



# Décohérence, Complémentarité et Intrication: des aspects complémentaires du monde quantique

J.M. Raimond

Laboratoire Kastler Brossel, ENS

S. Haroche

A. Rauschenbeutel

A. Auffeves

S. Gleyzes

P. Milman

M. Brune

P. Bertet

P. Maioli

C. Guerlin

L. Davidovich

G. Nogues

S. Osnaghi

T. Meunier



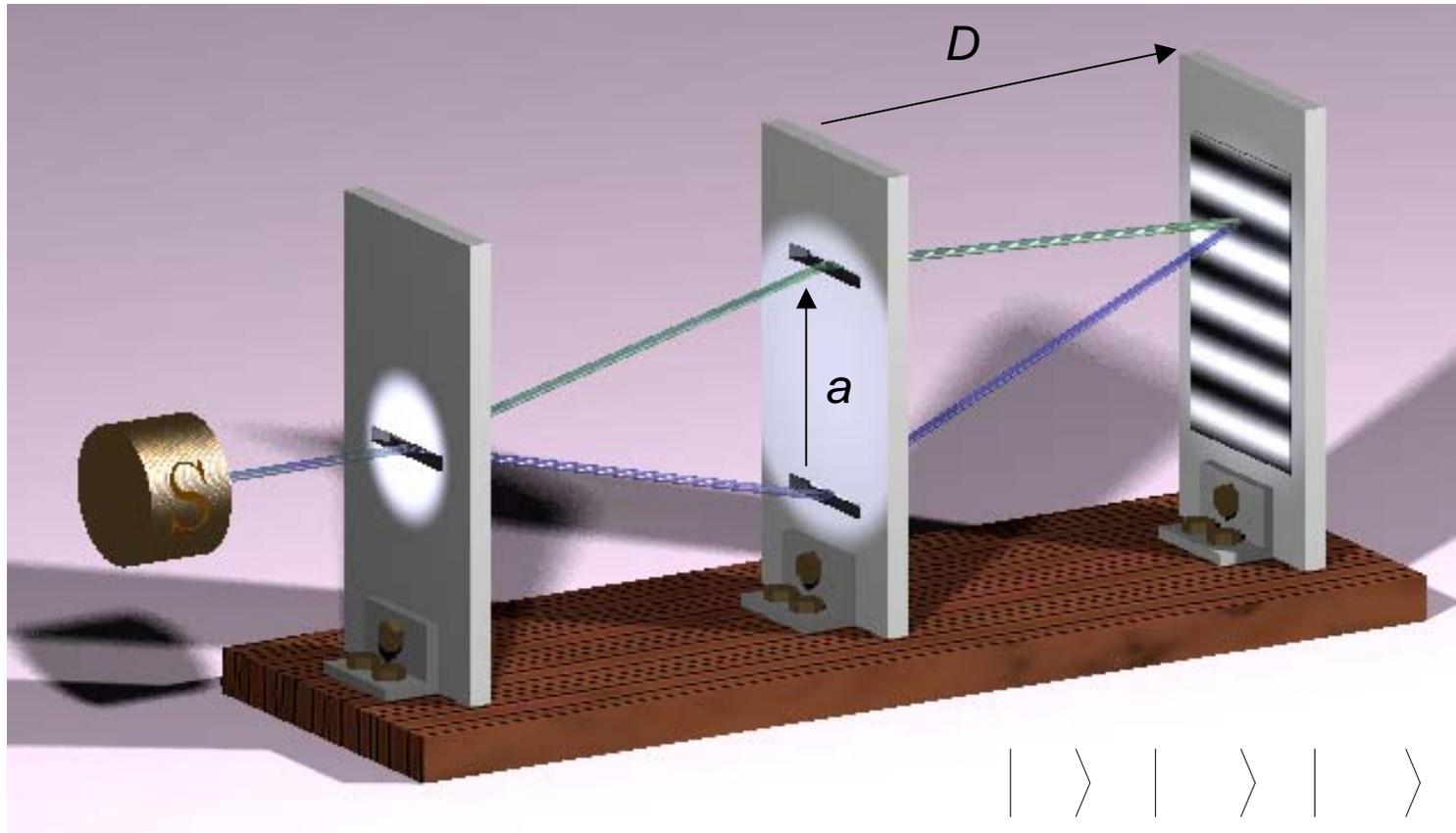
## Le XX<sup>ème</sup> siècle fut celui de la mécanique quantique

- 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 »:
  - Les portes sont ouvertes ET fermées
  - Les chats sont morts ET vivants
    - la mécanique quantique continue à nous surprendre après près d'un siècle



# Etrangeté quantique: interférences

- Interférences d'Young



$$\begin{array}{ccccccc} | & \rangle & | & \rangle & | & \rangle & \\ & & & & \langle & | & \rangle \end{array}$$

– Feynman: l'expérience d'Young contient tous les mystères de la mécanique quantique



## Des particules interfèrent-elles ?

- Interférences d'Young avec des électrons (A. Tonomura, 1989)

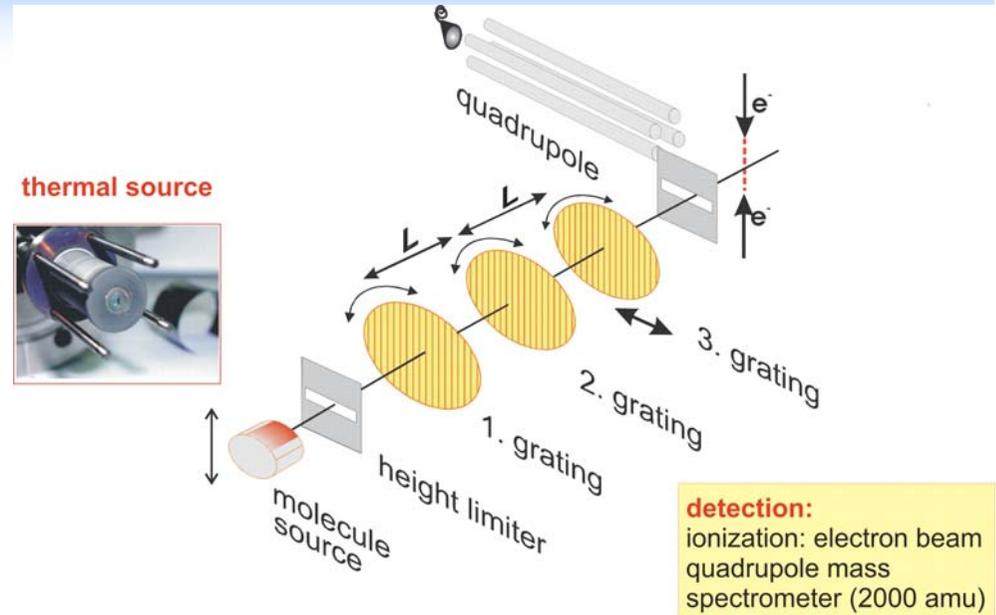
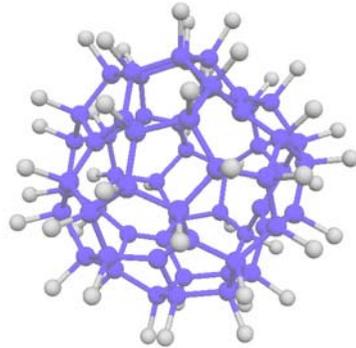
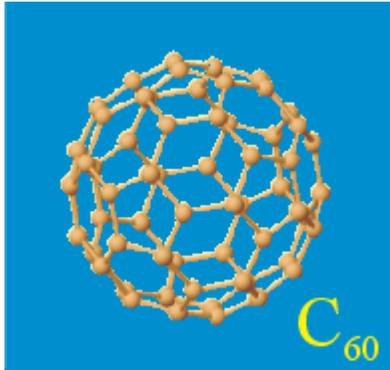


- La particule passe par deux chemins à la fois !!
- Dualité onde-corpuscule

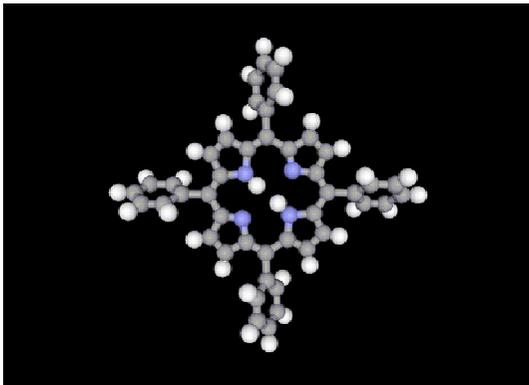


## Et même...

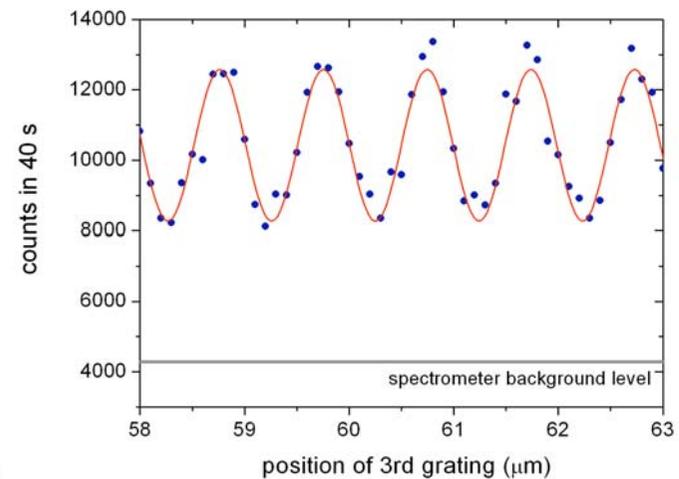
- Des molécules de  $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{60}F_{48}$



- De petites molécules de colorant (Zeilinger)

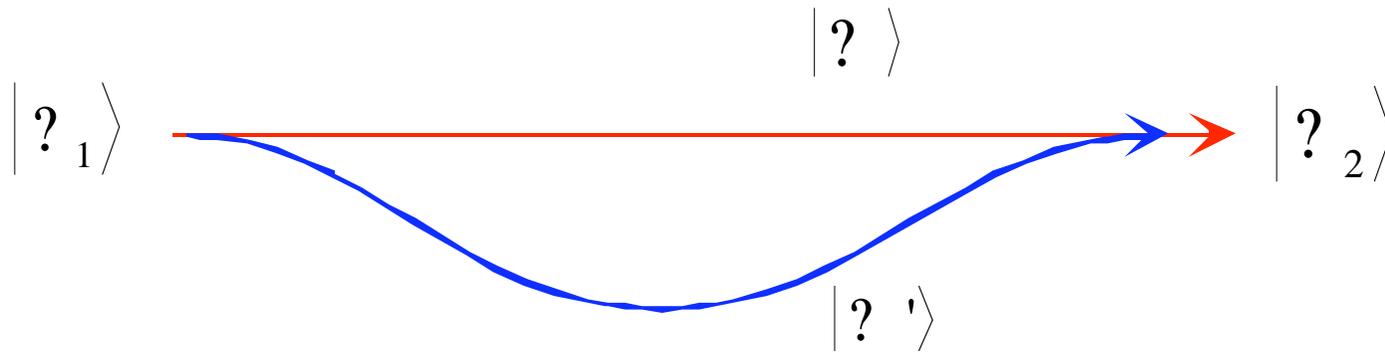


- Tous ces objets interfèrent comme des ondes.... Jusqu'où ?





## Universalité des interférences quantiques



Deux évolutions possibles mènent du *même* état initial au *même* état final, avec deux états intermédiaires différents.

Deux amplitudes de probabilité  $a_1$  et  $a_2$  associées aux deux chemins (nombres complexes)

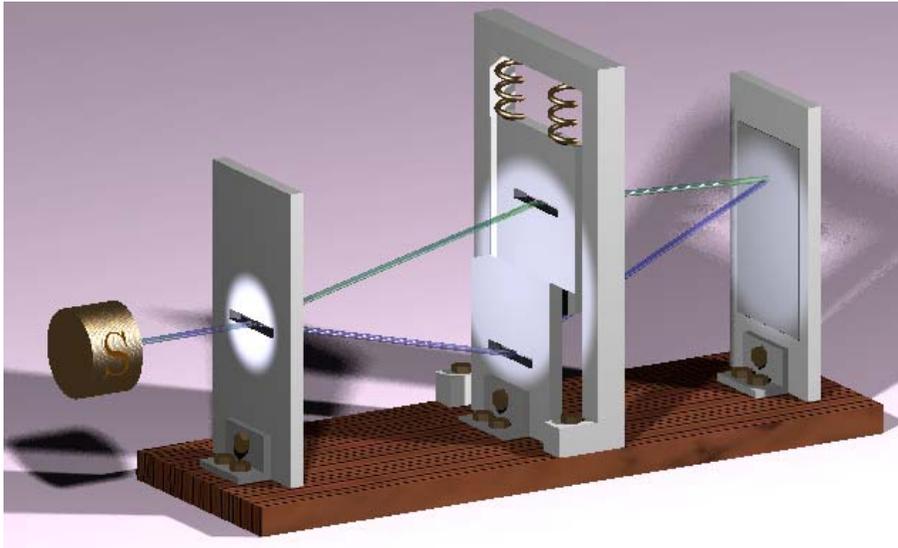
$$\text{Probabilité finale } |a_1 + a_2|^2$$

Situation extrêmement fréquente dans le monde quantique



# Complémentarité

## Une expérience de pensée (Bohr)



Fente mobile recule en diffractant la particule:  
enregistre une information « which path »

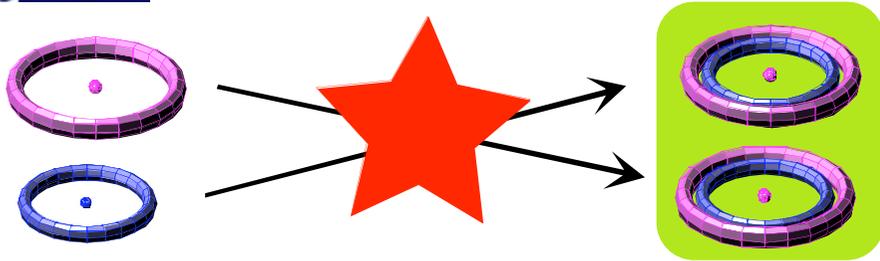
Cette information est-elle compatible avec l'observation des franges ?

## Deux limites

- Fente macroscopique:
  - Recul négligeable comparé aux fluctuations quantiques de position:
    - Pas d'information
  - Position bien définie:
    - Franges
- Fente microscopique:
  - Fort recul
    - Information « which path »
  - Fortes fluctuations quantiques de position:
    - Pas de franges
- Onde et particule: deux aspects complémentaires de l'objet quantique
- Un appareil de mesure (interféromètre) doit être macroscopique



# Intrication



Deux systèmes après interaction définis par un état global

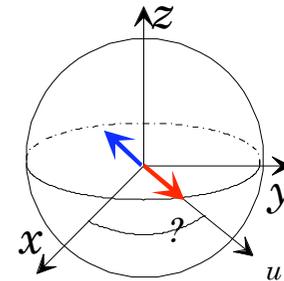
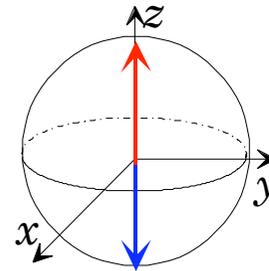
- **Aucun système n'a d'état bien défini individuellement**
  - Une mesure sur un système affecte l'autre
  - Corrélations quantiques quelle que soit la distance entre les systèmes intriqués

Au cœur de la non-localité quantique

## Paires Einstein-Podolsky-Rosen (EPR)

Deux spins  $\frac{1}{2}$  dans un état singulet

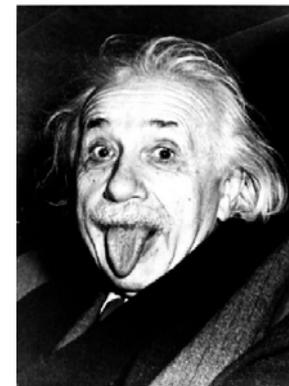
$$\frac{1}{\sqrt{2}} (| \uparrow \downarrow \rangle - | \downarrow \uparrow \rangle)$$



Corrélations quantiques indépendantes de la base

Einstein n'aimait pas ça du tout...

