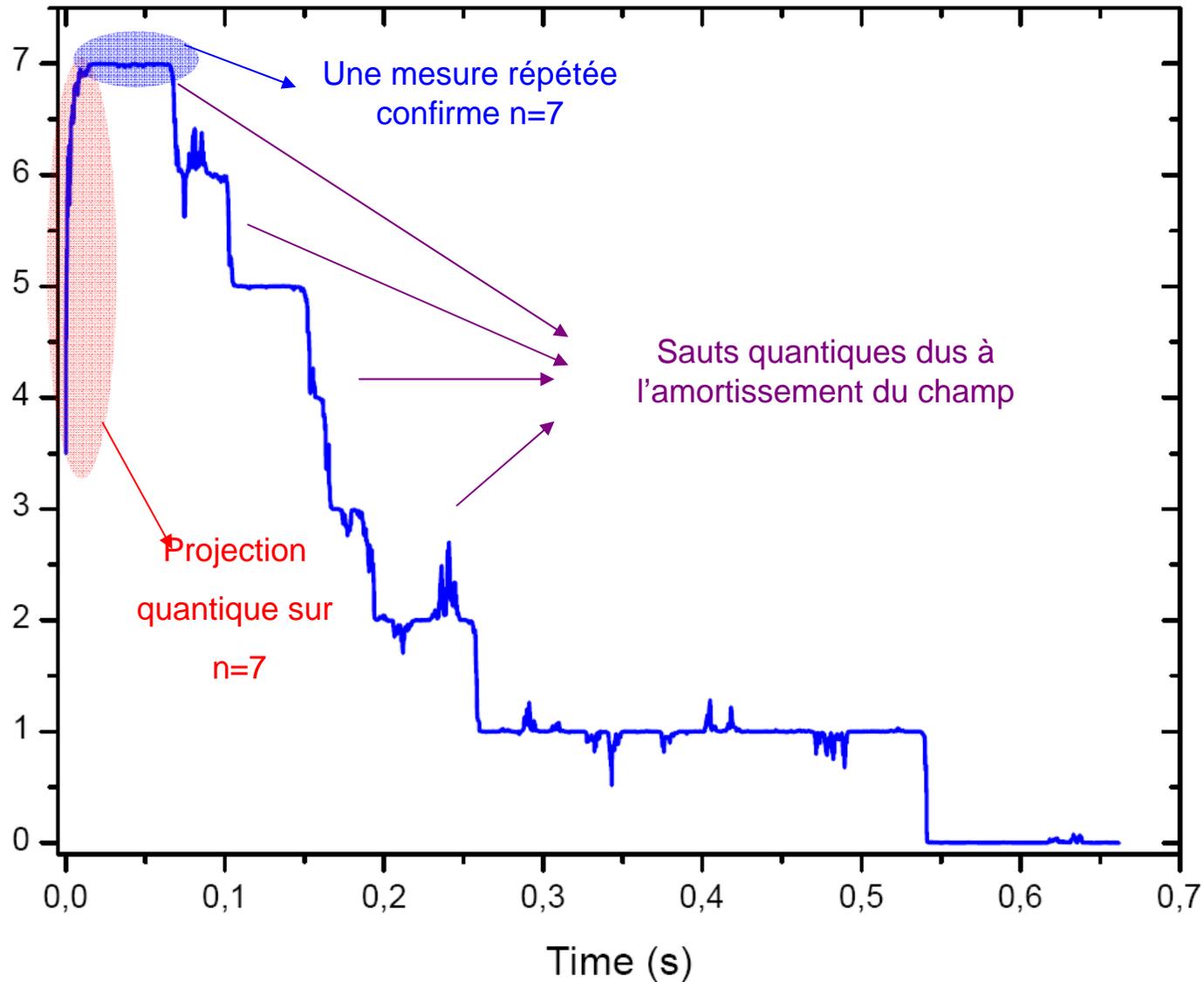
- Un atome ne suffit pas
 - On ne peut pas compter de 0 à 7 avec un seul bit
- Utiliser l'information fournie par un grand nombre d'atomes
 - QND : les atomes ne changent pas le nombre de photons qu'ils mesurent ensemble
 - En pratique, 100 atomes détectés en 26 ms déterminent suffisamment les probabilités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

