

Collège de Physique et de Philosophie
Séance du 14 mars 2011 à l'Institut de France
Exposé de Jean-Michel Raimond (Département de Physique de l'ENS)

Bernard d'Espagnat. Nous allons avoir le plaisir d'avoir un exposé sur la décohérence et surtout de l'entendre de la bouche même de Jean-Michel Raimond qui – nous le savons tous – est l'un des principaux auteurs de l'expérience décisive en la matière, celle qui a montré que, juste après avoir subi sa fameuse mésaventure, un chat de Schrödinger mésoscopique est bien dans un état de superposition quantique, 'mort plus vivant', et que ce n'est qu'au bout d'un certain temps, très court mais mesurable, qu'il devient à nos yeux soit mort soit vivant.

Avant d'entendre de vous, cher Jean-Michel, la narration de cette palpitante histoire je vous demande juste la permission de dire trois mots de nos projets. Nos discussions de novembre et de janvier ont montré qu'il y avait chez nous un vrai bouillonnement d'idées, et le Collège de physique et de philosophie estime que l'étape suivante sera en quelque sorte de mettre de l'ordre dans tout ça, en demandant à chacun des physiciens parmi nous – et il y en a ! – qui ont contribué à une conception nouvelle de la réalité ou de la causalité, ou de l'information, etc. – tout ça, naturellement, c'est lié – de nous l'exposer sereinement et en détail lors d'une séance ou deux consacrées essentiellement à cette conception-là et à sa discussion. Mais nous avons jugé aussi que nous ne pouvions pas ne pas discuter quelque peu d'une idée, très vieille, certes, qui n'est pas de nous, mais qui, *a priori*, semble au profane toute naturelle, celle qui consiste à dire non pas « tantôt onde tantôt particule » mais « onde et particule », autrement dit la théorie, chère à John Bell, de Louis de Broglie et David Bohm, qu'on peut ne pas aimer pour de bonnes raisons mais qui, nous le verrons, est plus coriace que les physiciens ne le pensent en général. Je dis « nous le verrons » parce que Franck Laloë, bien qu'il n'en soit pas lui-même un adepte, a très gentiment accepté de nous instruire à son sujet. Cela fera l'objet d'une de nos prochaines séances ; il a été envisagé que ça soit celle de rentrée, en fin septembre.

Le thème de la décohérence et de son interprétation est suffisamment important pour que les échanges qu'il va susciter ne soient pas limités d'office à la séance d'aujourd'hui. Ils vont donc se continuer dans la séance de mai, lors de laquelle, s'il reste un peu de temps, il sera bon que nous revenions aussi sur la question philosophique des définitions du réalisme, qui a été laissée en rade la dernière fois.

Pardon pour cette incidente. Cher ami, vous avez maintenant la parole.

EXPOSÉ DE JEAN-MICHEL RAIMOND

(Ndr. Les transparents de J-M. Raimond étant particulièrement bien structurés nous les reproduisons en ajoutant, après chacun d'eux, la retranscription de l'intervention orale.)



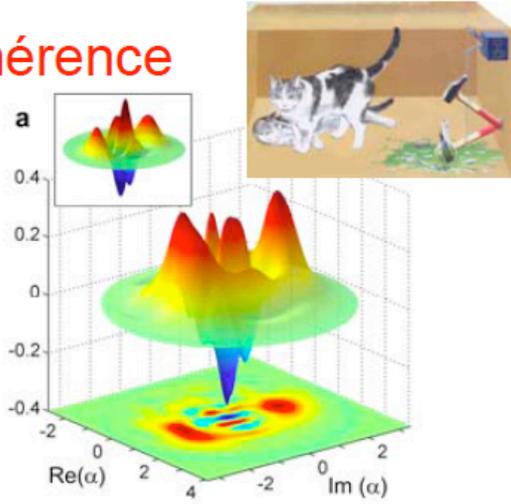
Superposition, intrication complémentarité et décohérence