Et il avait tort !





# Limite classique/quantique

Pas de superpositions quantiques à notre échelle

Pas de « chat de Schrödinger »

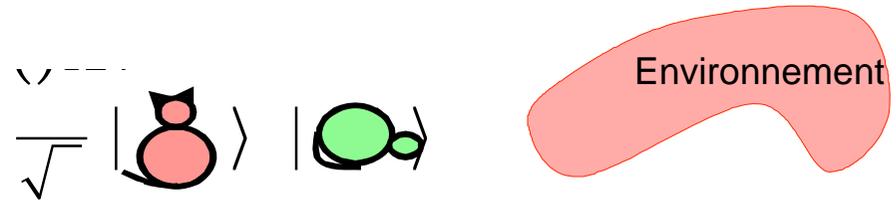


Pas d'états intriqués, non plus

Nous n'observons qu'une toute petite fraction de tous les états possibles

## POURQUOI ??

### Décohérence



Un système macroscopique est très fortement couplé à l'environnement

Dans tous les modèles, ce couplage

- Ne préserve que quelques états (la « base préférée »)
- Détruit très rapidement toute superposition quantique de ces états

### Décohérence



# Caractéristiques essentielles de la décohérence

Un processus TRES rapide

---

Temps ridiculement courts pour des objets réellement macroscopiques  
(chat)

Dépend de l'état initial (la distance entre les états ou un paramètre de  
« macroscopicité »)

Un mécanisme de relaxation non trivial

(mais expliqué par la théorie standard de la relaxation quantique dans  
des modèles simples)

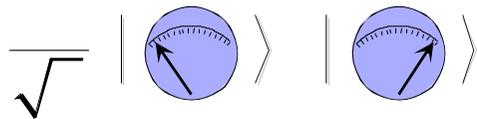


# L'importance de la décohérence

## Mesure quantique

Décohérence joue un rôle essentiel dans la mesure quantique:

Les appareils ne sont pas dans une superposition quantique!



Seulement des mélanges statistiques correspondant à des alternatives probabilistes classiques



Les états stables (et donc la quantité mesurée) sont déterminés par la dynamique de la décohérence

## Applications de l'étrangeté quantique

Manipulations d'états intriqués complexes pour le traitement de l'information ou le calcul quantique

La décohérence affecte ces états.

Perte très rapide de la cohérence et de l'information quantique

Un obstacle terrible pour ces applications

NB: La décohérence n'empêche pas des états quantiques macroscopiques (supraconducteurs, superfluides) s'il n'y a pas de superposition



# Pourquoi explorer le monde quantique ?

## Un intérêt fondamental

### Meilleure compréhension des postulats quantiques

- Superposition
- Mesure
- Intrication et non-localité

### Exploration de la frontière classique-quantique

Réaliser les expériences de pensée des fondateurs de la théorie quantique.

**«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.... »**

*(Schrödinger British Journal of the Philosophy of Sciences, Vol 3, 1952)*

## Des applications prometteuses

Utiliser l'étrangeté quantique pour de nouvelles fonctions de traitement ou de transmission de l'information

Des bits (0 ou 1) aux qubits ( $|0\rangle$  et  $|1\rangle$ )

- Cryptographie quantique
- Téléportation quantique
- Traitement quantique de l'information
- Calcul quantique

Reposent tous sur des manipulations complexes d'états intriqués.



# Cryptographie quantique

## Cryptographie:

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

## Exemple: one-time pad

Addition du message avec un clé de même longueur  
Inconditionnellement sûr.

03318	8767	08762	63183	76487	06267	67068
61844	89432	46037	87931	38272	03023	46393
69140	10399	99713	40014	44679	09280	07776
23997	48279	65867	08709	58375	94388	72397
62793	41149	92357	47451	42133	71370	94311
85680	09338	07119	60124	10428	47678	17823
43095	87689	58672	71578	72843	93709	49876
48799	07084	49126	60098	42555	58656	87714
61989	84869	92997	51316	34722	71397	28986
31726	50833	82088	28727	68426	31833	78111
84860	19477	78213	76699	38830	42540	64610
14276	69204	50291	94311	54956	33373	38741
77727	28366	58976	44760	97613	05867	63259
12344	35601	94508	52068	57871	52504	28683
89871	53567	42474	98720	44484	57361	31874
2173	78208	76926	39396	32476	03946	41483
67818	00621	07408	75571	67230	67808	81728
80001	78829	73329	03881	99806	60744	24171
15439	76858	98767	26776	59377	93987	62946
28992	30562	38091	40109	48423	46625	73171
31271	06910	26758	61895	47790	39702	35067
58728	73353	00077	15882	85850	65872	86228
06389	25067	22248	88111	82783	32321	22791
54082	98332	32214	93193	67933	97153	00513

Problème essentiel: distribuer des clés sûres

## Utilisation des états intriqués

### Deux particules intriquées:

- Les résultats des mesures faites par deux observateurs sont corrélés
- Impossible d'espionner en observant une des particules sans perturber leur état et les corrélations.

Possible de partager une séquence aléatoire en étant sûr que personne d'autre ne la connaît

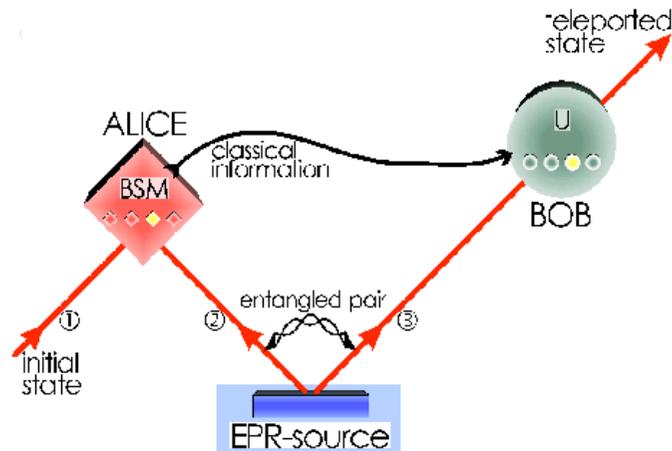
Un outil sûr pour distribuer des clés.

Déjà commercial! Fonctionne avec des fibres optiques télécom sur des distances de quelques 10 km.



# Téléportation quantique

## Principe



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

Un "fax quantique" qui détruit l'original.

La mécanique quantique interdit le clonage!

## Ce que ce n'est pas

**Téléportation de matière:** On transmet un état d'une particule sur une autre, mais pas la particule elle-même

**Supraluminique:** un signal classique doit se propager entre les deux "stations"

**Une solution au problème des transports en commun!!**

## Ce que c'est

Une très belle illustration de la non-localité quantique (Einstein n'aurait pas aimé ça)

Une étape importante dans des fonctions de traitement quantique de l'information

Déjà démontré avec des photons intriqués



# Ordinateur quantique

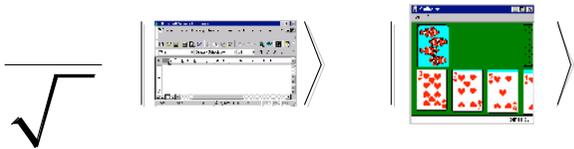
## Principe

Ordinateur classique manipule des bits  
(0 ou 1)

- Effectue les calculs 1 a 1.
- Il existe des problèmes difficiles (factorisation)

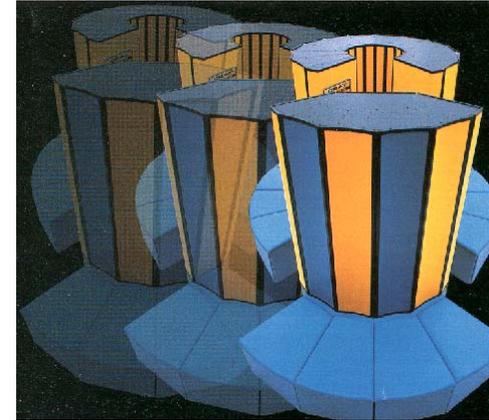
Ordinateur quantique manipule des systèmes quantiques (qubits)

- Obéit au principe de superposition.
- Les qubits peuvent valoir 0 et 1 à la fois!



Un ordinateur quantique peut effectuer simultanément tous les calculs possibles. Rend facile des problèmes difficiles (factorisation).

## Le rêve



Mais n'oublions pas le chat!



Utilise des superpositions macroscopiques: très sensible à la décohérence



## Quels systèmes pour manipuler de l'intrication ?

Des contraintes sévères....

- Systèmes quantique uniques
- Adressés individuellement
- Etat initial bien défini
- Bien isolés du monde extérieur (décohérence)
- Forte interaction mutuelle (intrication dans des « portes quantiques »)
- Etat final analysable

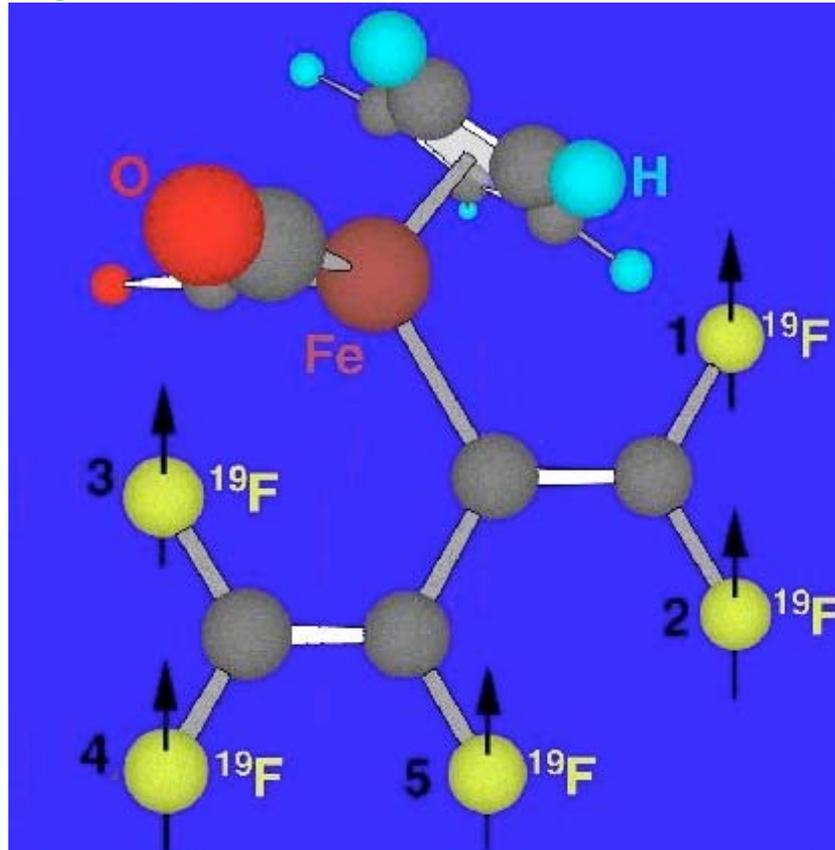
Peu de système remplissent, même en partie, ces conditions....

Encore moins ont effectivement réalisé de l'intrication



## Des outils pour explorer le monde quantique

- Résonance magnétique nucléaire

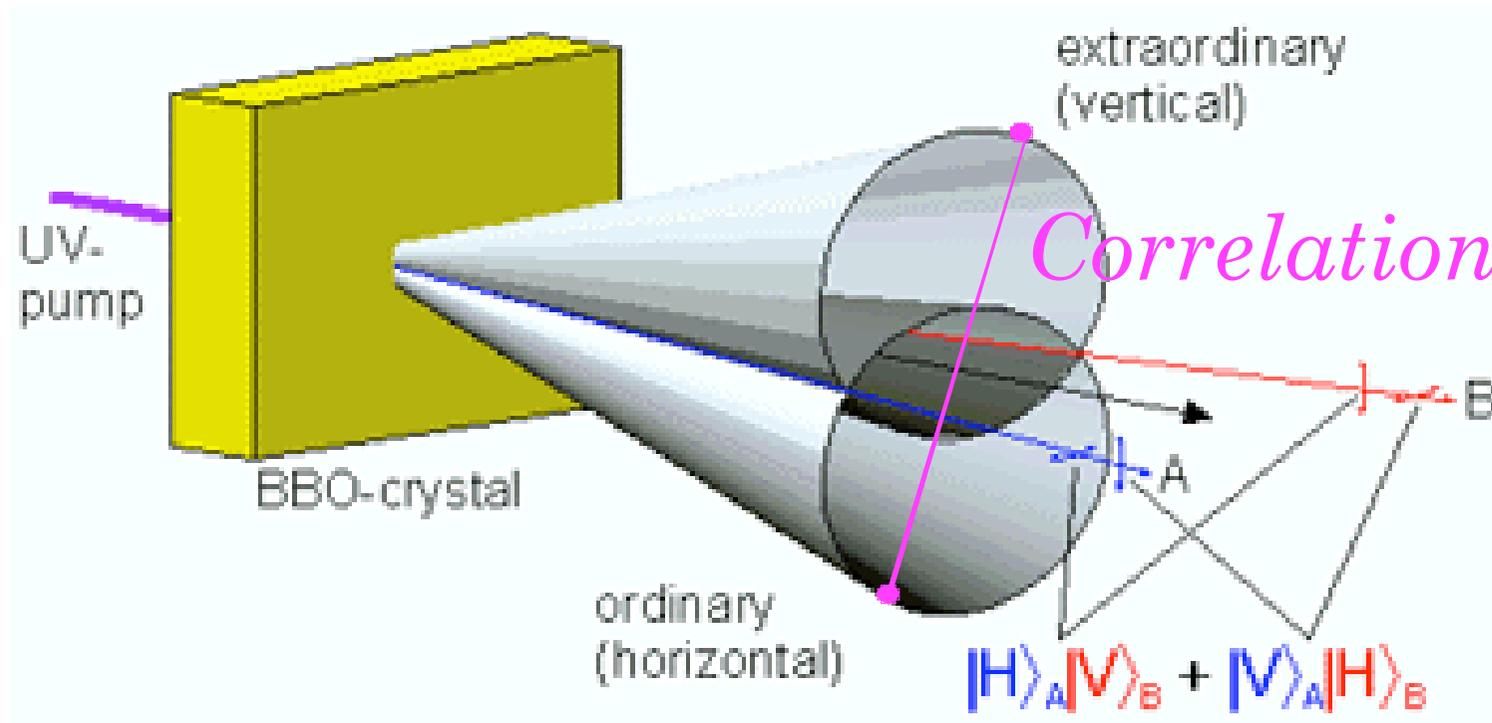


- Evolution contrôlée de spins nucléaires dans une molécule
- Intrication par interaction directe entre spins
- Applications au calcul quantique (factorisation de  $15=5 \times 3$  !)