Statistique du résultat de la mesure



- On mesure un nombre entier: quantification du résultat
- Le résultat est aléatoire
- Il obéit exactement à la loi de probabilité donnée par la physique quantique

Une trajectoire quantique



C. Guerlin et al, Nature, **448**, 889

Une mesure idéale du nombre de photons

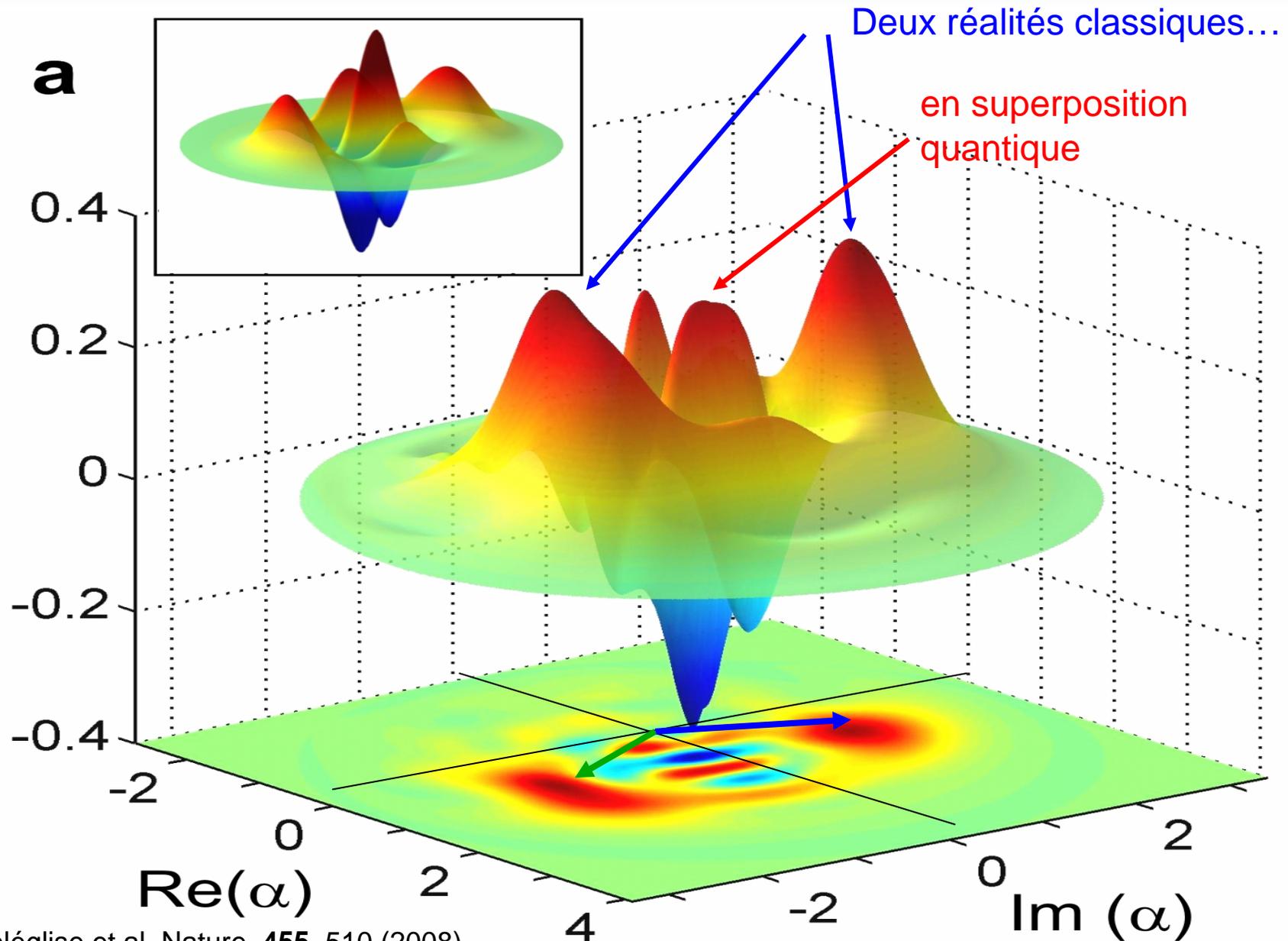
- Mesure sans démolition quantique (QND)
 - Un résultat quantifié
 - L'énergie du champ dans une boîte est quantifiée en multiples d'une quantité fondamentale $h\nu$
 - Un résultat aléatoire
 - Le résultat d'une expérience unique ne peut être prédit
 - 'Dieu joue aux dés'
 - Un résultat répétable
 - 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 de chats de Schrödinger
 - Mais n'exclut pas des chatons...