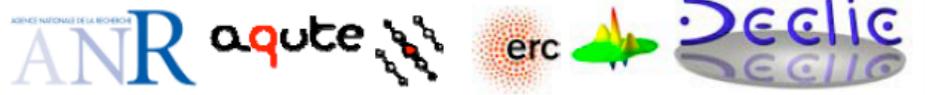
J.M. Raimond



Laboratoire Kastler Brossel
Physique quantique et applications

Département de Physique
Ecole Normale Supérieure





Merci beaucoup de cette invitation Je vais donc parler, comme prévu, de décohérence et, en particulier, de cette expérience que nous avons réalisée avec Serge Haroche, Michel Brune et beaucoup d'autres en 1996 à l'ENS. Mais je voudrais en fait relier décohérence, superposition, intrication et complémentarité, et vous montrer qu'à mon sens, au moins dans l'acception très simple que j'en prends, superposition, complémentarité et décohérence sont trois faces d'un même dé (pour autant que l'on puisse parler de dés à trois faces). Je mentionne bien sûr sur cette diapositive toutes les agences de financement qui contribuent au développement de notre expérience. Il faut bien dire que les expériences de physique fondamentale sont parfois coûteuses.

Cette expérience est loin d'être la seule sur le sujet. Sur la décohérence, il y en a beaucoup d'autres que je n'aurai pas le temps de discuter mais qui partagent beaucoup de points, au moins conceptuels, communs.



Un intérêt renouvelé pour la physique quantique fondamentale

- Expériences sur des systèmes quantiques uniques dans un environnement bien contrôlé
 - atomes, ions, photons, circuits supraconducteurs, oscillateurs mécaniques...
 - Réalisation des expériences de pensée des pères fondateurs de la physique quantique
 - boîtes à photons, chats de Schrödinger...
 - Une nouvelle lumière sur les phénomènes quantiques fondamentaux
 - Superposition, intrication, complémentarité et – DECOHERENCE
 - Prototypes de manipulation quantique de l'information

Académie 2011 2

Ces expériences font partie d'un renouveau certain de la mécanique quantique fondamentale dans le domaine de la physique expérimentale. Pendant longtemps, ces affaires de décohérence, d'intrication, de non-localité étaient considérées comme de pures curiosités intellectuelles pour philosophes. Mais le sujet est revenu très à la mode dans les vingt dernières années – et plus particulièrement dans les dix dernières – avec, d'abord, l'avènement de techniques expérimentales qui permettent de réaliser nombre des « expériences de pensée » des pères fondateurs en manipulant un seul atome, un seul photon, des boîtes à photons, des chats de Schrödinger, comme on va le voir. Et puis aussi parce qu'il y a derrière cela – et c'est particulièrement important, vous avez vu, je pense, la note d'Alexei Grinbaum – tout ce qui relève de l'information quantique. Comment la mécanique quantique se marie-t-elle avec la théorie de l'information, pour éventuellement être utilisée pour faire des choses que ne font pas les ordinateurs classiques ? Tout cela jette une nouvelle lumière sur les phénomènes quantiques fondamentaux, et en particulier sur ce phénomène de décohérence.



Superpositions quantiques

Etat quantique

Notation de Dirac (ket) $|\Psi\rangle$

- Contient toute l'information sur le système
 - Une particule localisée en x $|x\rangle$
 - Une particule localisée en y $|y\rangle$

La mécanique quantique est une théorie linéaire. Toute somme d'états possibles est aussi un état possible