## Des outils pour explorer le monde quantique

- Photons jumeaux

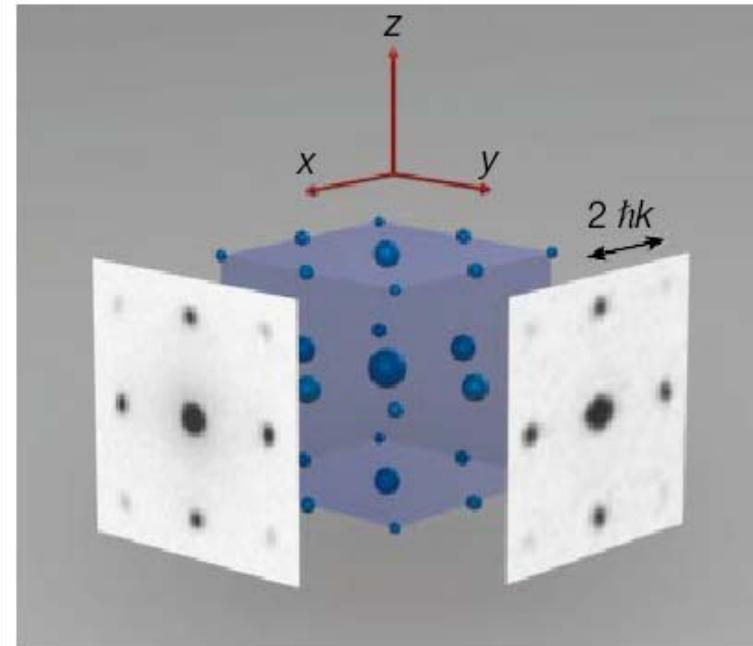
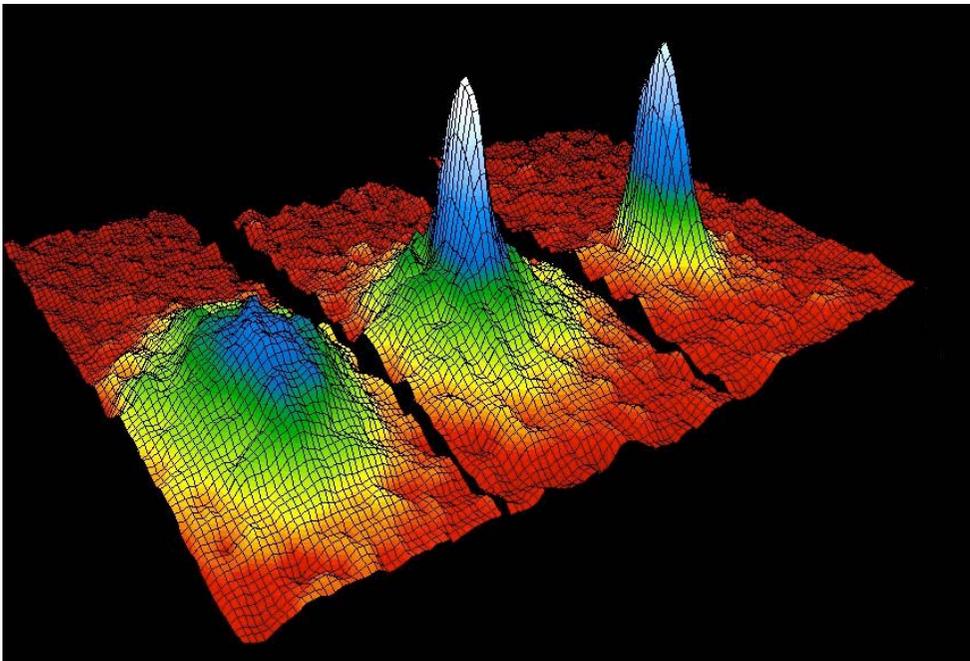


- Paires de photons produites naturellement dans un état intriqué
- Manipulation et transport aisé (fibres optiques)
- Tests de non-localité, cryptographie quantique, téléportation



# Des outils pour explorer le monde quantique

- Atomes froids et condensats de Bose-Einstein

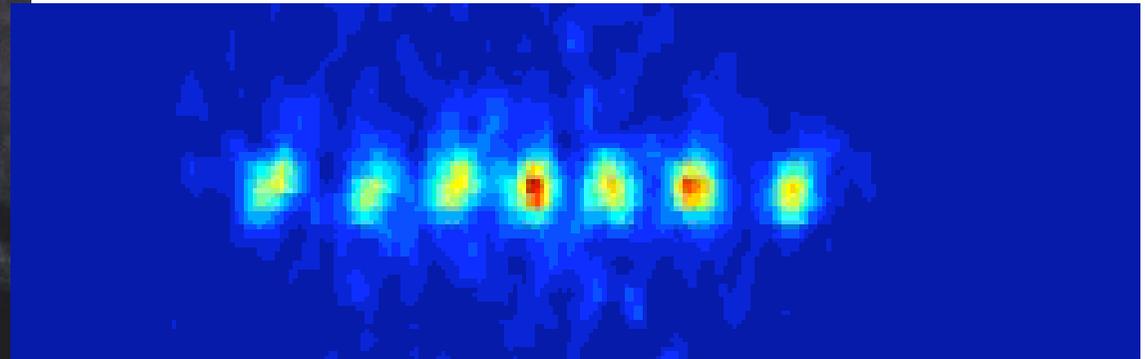
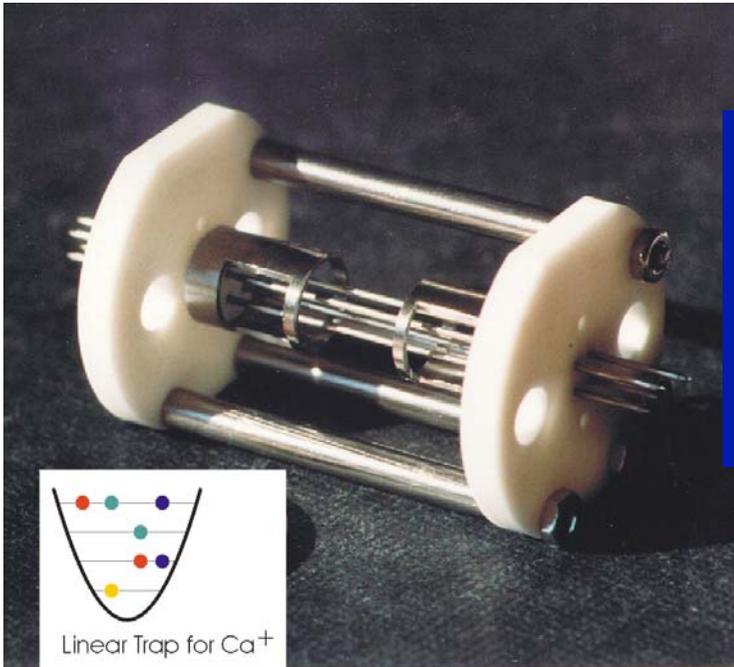


- Des réseaux réguliers d'atomes uniques
- Un système modèle pour la physique du solide
- Intrication par collisions contrôlées



# Des outils pour explorer le monde quantique

- Ions piégés

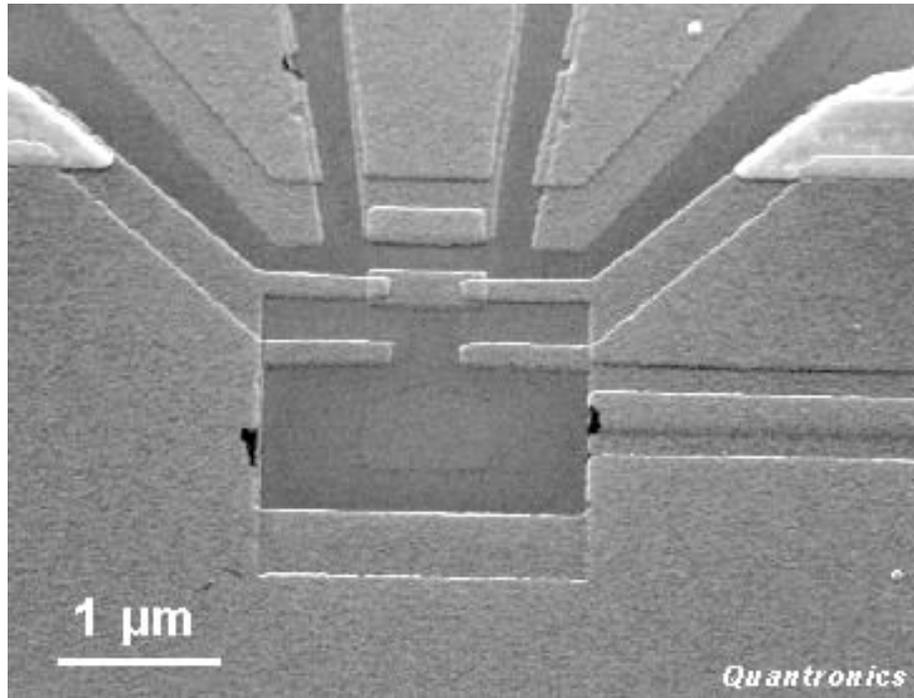


- Systèmes quantiques individuels
- Manipulations complexes d'intrication
- Algorithmes simples, téléportation



## Des outils pour explorer le monde quantique

- Circuits mésoscopiques



- Atomes artificiels de grande durée de vie
- Manipulations simples d'intrication



# Electrodynamique quantique en cavité

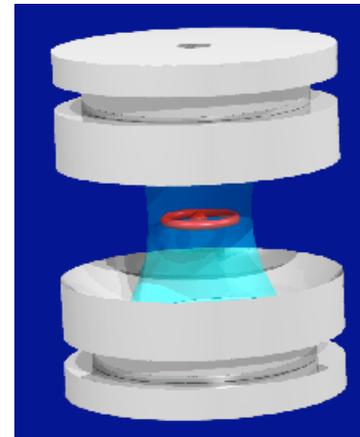
Un seul atome couplé à une « boîte à photons » (cavité)  
contenant que quelques photons

## Domaine optique



Cavité Fabry Perot.  
Piégeage d'un atome dans le champ  
d'un photon.  
Lasers à un atome

## Domaine microonde (Munich, ENS)



Notre recette: atomes de Rydberg  
circulaires dans une cavité  
supraconductrice.  
Manipulations complexes d'intrication  
Exploration de la frontière classique-  
quantique: dynamique de la  
décohérence



## Plan de l'exposé

Des illustrations de l'intrication, de la complémentarité, de la décohérence et de leurs relations

- Nos outils: atomes de Rydberg et cavités
- Une illustration expérimentale de la complémentarité
- Une expérience sur la décohérence



## Plan de l'exposé

Des illustrations de l'intrication, de la complémentarité, de la décohérence et de leurs relations

- Nos outils: atomes de Rydberg et cavités
- Une illustration expérimentale de la complémentarité
- Une expérience sur la décohérence

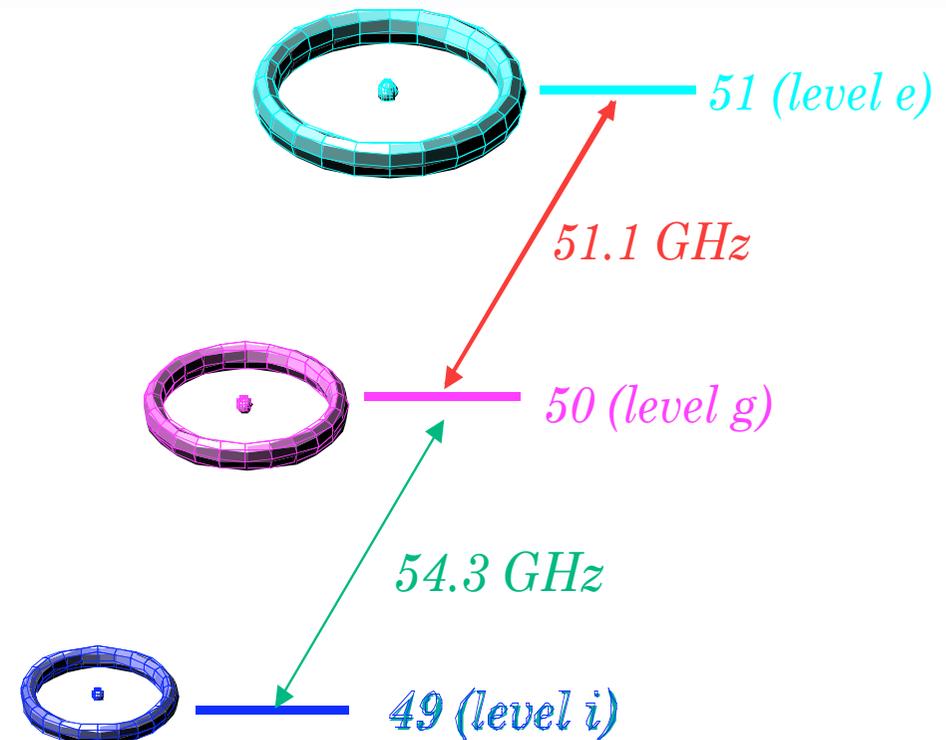


# Atomes de Rydberg circulaires

Grand nombre quantique principal

Nombres quantiques orbitaux et magnétiques maximum

- Longue durée de vie
  - Transitions à deux niveaux
  - Enorme dipôle électrique
  - Accord par effet Stark
  - Détection par ionisation par champ
    - Sélective et sensible
  - Sélection de vitesse
    - Contrôle du temps d'interaction
    - Position de l'échantillon connue
- Adressage individuel des atomes  
(séparation entre échantillons de l'ordre du cm)
- Contrôle complet des transformations



Préparation complexe (53 photons !)