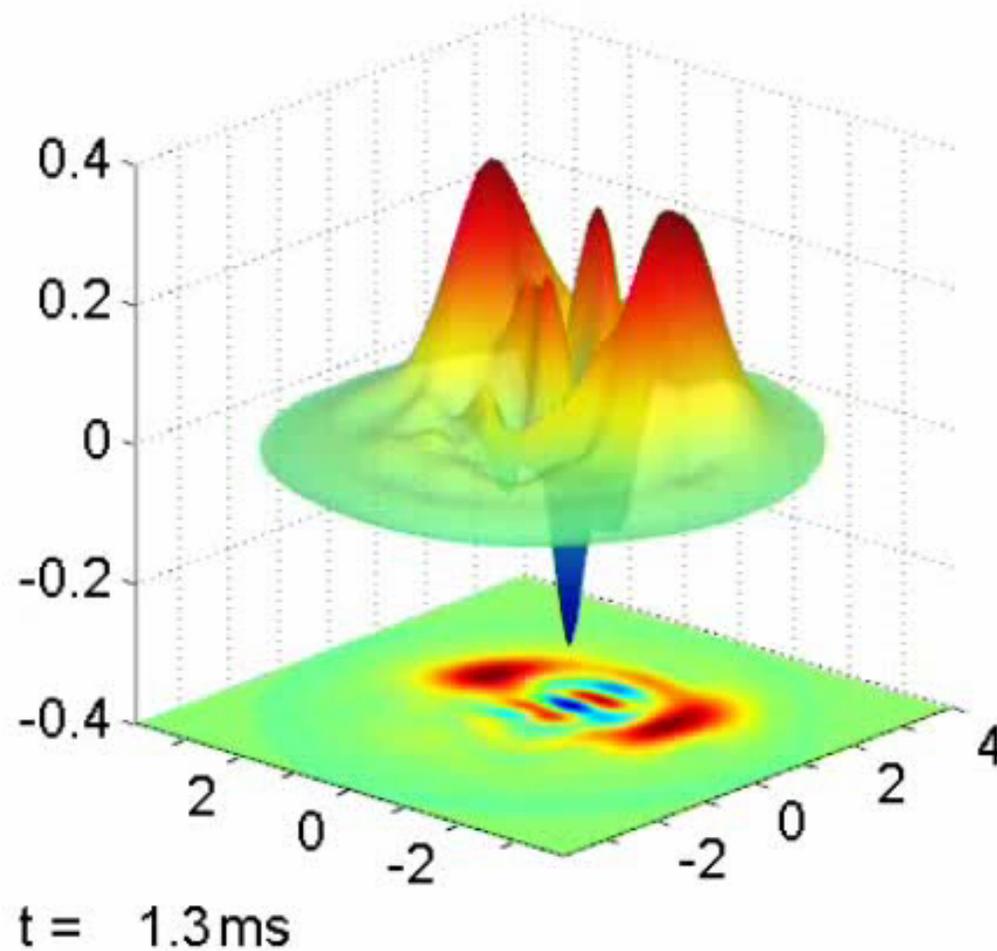


Portrait d'un chat de Schödinger



S. Deléglise et al, Nature, **455**, 510 (2008)

Une vie de chat...