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

est un état possible de la particule

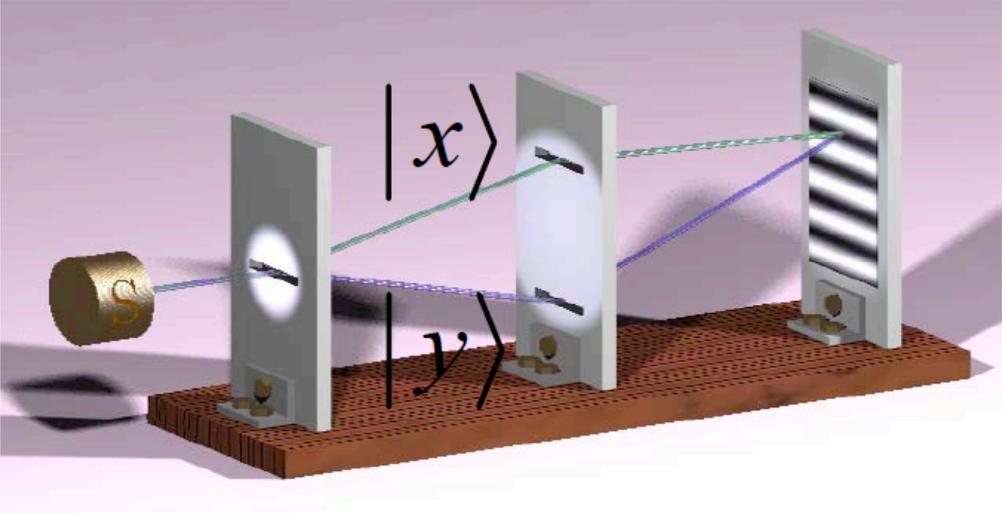


Académie 2011 3

Alors, juste pour nous remettre dans le bain et reprendre un peu ce qu'Édouard (Brézin) avait expliqué dans son séminaire introductif, on sait bien que la mécanique quantique admet des superpositions d'état. Si on imagine l'état $|x\rangle$ « particule en x » et l'état $|y\rangle$ « particule en y », un état $|x\rangle + |y\rangle$ (avec un facteur de normalisation $1/\sqrt{2}$) est tout aussi admissible comme état quantique et crée une particule qui est localisée à la fois en x et en y .

Superposition et interférences quantiques

- Interférences d'Young



- Modulations de la fonction d'onde sur l'écran:
 - Une manifestation directe du principe de superposition quantique

Académie 2011 4

Cette superposition se manifeste bien entendu essentiellement dans les phénomènes d'interférence, et en particulier dans le plus simple, l'expérience des franges d'Young. Ce n'est peut-être pas la peine que je la décrive ici en détail. S'il y a une modulation de la probabilité de présence sur l'écran, c'est précisément parce qu'à une étape intermédiaire la particule est à la fois dans les deux chemins, suspendue dans une superposition quantique d'une position et d'une autre position. Les interférences sont donc des manifestations directes du principe de superposition quantique. Comme le découvrent, à leur grand émerveillement, les élèves de première année de physique quantique, réaliser une expérience d'interférence toute simple dans un laboratoire d'optique, c'est mettre en évidence la superposition quantique.

Interférences avec des photons uniques

- Deux chemins pour aller de la source à la caméra

J.F. Roch,
ENS Cachan

TT = 2000 s

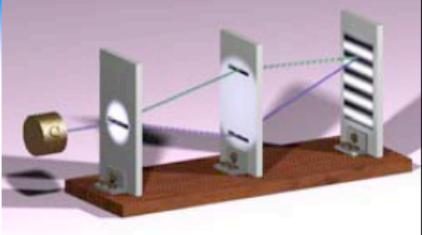
5

Je ne résiste pas à l'envie de vous montrer une jolie expérience d'interférence photon par photon, qui a été réalisée par mon camarade Jean-François Roch, à l'ENS Cachan. Il s'agit de l'expérience du biprisme de Fresnel. On divise un faisceau en deux et on fait se recouvrir ces deux parties ; On s'attend donc à avoir une interférence. Mais J.F. Roch le fait avec une source de photons uniques et il enregistre leurs impacts grâce à une caméra capable de les voir un par un. Après dix secondes de pose, on voit une répartition apparemment aléatoire d'impacts de photons. Après cent secondes, on commence à deviner des régularités. Après cinq cents secondes, on voit une modulation de la répartition des impacts. Après deux mille secondes, on voit nettement des franges.

Il y a un autre exemple d'interférences de particules uniques que j'aime bien montrer à mes élèves de première année. Il s'agit d'une expérience d'interférences d'électrons réalisée par Tonomura en 1989 avec un microscope électronique, et c'est l'exact équivalent de l'expérience de Roch d'un point de vue conceptuel. J'ai trouvé ce film sur le web. (Voir vidéo). On voit les électrons qui arrivent un par un avec des impacts répartis au hasard, puis on élargit un peu le champ de vision, on accélère, on accumule des événements, on accumule de plus en plus, et on commence à deviner une vague régularité, puis voilà, la régularité est là, les franges sont là. On a des interférences avec des électrons qui sont des particules de matière. On peut se dire que, quand même, Louis de Broglie n'avait peut-être pas tort..



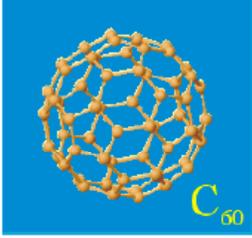
Dualité onde-corpuscule



- Photon onde ou particule ?
 - Des franges
 - Détecté à un endroit précis
 - À la fois une onde et une particule!

- Aussi observé avec des particules massives.
 - Un C₆₀ est à la fois onde et particule!

- Superposition d'états
 - La particule suit à la fois les deux chemins de l'interféromètre:
 - Suspendue entre deux réalités classiques différentes
 - « All the mystery of quantum physics » (R. Feynman)
 - » Pas tout à fait...