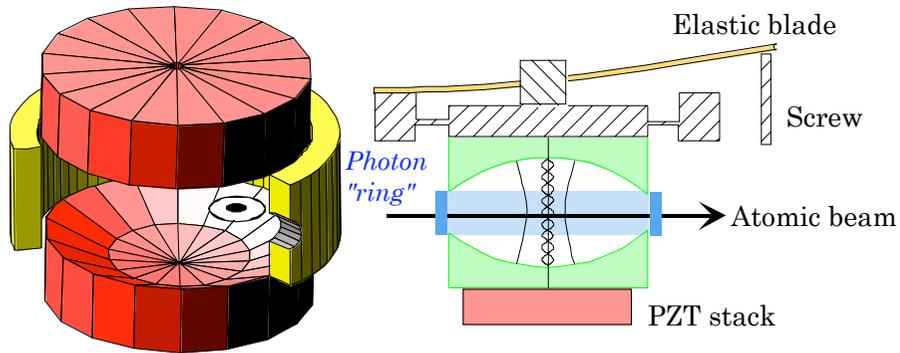
Stables dans un champ électrique

Atomes uniques: méthode « brute force »



# Cavité supraconductrice

## Schéma

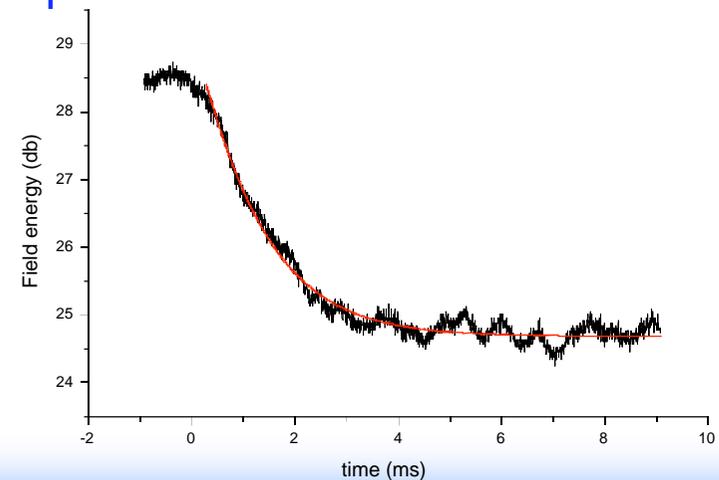


- Fabry Perot ouvert avec un « anneau de recirculation de photons »
- Compatible avec un champ électrique statique (stabilité atomique et accord de la transition)
- Très sensible aux défauts des miroirs

## Miroirs de niobium



## Temps d'amortissement: 1 ms





# Un objet à la limite classique/quantique

## Champ cohérent dans une cavité

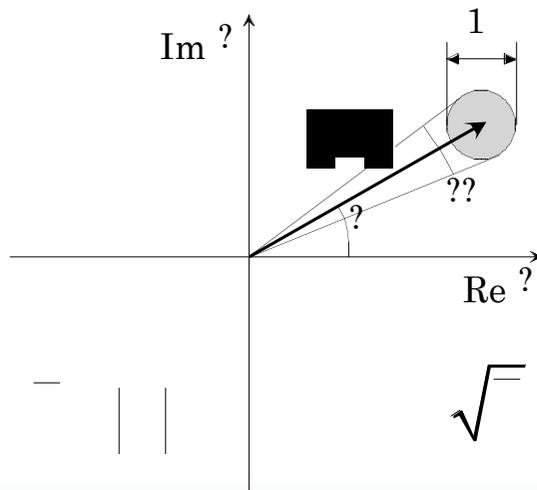
- Etat produit par une source classique couplée à la cavité

– Défini par l'amplitude complexe  $\alpha$

$$| \alpha \rangle = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{e^{-|\alpha|^2} |\alpha|^n}{\sqrt{n!}} | n \rangle$$

–  $|n\rangle$ : état de Fock

- Représentation dans l'espace des phases (plan de Fresnel)



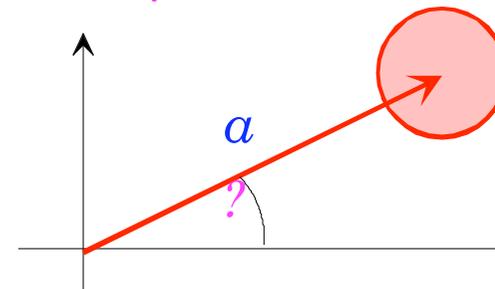
## Du classique au quantique

- Petit champ:



- Fortes fluctuations quantiques. Un champ au niveau du photon est un objet quantique

- Grand champ

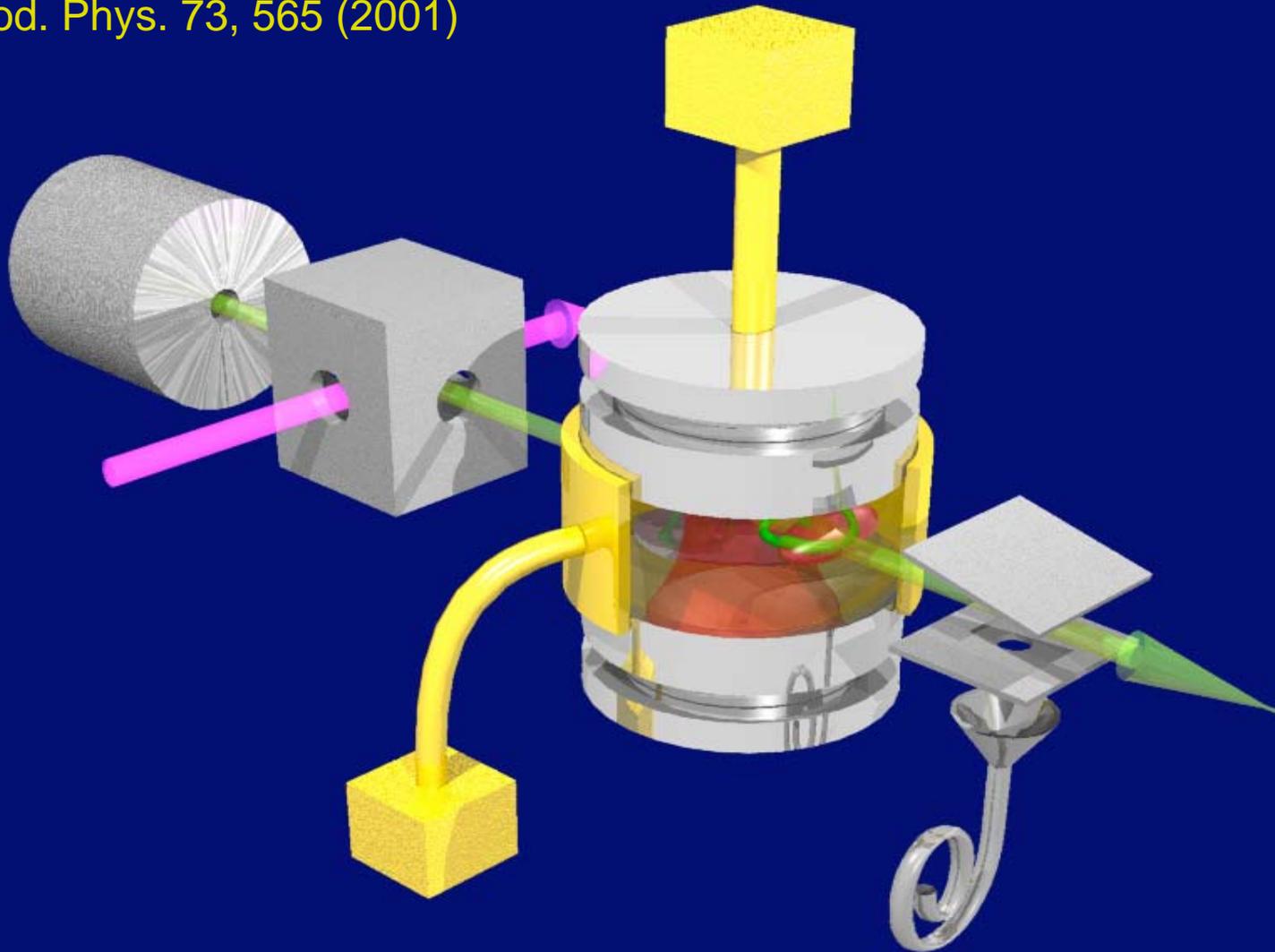


- Petites fluctuations quantiques. Un champ avec plus de 10 photons est un objet classique



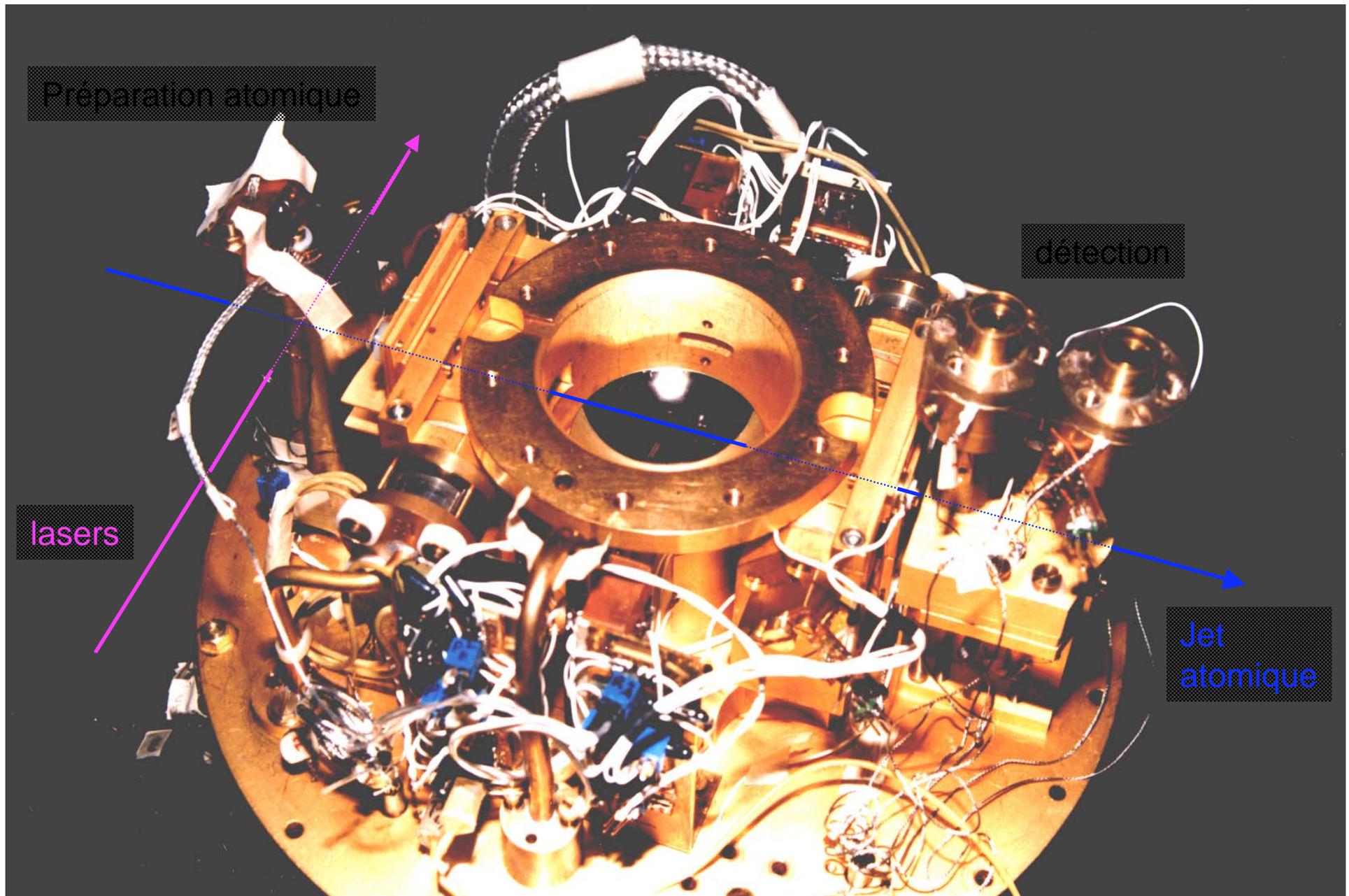
# Schéma général des expériences

Rev. Mod. Phys. 73, 565 (2001)





## Du rêve à la réalité



Préparation atomique

détection

lasers

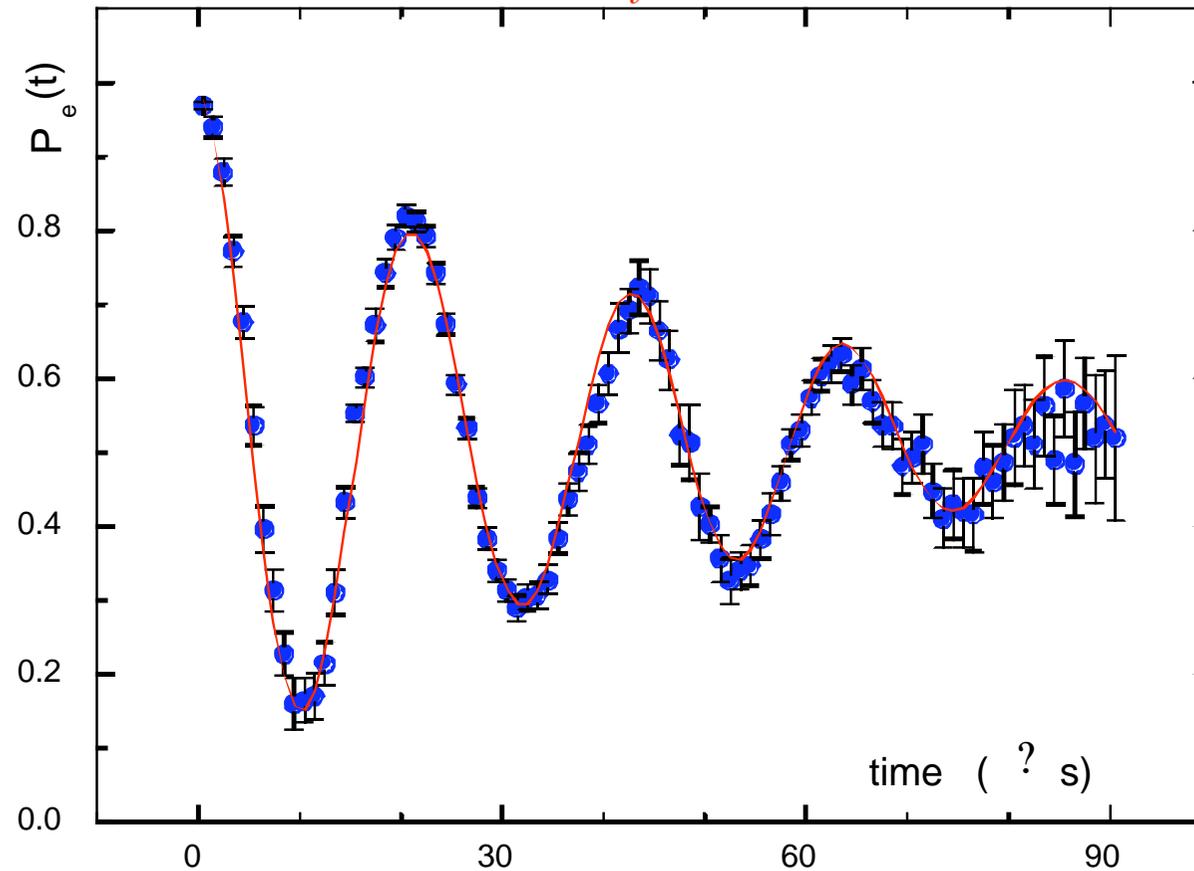
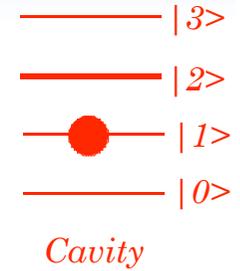
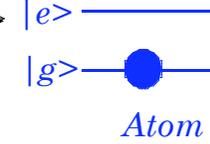
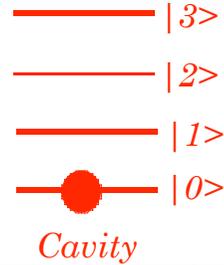
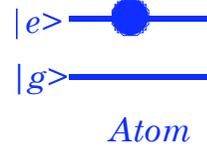
Jet  
atomique



# Interaction atome/cavité résonante

Oscillations de Rabi quantiques

Etat initial  $|e,0\rangle$



Emission spontanée oscillante et couplage fort

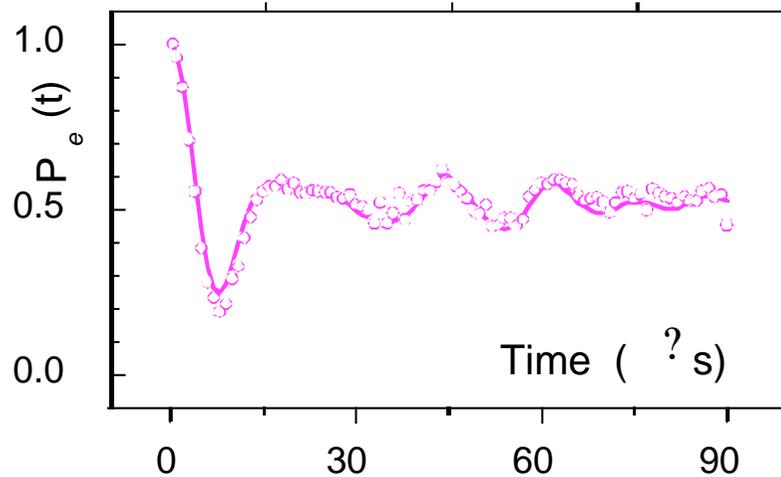


# Oscillations de Rabi dans un champ cohérent

Champ classique:

Oscillation sinusoïdale, fréquence proportionnelle à l'amplitude

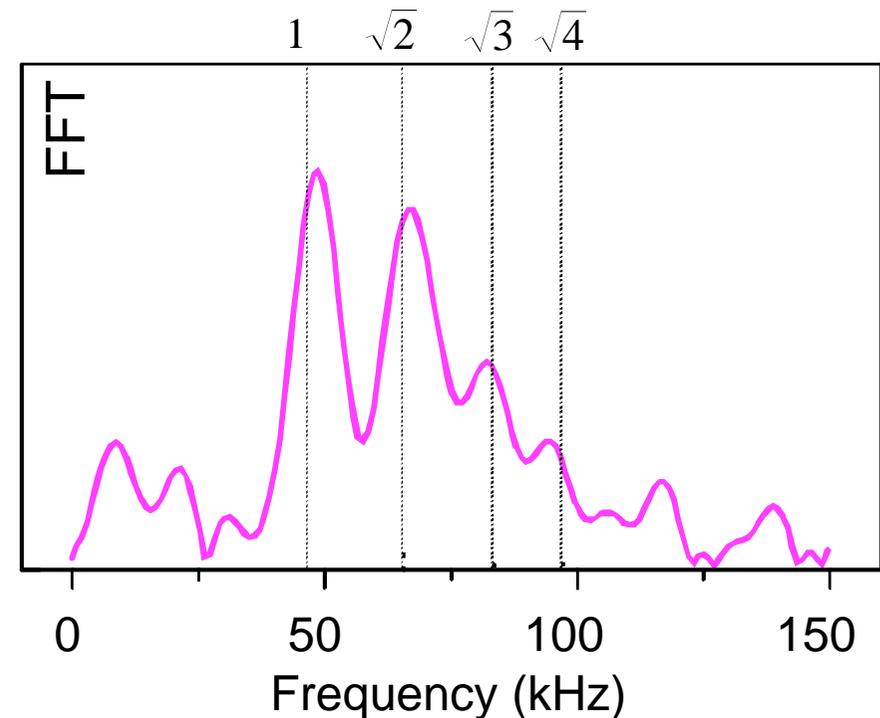
En fait, un signal complexe:



(nombre moyen de photons 0.85)

La quantification du champ en évidence

- Le spectre de fréquence de l'oscillation de Rabi révèle le spectre d'amplitude du champ



Une preuve très directe de la quantification du champ





## Trois "points" pour "tricoter" de l'intrication

Combinaison d'interactions élémentaires pour créer des états intriqués

- Copie d'état avec une impulsion  $\pi$ 
  - Mémoire quantique: PRL **79**, 769 (97)
- Création d'intrication par une impulsion  $\pi/2$ 
  - Paire EPR d'atomes: PRL **79**, 1 (97)
- Porte de phase quantique basée sur une impulsion  $2\pi$ 
  - Porte quantique: PRL **83**, 5166 (99)
  - Mesure sans absorption d'un photon unique: Nature **400**, 239 (99)
- Intrication de deux modes du rayonnement
  - Phys. Rev. A **64**, 050301 (2001)
- Intrication directe de deux atomes dans une "collision" assistée par cavité
  - Phys. Rev. Lett. **87**, 037902 (2001)
- Intrication de trois systèmes (six opérations sur quatre qubits)
  - Triplets GHZ: Science **288**, 2024 (00)



## Plan de l'exposé

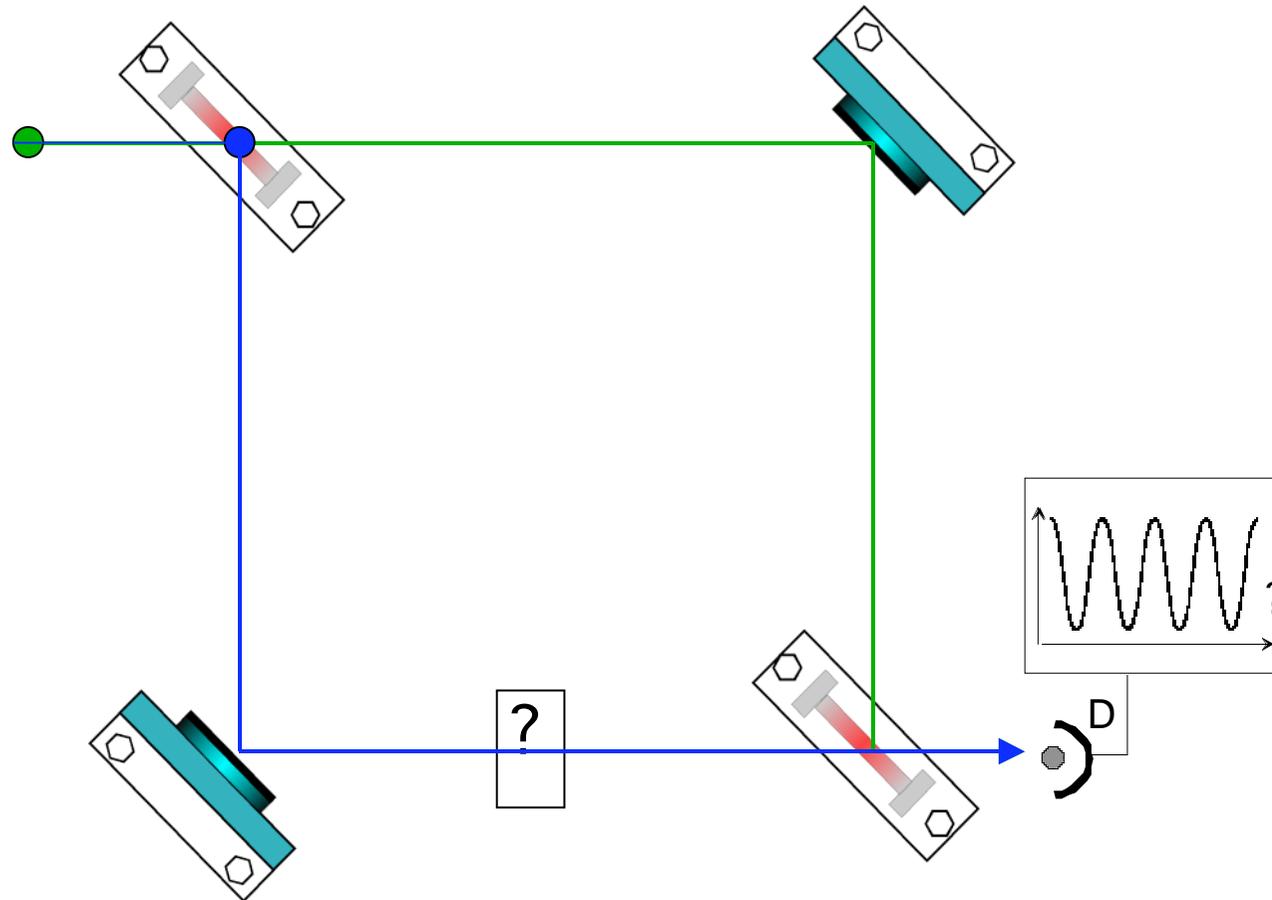
Des illustrations de l'intrication, de la complémentarité, de la décohérence et de leurs relations

- Nos outils: atomes de Rydberg et cavités
- Une illustration expérimentale de la complémentarité
- Une expérience sur la décohérence



# Une version “moderne” de l’expérience de Bohr

- Interféromètre de Mach Zehnder

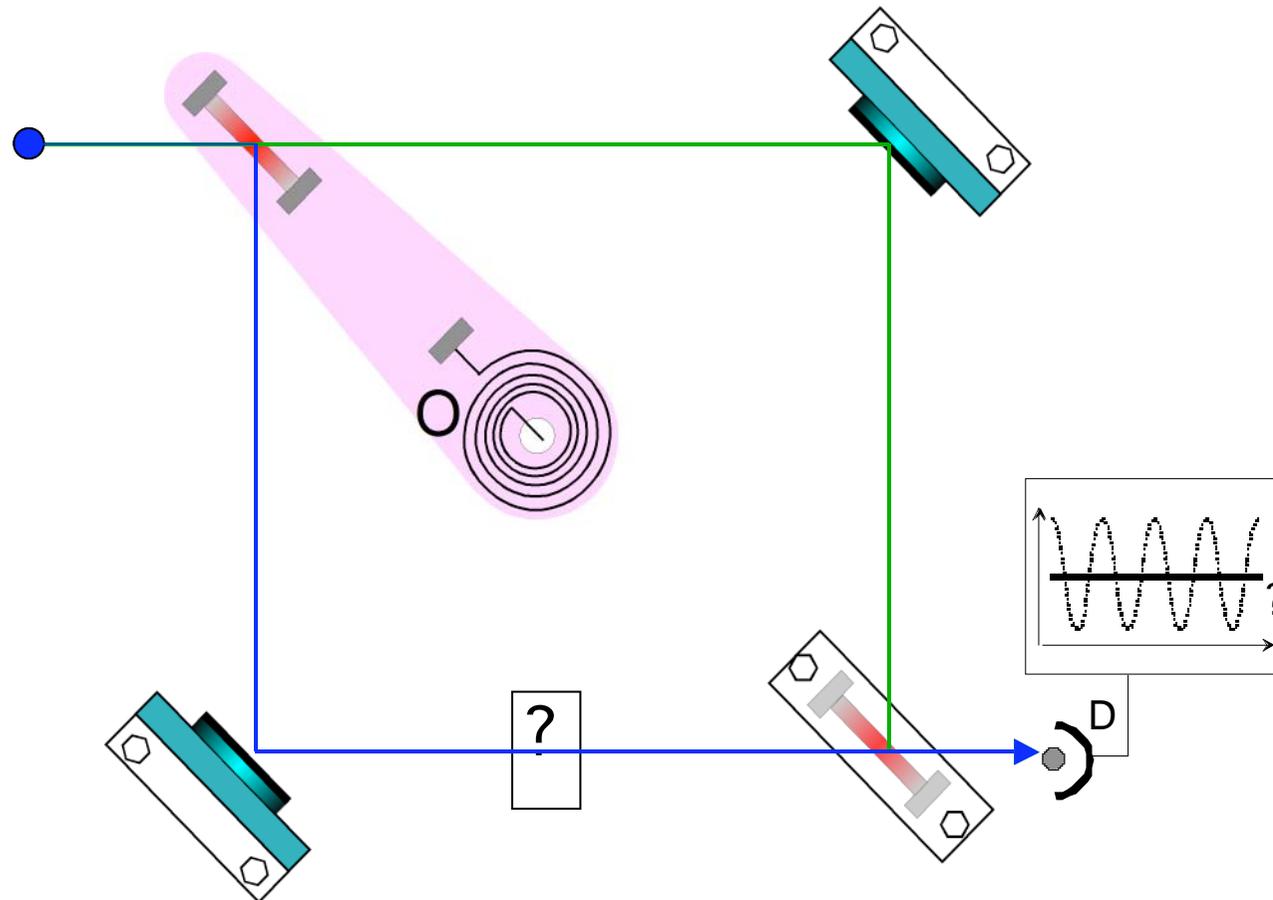


- Interference entre deux chemins séparés.
  - Information which-path?



## Une version "moderne" de l'expérience de Bohr

- Mach-Zehnder avec une séparatrice mobile



- Séparatrice 'lourde': pas d'information which path, franges
- Séparatrice microscopique: information which path, plus de franges



# Complementarité et relations d'incertitude

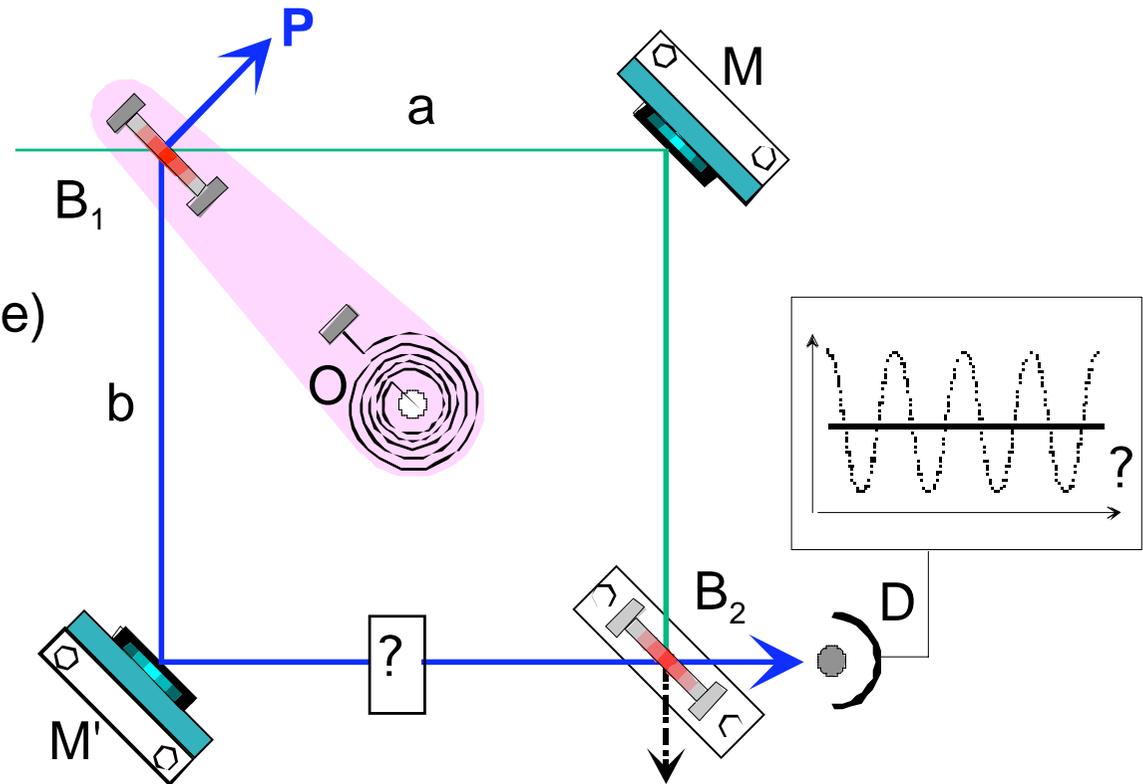
Information which path?

$$P > \Delta p$$

( $\Delta p$  fluctuations quantiques sur l'impulsion de la séparatrice)

donc

$$\Delta x > h/\Delta p > h/P = \lambda$$



Les fluctuations quantiques sur la position de la séparatrice sont plus grandes que la longueur d'onde: les franges sont brouillées



# Complémentarité et intrication

- Analyse en termes plus généraux

- Etat initial séparatrice  $| \rangle$

- Etat pour le chemin b  $| \rangle$

- Etat combine particule/sépa  $| \rangle | \rangle | \rangle | \rangle$

- Intrication particule/séparatrice
- (une paire EPR si états orthogonaux)