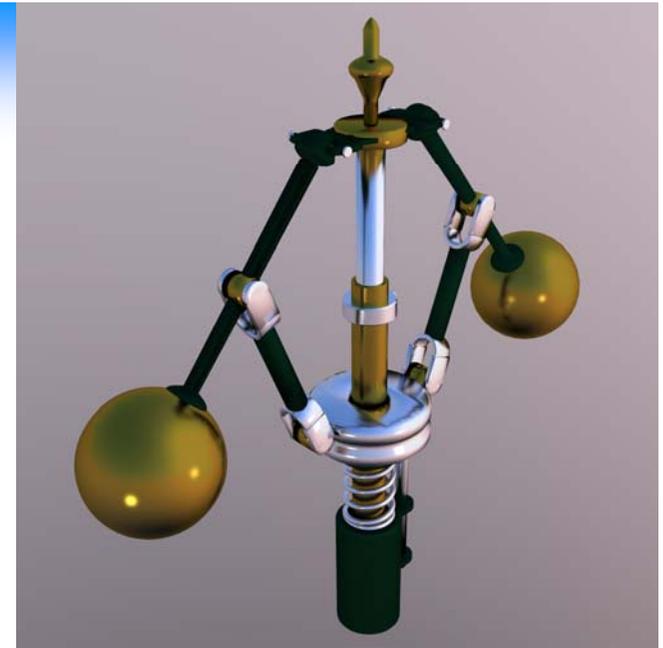
S. Deléglise et al, Nature, **455**, 510 (2008)

Sonder et apprivoiser la décohérence

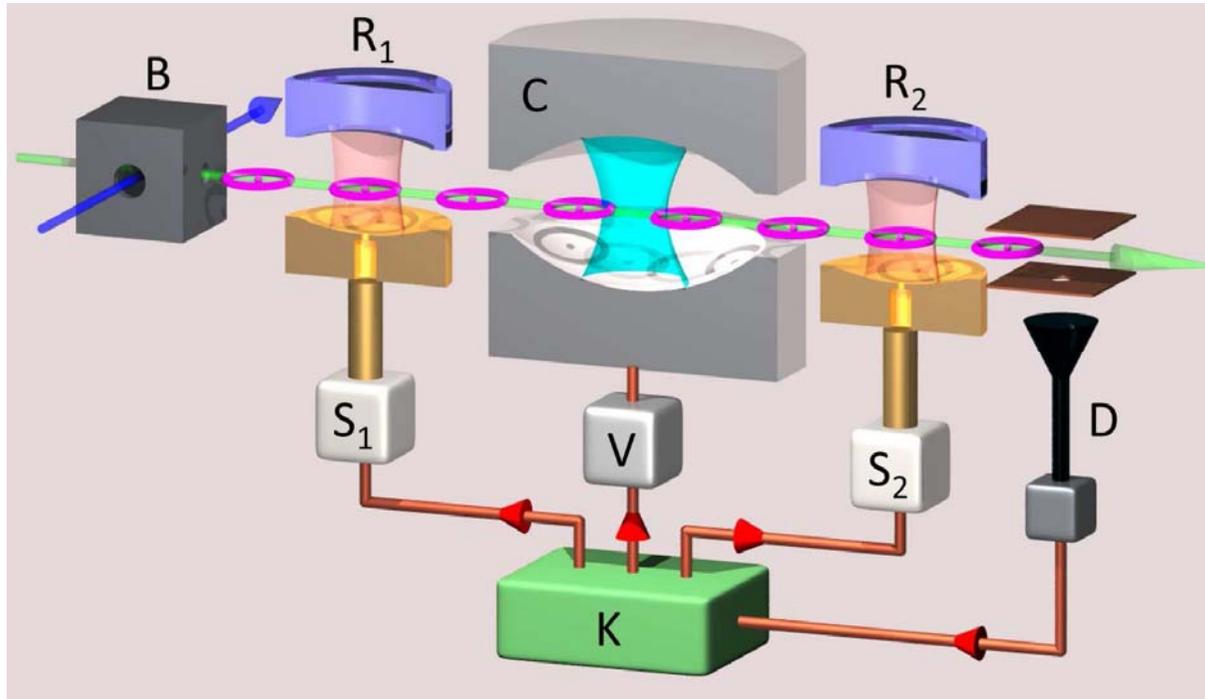
- Premières explorations de la frontière classique-quantique
 - Mise en évidence directe de la décohérence
 - Un phénomène redoutablement efficace
 - Un obstacle à l'utilisation de l'étrangeté quantique à l'échelle macroscopique (ordinateur quantique)
- Mieux comprendre la décohérence...
 - « métrologie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