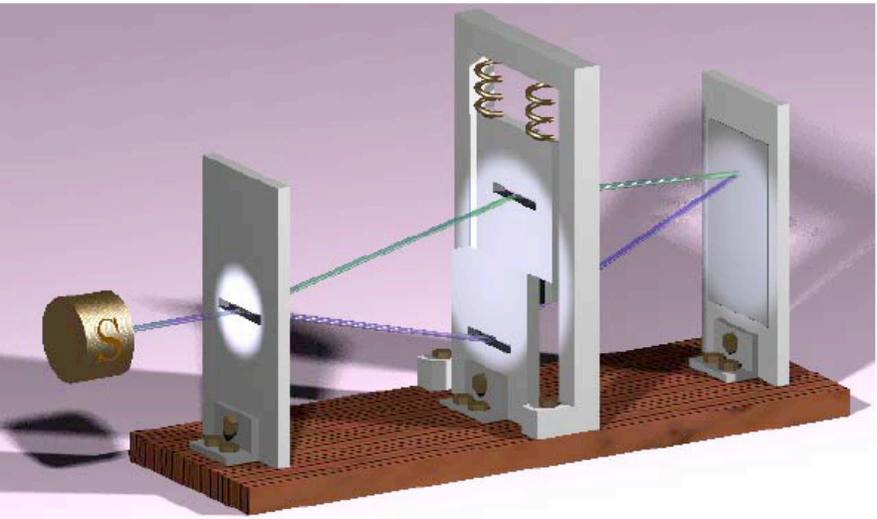
Académie 2011

7

Ces expériences ont été refaites avec des objets plus complexes que les électrons. On arrive à faire interférer un C₆₀, et même des molécules extrêmement complexes. Feynman disait que cette expérience révélait à elle seule tous les mystères de la mécanique quantique. On va voir que ce n'est pas tout à fait vrai.

Superposition et complémentarité

- Which path detection (Débat Einstein-Bohr au congrès Solvay de 1927)



- Fente microscopique mise en mouvement par la particule: information sur le chemin suivi et pas de franges
- Fente macroscopique insensible à la particule: pas d'information et des franges
- Onde et particule: deux aspects complémentaires de l'objet quantique