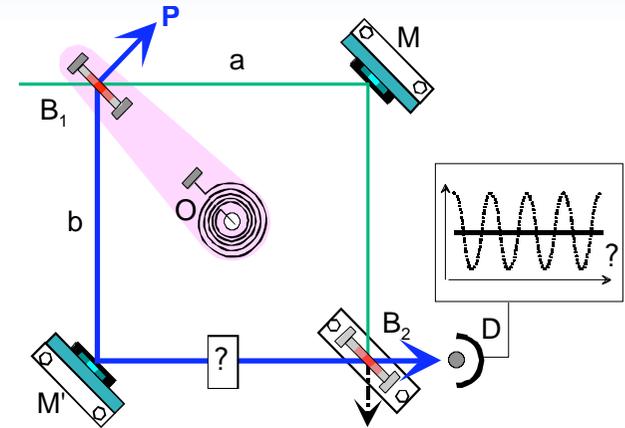
- Signal de franges  $\langle | \rangle \langle | \rangle$

- Petite masse, grande amplitude

Pas de franges  $\langle | \rangle$

- Grande masse, petite amplitude

FRANGES  $\langle | \rangle$

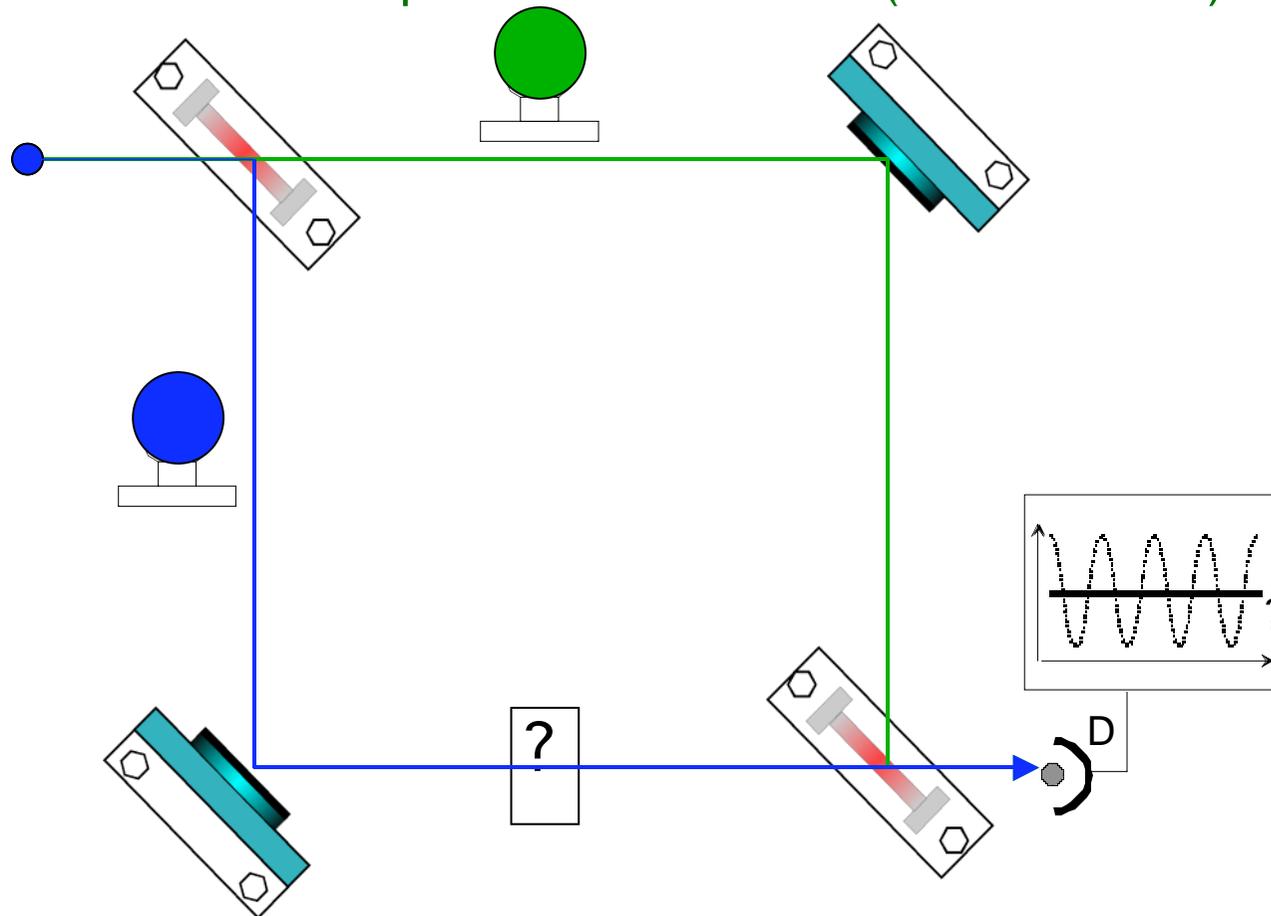




## Intrication et complémentarité

Interférences détruites par l'intrication avec un autre système

- Détecteur explicite (séparatrice / externe)
- Mesure incontrôlée par l'environnement (décohérence)

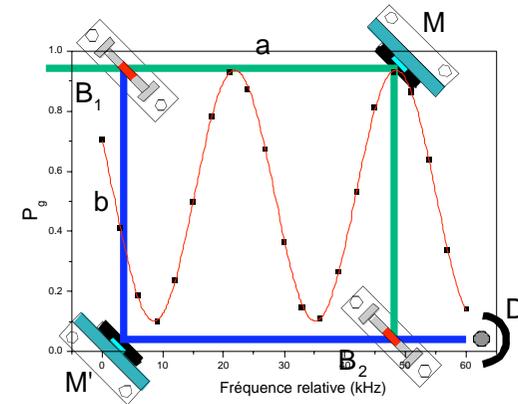
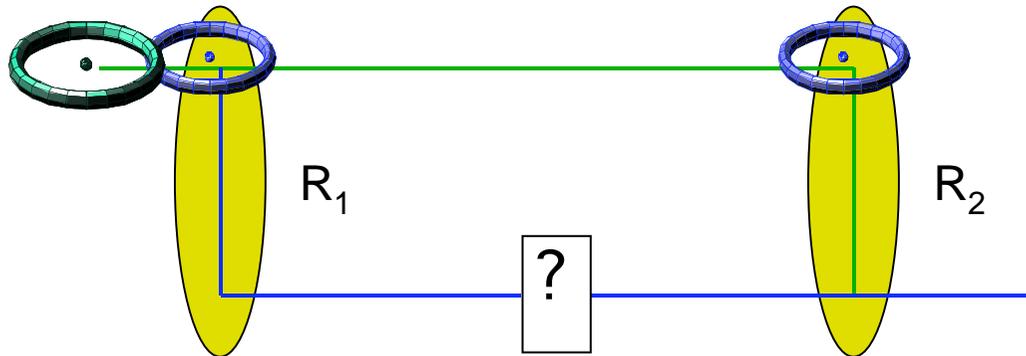


Complémentarité, décohérence et intrication intimement liées



# Un système réaliste: interférométrie de Ramsey

- Deux impulsions classiques  $\pi/2$  sur une transition atomique e/g



Information which path?

Atome émet dans  $R_1$  ou  $R_2$

Champs macroscopiques habituels

(séparatrice lourde)

Etat du champ peu modifié. Pas de which path

FRANGES

Champ mésoscopique

(séparatrice légère)

Addition d'un photon change le champ. "which path"

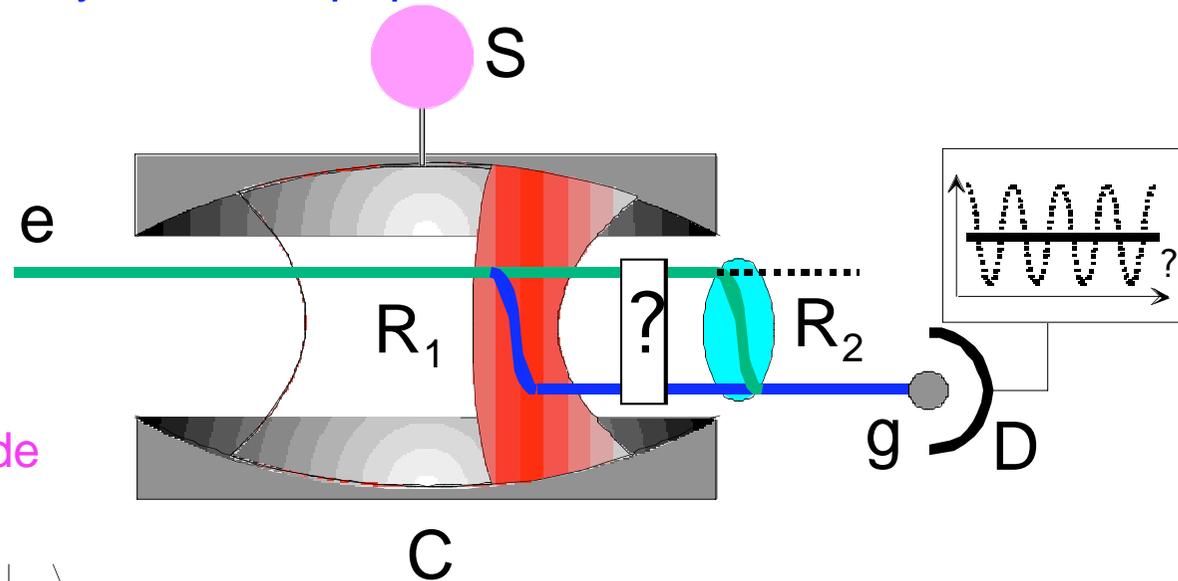
Pas de FRANGES



# Expérience de Bohr avec interféromètre de Ramsey

- Stocke un champ Ramsey mésoscopique dans la cavité

Temps d'interaction  
Ajusté pour  $\pi/2$   
Possible même si C est vide



- Etat initial cavité  $| \rangle$
- Etat atome-cavité intermédiaire  $| \rangle \frac{1}{\sqrt{2}} ( | \rangle + | \rangle )$ 
  - **Contraste des franges**  $| \rangle | \rangle$

## – Grand champ

- $| \rangle | \rangle | \rangle | \rangle$  **FRANGES**

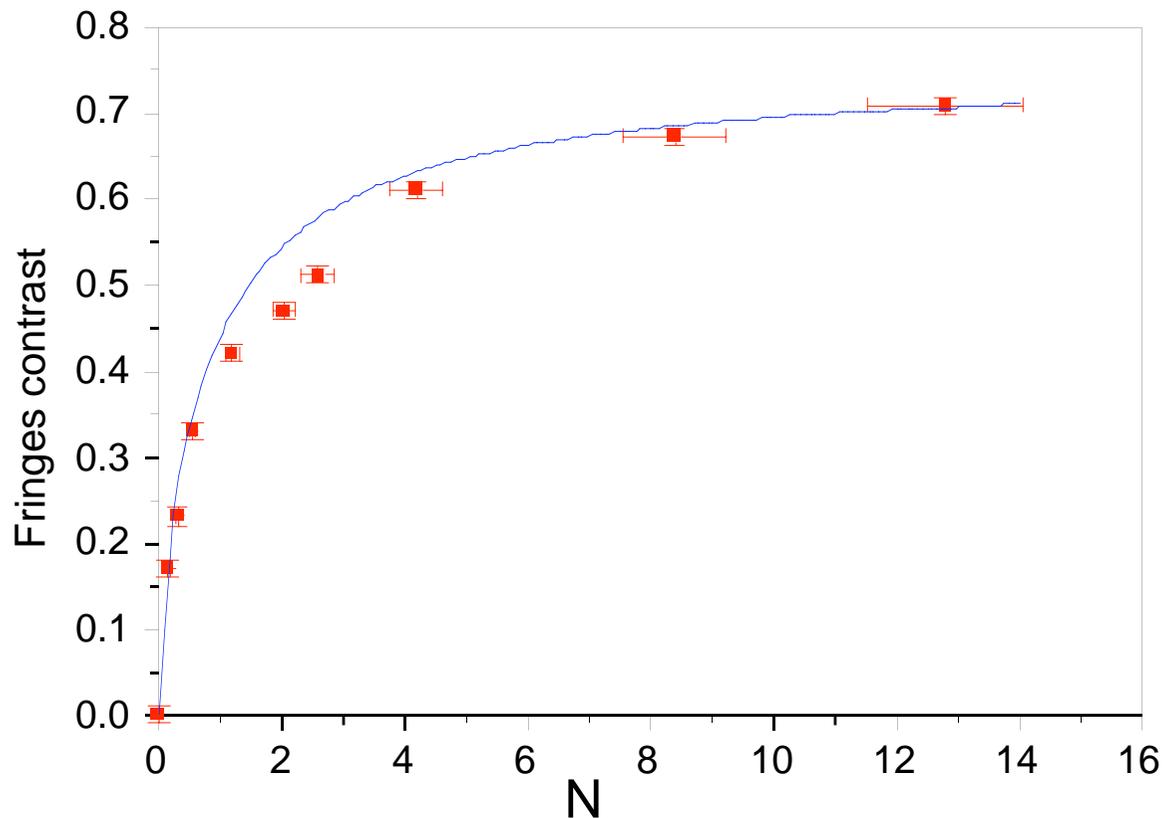
## – Petit champ

- $| \rangle | \rangle | \rangle | \rangle$  **PAS DE FRANGE**



# Limite classique/quantique de l'interféromètre

## Contraste des franges en fonction du nombre de photons N



Nature, **411**, 166 (2001)

Plus de franges pour un champ quantique

N équivalent à la masse de la séparatrice

Une illustration de la relation de Heisenberg  $\Delta N \Delta \Phi$  :

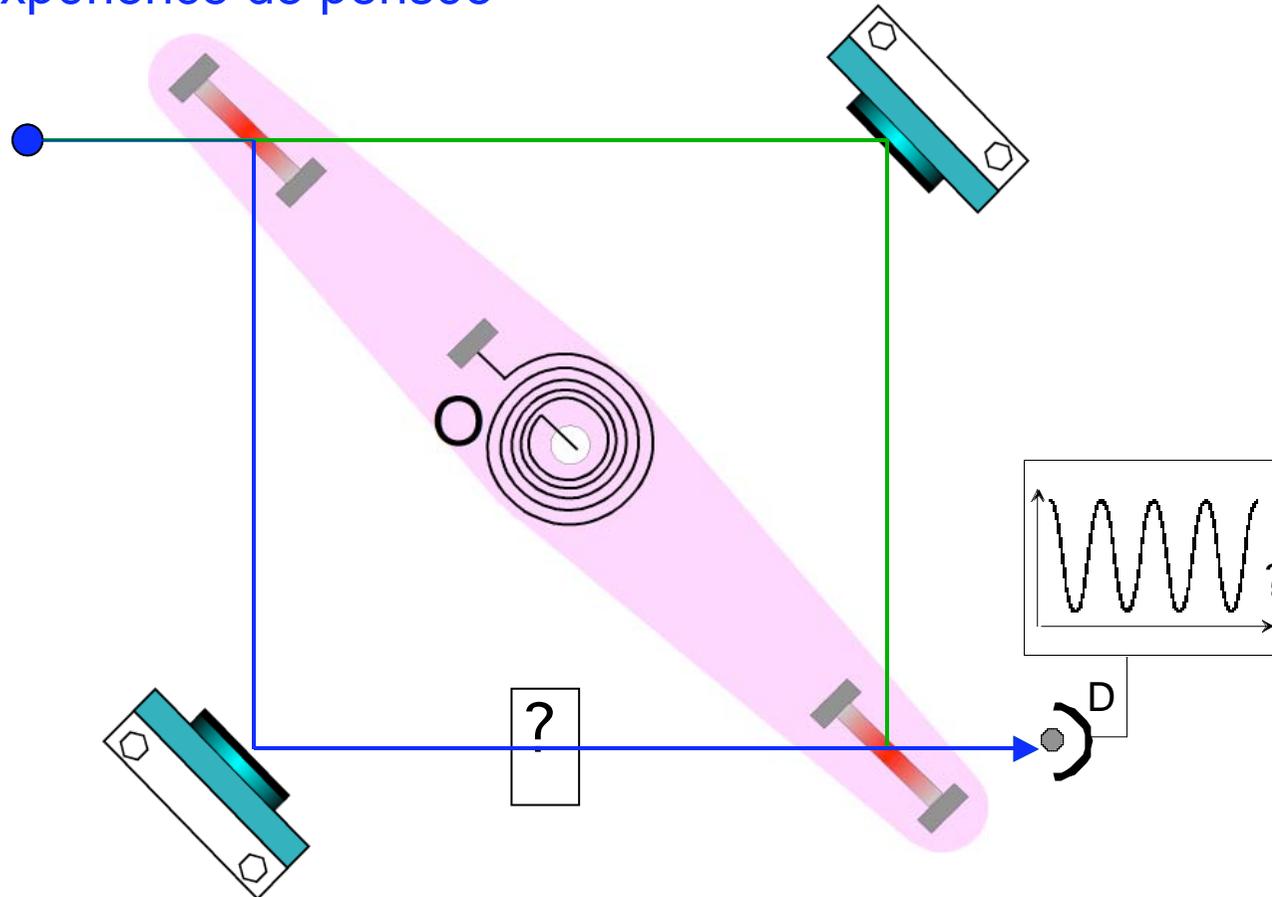
- Ramsey révèle les corrélations de phase.
- Petit champ: grandes fluctuations de phase: pas de franges