Combattre la décohérence

- Rétroaction classique
 - Mesurer, estimer et réagir
- Rétroaction quantique
 - Préparer et stabiliser un nombre de photons
 - Acquérir de l'information (atomes QND)
 - Estimer l'état de la cavité
 - Réagir avec un actuateur (atomes résonants)
 - Itérer cette boucle de rétroaction.
 - Une difficulté fondamentale par rapport à la rétroaction classique:
 - La mesure change l'état du système (postulat de projection)



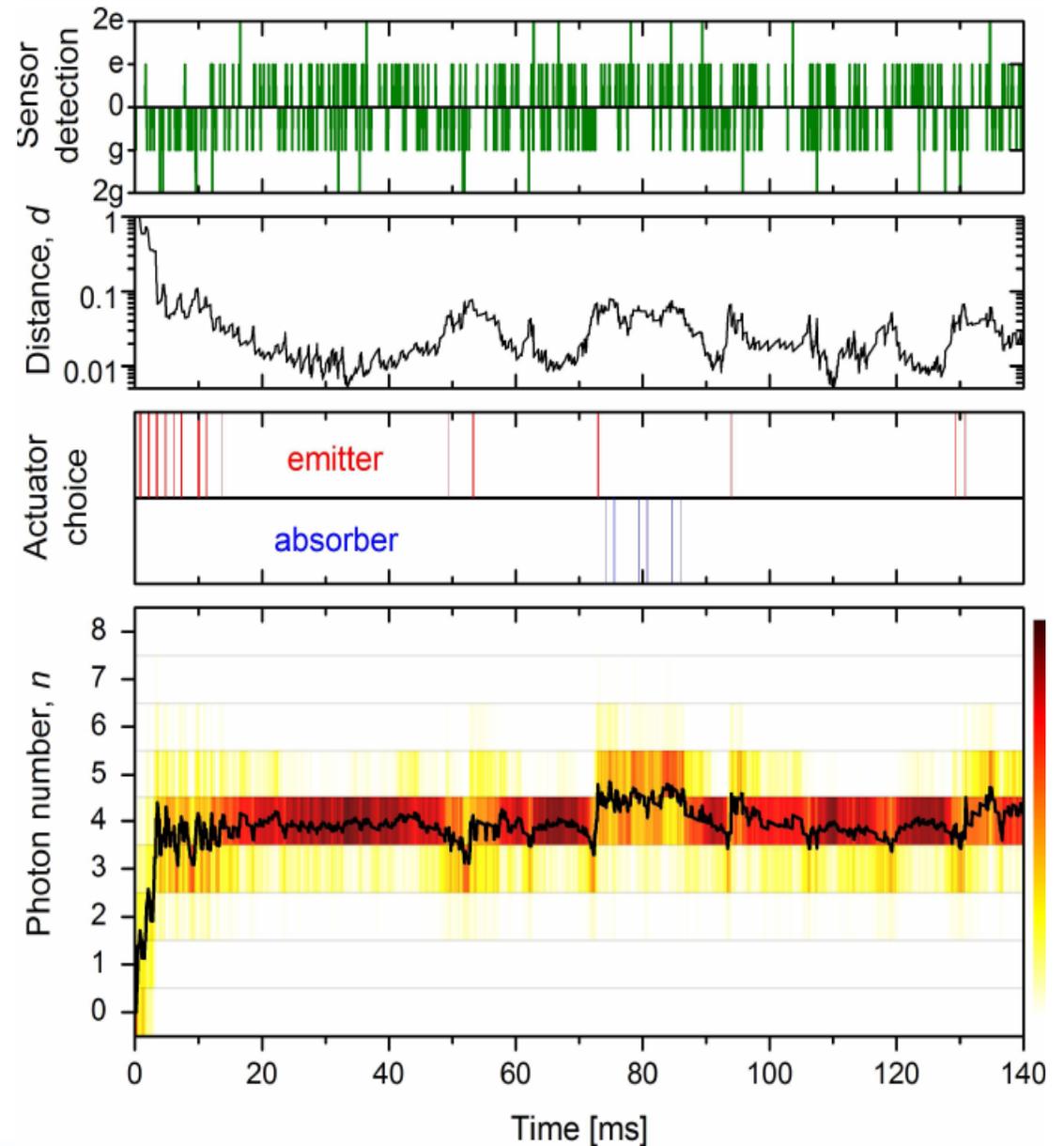
Une expérience de rétroaction quantique



- **Senseurs**
 - Atomes en interaction dispersive: information QND sur le nombre
- **Actuateurs**
 - Atomes préparés dans g ou e
 - Mis à résonance avec C (effet Stark)
 - Emettent ou absorbent des photons individuels et corrigent les sauts quantiques

Une réalisation unique de l'expérience

- But: 4 photons
 - Stabilisation efficace
 - Compensation des sauts quantiques
 - Première réalisation d'une rétroaction quantique en continu

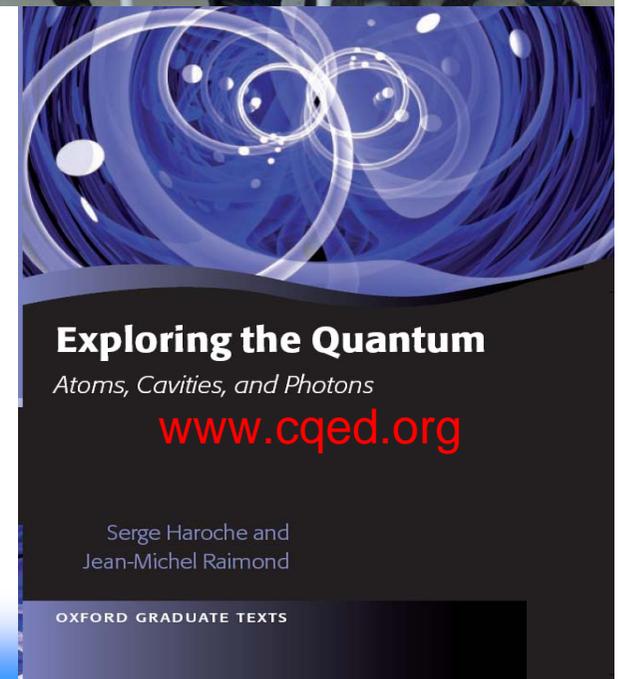


La physique quantique: un domaine en pleine expansion

- Meilleure compréhension du quantique et de la limite quantique/classique
- Appliquer la logique du quantique pour des tâches utiles
 - Métrologie quantique
 - Mesures de haute précision
 - Ondes de gravitation, horloges (D. Wineland)...
 - Traitement et transmission quantique d'information
 - Cryptographie quantique
 - Téléportation quantique
 - Simulation quantique
 - Ordinateurs quantiques....
- Le XX^e siècle a été celui de la physique quantique, le XXI^e pourrait bien l'être aussi

L'équipe de l'ENS

- S. Haroche, M. Brune, JM Raimond, S. Gleyzes
- Cavity QED experiments
 - I. Dotsenko, S. Gerlich
 - C. Sayrin, X. Zhou,
 - B. Peaudecerf, T. Rybarczyk,
 - A. Signolles, A. Facon, E. Dietsche
- Superconducting atom chip
 - Sha Liu
 - R. Teixeira, C. Hermann, Than Long
- Collaborations:
 - **Cavities**: P. Bosland, B. Visentin, E. Jacques
 - CEA Saclay (DAPNIA)
 - **Feedback**: 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



L'équipe de l'ENS

- Par ordre d'apparition

- 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

- Aephrain 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

- Peter Domokos

- Ferdinand Schmidt-Kaler

- 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