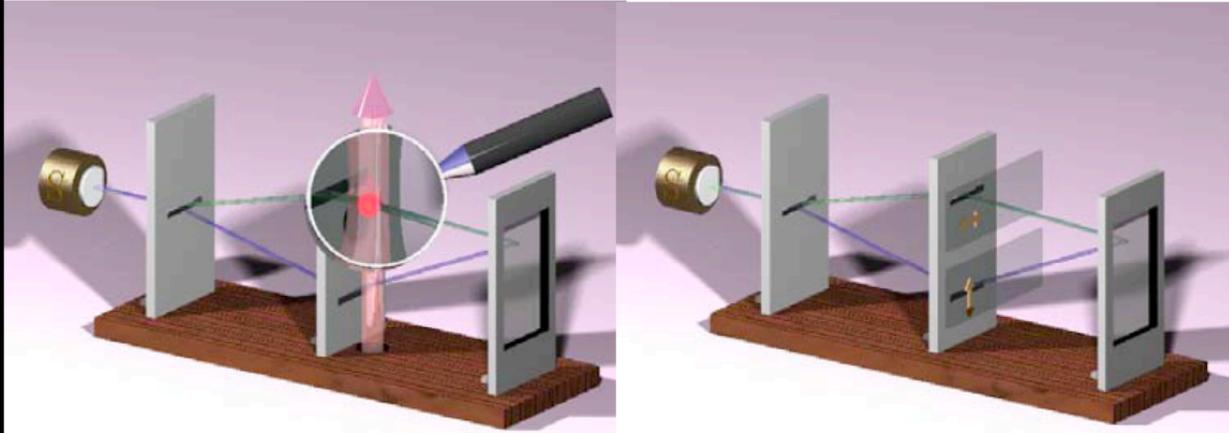
Académie 2011 8

Parlons maintenant de superposition et de complémentarité. Je reviens à une discussion qui a eu lieu, je crois, entre Einstein et Bohr au congrès Solvay de 1927, mais peut-être les historiens me corrigeront-ils. On voit le caractère ondulatoire de la particule dans les interférences. Est-ce qu'on peut lui donner aussi un caractère corpusculaire ? Est-ce qu'on peut demander à la particule par quel chemin elle est passée ? Oui, en principe, au moins. Je ne sais plus si c'est Einstein ou Bohr qui a suggéré ce dispositif intelligent où une des fentes est suspendue à des ressorts. Quand la particule passe par le chemin du bas c'est-à-dire par une fente qui ne peut se mouvoir, il ne se passe rien, mais quand elle passe par le chemin du haut, elle est déviée par la fente. Étant déviée par la fente, par conservation de l'impulsion, elle donne une impulsion à la fente, et donc tout l'équipage mobile correspondant doit se mettre en mouvement. Donc, *a priori*, en regardant l'interféromètre à la fin de l'expérience, on doit pouvoir savoir si la particule est passée par le bas, auquel cas l'équipage mobile est au repos, ou par le haut, auquel cas cet équipage mobile est en mouvement. Ce que montre Bohr, par un raisonnement d'incertitude de Heisenberg, est que, si la fente est assez légère pour être mise appréciablement en mouvement (et, donc, pour qu'on puisse dire par quel chemin est passée la particule), alors la position de la fente est tellement incertaine qu'on n'a pas de franges d'interférences sur l'écran. On a donc le choix entre deux extrêmes. Soit on sait par où est passée la particule, en prenant une fente très légère et en regardant si elle se met en mouvement ou non, mais on n'a alors pas d'évidence que la particule puisse se comporter comme un onde. Soit on renonce à savoir par où

elle est passée, ce qu'on fait dans les interféromètres ordinaires en ayant une fente macroscopique qui pèse des kilos, auquel cas on a effectivement un signal d'interférence montrant le caractère ondulatoire de la particule, mais alors on n'a pas le moindre indice d'un caractère corpusculaire .

Variantes du "which-path detector"

- Un observateur externe "regarde" passer la particule
- L'information sur le chemin est codée dans la particule elle-même



Dans tous les cas, si on connaît le chemin suivi, les interférences disparaissent

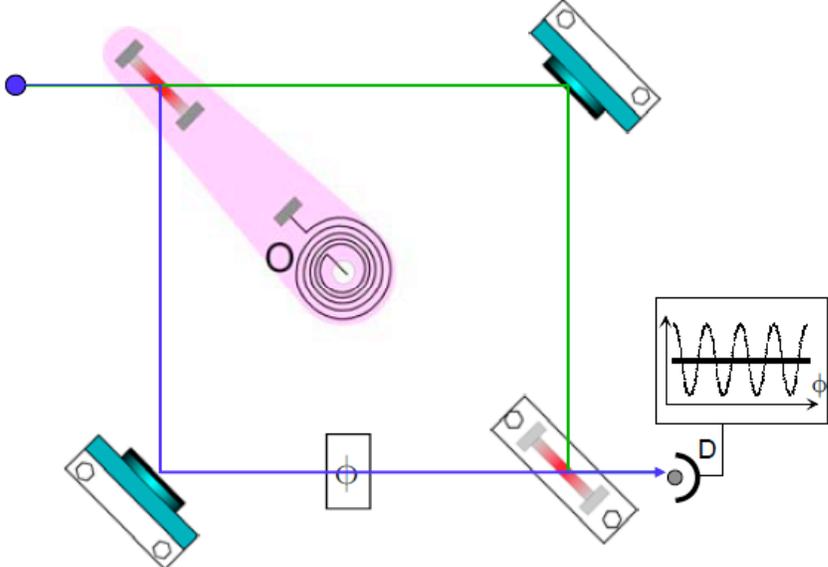
Dans une expérience donnée on ne peut révéler à la fois le caractère ondulatoire et corpusculaire.

Académie 2011 9

Il y a eu un grand nombre de variantes proposées pour cette expérience de complémentarité. On peut imaginer de coder l'information sur le chemin suivi, qu'on appelle « *which-path information* », soit sur l'interféromètre – la fente qui bouge – soit avec un observateur extérieur qui regarde passer la particule, par exemple en l'illuminant avec un faisceau laser et recueillant la lumière émise avec un détecteur, soit en codant cette information sur la particule elle-même : par exemple, si on met deux polariseurs croisés derrière les fentes, on n'aura plus d'interférence parce que la polarisation finale du photon nous dit par quel chemin il est passé. C'est une expérience de TP très standard : il n'y a pas d'interférence de Michelson quand on met des polariseurs croisés dans les deux bras, mais c'est aussi une expérience, *stricto sensu*, de complémentarité.