Pas un brouillage trivial: l'intrication atome/champ peut être effacée et les franges restituées



## Une gomme quantique élémentaire

- Une autre expérience de pensée

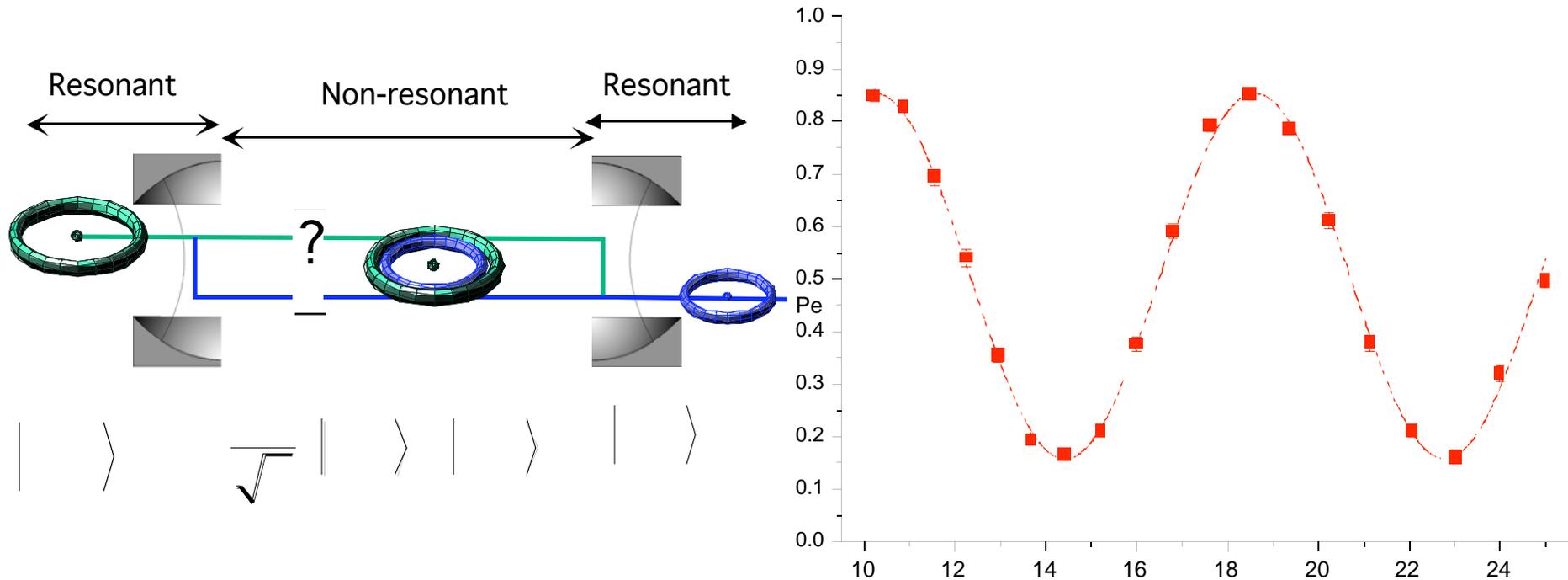


La deuxième interaction avec l'équipage mobile efface l'intrication produite par la première et restitue les franges



# La gomme quantique

- Une deuxième interaction avec le mode efface l'intrication



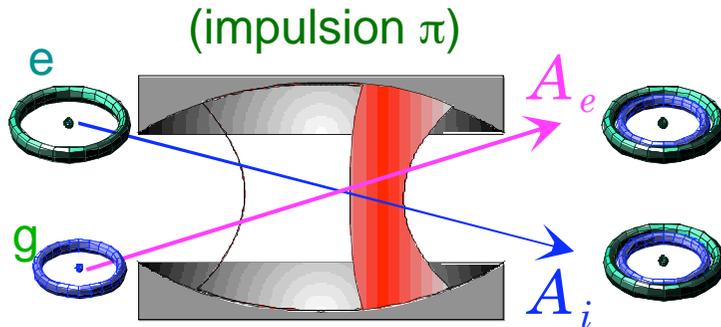
- Des franges de Ramsey sans champ !
  - Un bon outil pour des manipulations quantiques



# Une vraie gomme quantique

## Manipuler l'intrication atome/champ

- Atome  $A_i$  interagit avec C
- Copie l'état de C sur l'autre atome  $A_e$



Etat des deux atomes:

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

Une paire EPR atomique !

Détection directe de  $A_e$ : pas de franges pour  $A_i$

Intrication avec  $A_e$  ou C donne une info. « which path » pour  $A_i$ .

## Effacer l'intrication

impulsion  $\pi/2$  sur  $A_e$  mélange les états

Etat final:

$$- | \rangle | \rangle + | \rangle | \rangle$$

Détection de  $A_e$  projette  $A_i$  sur une superposition d'états avec une phase bien définie, conditionnée par  $A_e$ .

## FRANGES

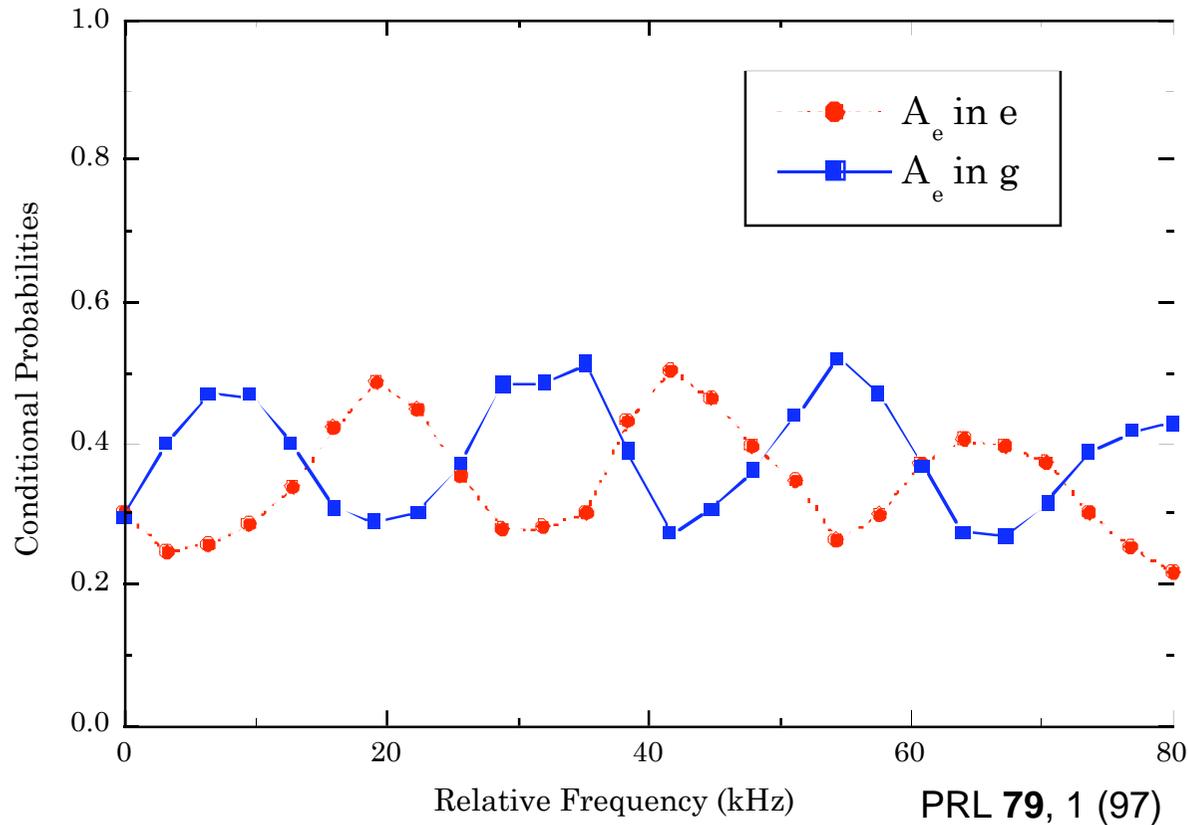
après une impulsion  $\pi/2$  classique sur  $A_i$

Phase des franges conditionnée à l'état de  $A_e$

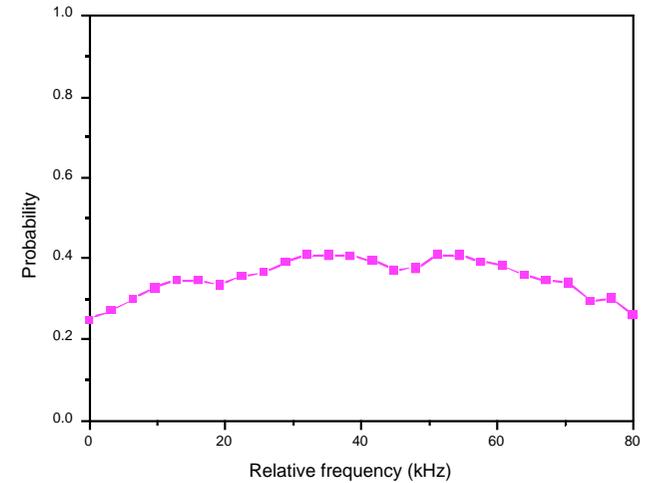


# Une expérience sur une paire EPR d'atomes

Franges de Ramsey conditionnelles sur  $A_i$



Pas de franges quand  
On trace sur  $A_e$



Démonstration d'une "gomme quantique" et intrication contrôlée de deux atomes



## Plan de l'exposé

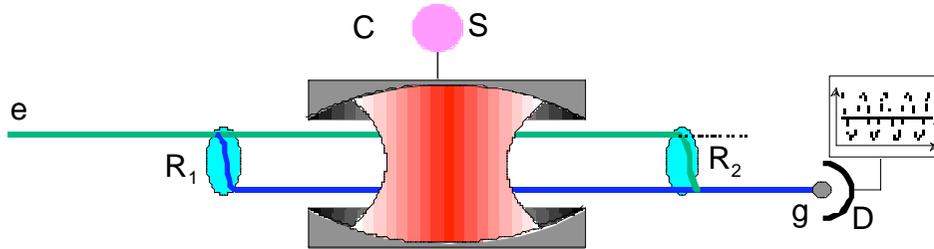
Des illustrations de l'intrication, de la complémentarité, de la décohérence et de leurs relations

- Nos outils: atomes de Rydberg et cavités
- Une illustration expérimentale de la complémentarité
- Une expérience sur la décohérence



# Une autre expérience sur la complémentarité

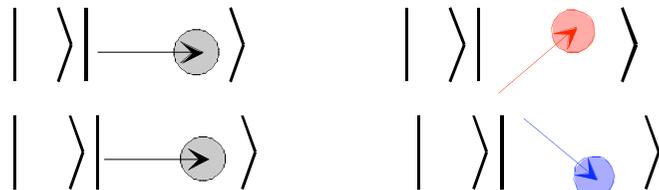
Cavité comme un détecteur externe dans l'interféromètre de Ramsey



Champ cohérent dans la cavité initialement

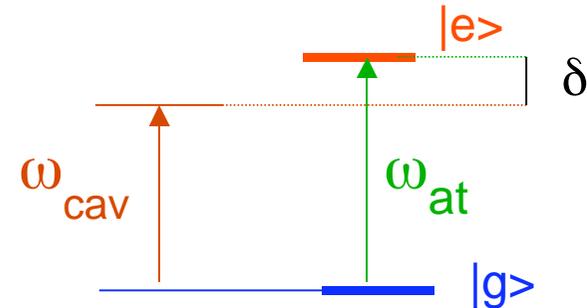


« Which path »: Corréler la phase du champ à l'état de l'atome



Comment?

Interaction dispersive atome/cavité



- désaccord  $\delta = \omega_{at} - \omega_{cav}$
- Couplage  $\Omega$

Régime dispersif  $\delta \gg \Omega$

Pas d'échange d'énergie

mais:

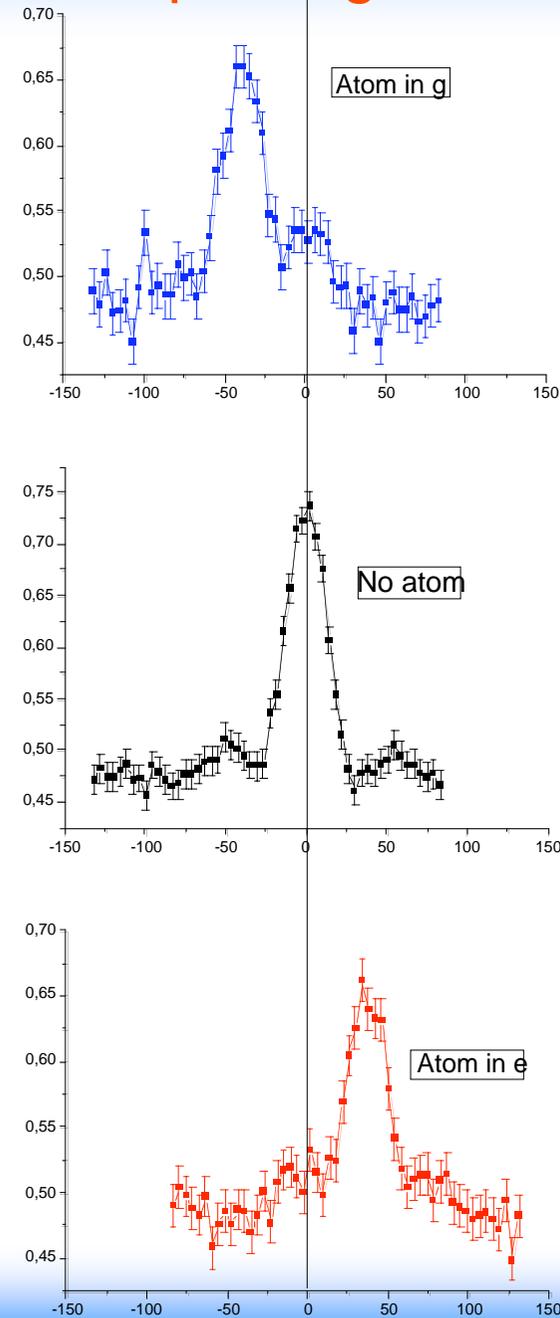
- Modification de la fréquence de C
  - (indice de réfraction de l'atome)
- Modification de la fréquence atomique
  - (Lamb shift et déplacements lumineux)



# Mise en évidence directe du déphasage du champ

Mesure de la distribution de phase du champ par une méthode homodyne

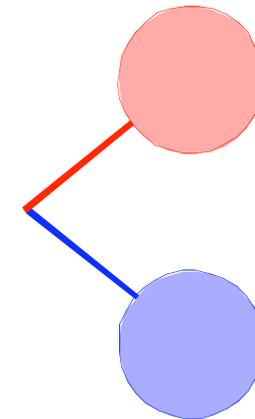
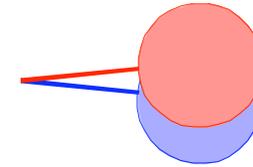
Deux composantes de phase associées aux deux états de l'atome





## Deux cas limites

- Petit déphasage (grand  $\delta$ )
  - Petit par rapport aux fluctuations quantiques
- Pas d'information « which path »:
  - Franges
- Grand déphasage (petit  $\delta$ )
  - Grand par rapport aux fluctuations quantiques
- Information « which path » non ambiguë
  - Pas de franges



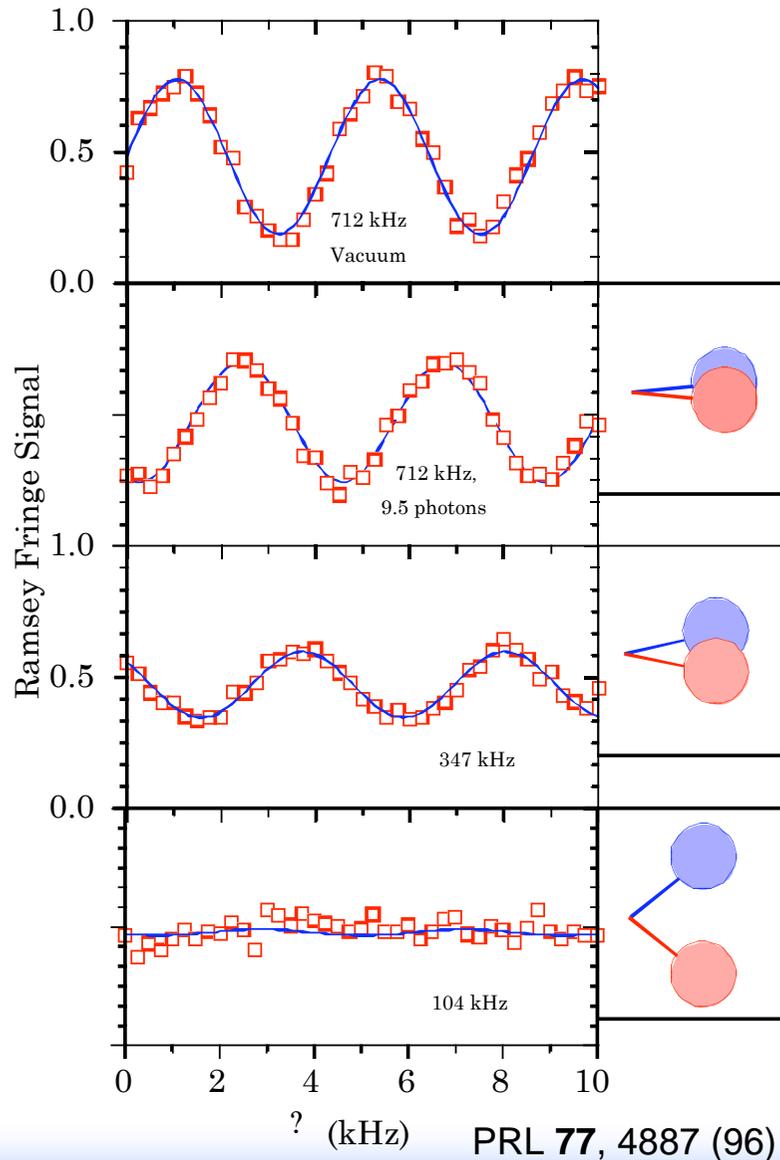
Le champ dans la cavité est un bon détecteur de l'état atomique quand il est classique.

Situation complémentaire de celle où le champ est utilisé comme séparatrice

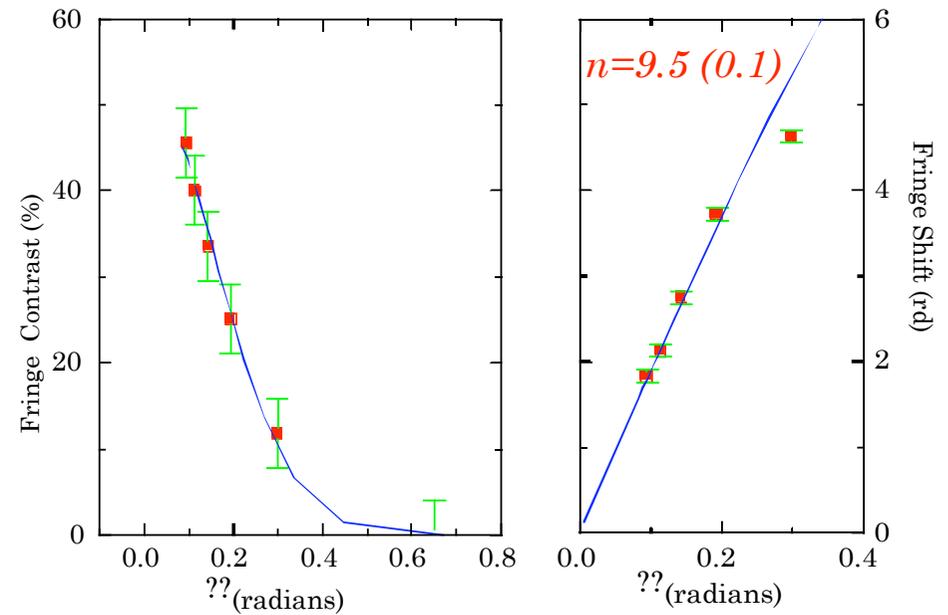


# Franges de Ramsey

## Complémentarité



## Contraste et phase des franges



- Très bon accord avec les prédictions théoriques.
- Pas un effet trivial de brouillage

Calibration du champ dans la cavité  
9.5 (0.1) photons en moyenne



# Une version de laboratoire du chat de Schrödinger

Etat final du champ

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \left( \left| \begin{array}{c} \uparrow \\ \leftarrow \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \downarrow \\ \rightarrow \end{array} \right\rangle \right)$$

Superposition cohérente de deux états classiques.

Très semblable au chat de Schrödinger



Décohérence transforme cette superposition en mélange statistique

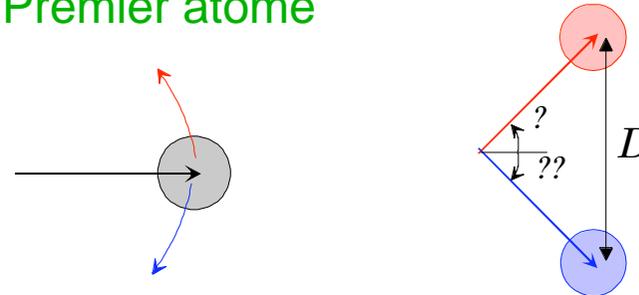
Relaxation lente: la dynamique de la décohérence est accessible

Décohérence prise sur le fait

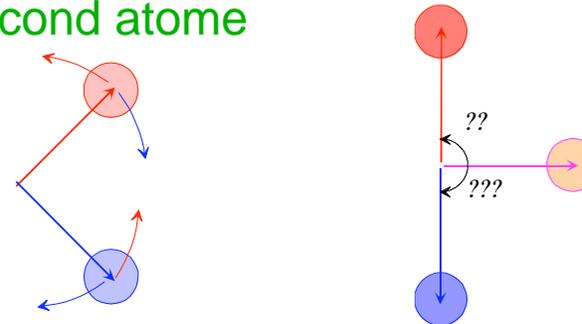
Un atome sonde la décohérence

Interférences quantiques impliquant le champ dans la cavité

Premier atome



Second atome

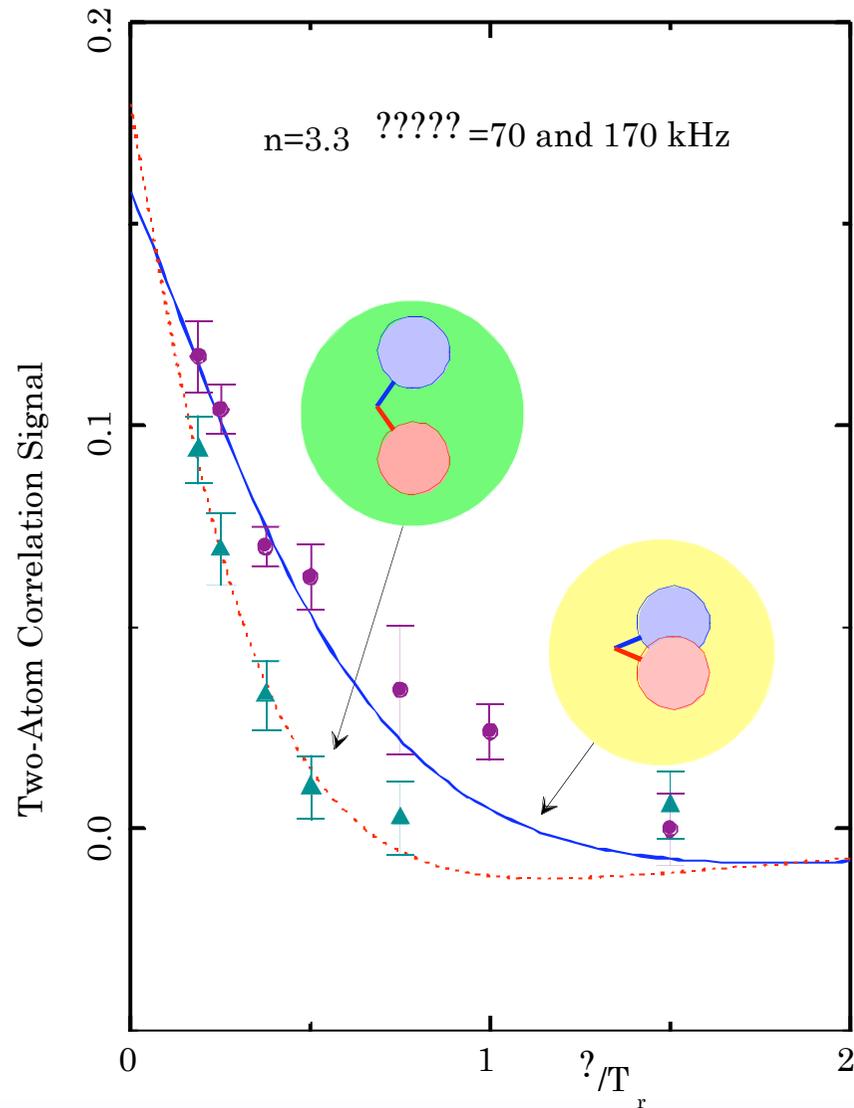


Deux chemins quantiques indistinguables vers le même état final: **INTERFERENCES**

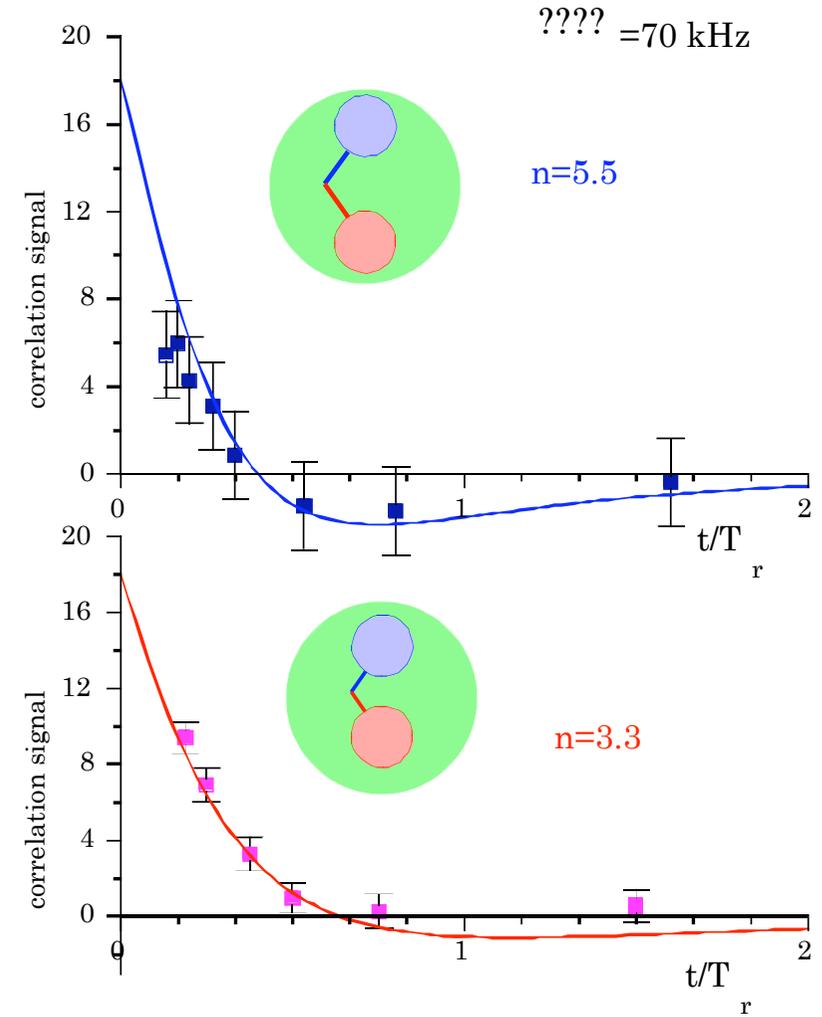


# Une étude de la décohérence

## Signal de corrélation atomique



## Décohérence et « taille » du chat



PRL 77, 4887 (1996)



## Caractéristiques essentielles de la décohérence

- Plus rapide que l'amortissement du champ
- D'autant plus rapide que les états superposés sont différents
- Echelle de temps de la décohérence dépend d'un paramètre décrivant la « macroscopicité » de l'état
- Très liée au concept de complémentarité: l'environnement acquiert une information « which-path » sur le chat.

Pas un mécanisme de relaxation trivial, même s'il est bien décrit par la théorie standard des systèmes quantiques couplés à un environnement

### Essentielle pour la mesure quantique

Le champ de la cavité est une aiguille d'un appareil de mesure qui n'évolue pas dans une superposition d'états

### Obstacle pour les applications de la mécanique quantique

Plus complexe est l'état intriqué, plus rapide est la décohérence



## Conclusion et perspectives

Atomes circulaires et cavités: de bons outils pour tester la mécanique quantique fondamentale

- Intrication
- Complémentarité
- Etats non classiques
- Décohérence
- Systèmes de traitement quantique de l'information

Améliorations en cours:

- Meilleures cavités
- Meilleure efficacité de détection
- Meilleur contrôle des transformations d'états atome/cavité

Pour quelles expériences ?

- Manipulations complexes d'intrication et algorithmes quantiques
- Fonctions de Wigner d'états non-classiques
- « Métrologie » de la décohérence
- Deux cavités:
  - Etats non-locaux mésoscopiques.
  - Des paires EPR de chats de Schrödinger.
  - Nouveaux tests de notre compréhension de la décohérence