Un modèle simple pour une discussion quantitative

- Interféromètre de Mach-Zehnder avec une “fente” mobile



- Séparatrice massive: pas d'information which-path et franges
- Séparatrice microscopique: information which-path et pas de franges

Académie 2011 10

Pour discuter tout cela un peu quantitativement, je vais considérer non pas l'interféromètre de Young, parce que l'analyse détaillée en est relativement compliquée, mais un interféromètre de Mach-Zehnder. Vous connaissez sans doute le principe : il y a deux séparatrices et deux miroirs délimitant deux chemins (formant un rectangle). Sur le principe de Bohr et Einstein, nous imaginons que la première séparatrice est sur un équipage mobile. Si la particule passe par le chemin du haut, il ne se passe rien. Si la particule passe par le bas, elle fait reculer l'équipage mobile, qui se met en mouvement. Est-ce qu'on peut analyser en détail ce dispositif ?

Complémentarité et relations d'incertitude

Information sur le chemin suivi?

$P > \Delta p$
(Δp fluctuations quantiques de l'impulsion de la lame)

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

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

Mais il existe une interprétation plus générale de la complémentarité en termes d'intrication

Académie 2011 11

A la manière de Einstein-Bohr, on peut le faire en termes de relation d'incertitude de Heisenberg. Quelle est la condition pour qu'on sache quel est le chemin qu'a suivi la particule ? Il faut que l'impulsion que la particule donne à cet équipage mobile soit plus grande que les fluctuations quantiques de l'équipage mobile quand celui-ci est au repos. Je suppose évidemment que tout est idéal : que le tout est à température nulle et que l'équipage mobile suspendu à des ressorts est identifiable à un oscillateur harmonique. Donc il faut que l'impulsion P donnée par la particule (qui est à un facteur numérique sans importance près son impulsion totale) soit plus grande que les fluctuations Δp de l'impulsion de l'équipage mobile. Mais cela veut dire que l'incertitude Δx sur la position de cette séparatrice, qui, en raison des relations de Heisenberg, est plus grande que $h/\Delta p$, est forcément plus grande que h/P . Donc on voit qu'on n'a de l'information sur le chemin suivi qu'à condition que l'incertitude de position Δx de cette séparatrice soit plus grande que h/P , c'est-à-dire, plus grande que la longueur d'onde λ de la particule incidente. Et si l'incertitude de la position de la séparatrice est plus grande que la longueur d'onde λ , il ne peut pas y avoir de franges.

C'est très qualitatif. Bien sûr, on peut le rendre complètement quantitatif. Ceci étant, je trouve que c'est une interprétation un peu réductrice de l'expérience, qui admet une interprétation beaucoup plus profonde à mon sens en termes, cette fois, d'intrication. Nous allons voir que complémentarité et intrication sont forcément liées.



Intrication: une étrangeté encore plus étrange

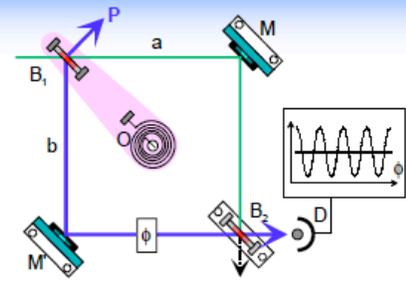
- Deux systèmes quantiques
 - Après interaction un seul état global
 - Pas d'état indépendant pour chaque système
 - « Paradoxe » Einstein Podolsky Rosen
 - L'état d'un système est déterminé à distance par la nature et le résultat d'une mesure sur l'autre
 - Contraire au postulat classique de localité
 - Bell 1964: des conséquences mesurables de la non-localité
 - Aspect 1982 (et bien d'autres depuis)
 - La mécanique quantique a raison, le bon sens a tort...



Académie 2011
12

L'intrication, vous savez ce que c'est : deux systèmes quantiques qui ont interagi sont, après interaction, dans un état global non séparable. Il n'est pas possible d'attribuer un état quantique propre, une fonction d'onde, à l'un et à l'autre des deux sous-systèmes. On peut tout au plus définir pour chacun d'eux une matrice densité réduite. C'est tout le paradoxe Einstein-Podolsky-Rosen. Édouard Brézin nous en avait fait un exposé très clair, je ne reviendrai pas là-dessus, ni sur le fait qu'Aspect a montré dans ses justement célèbres expériences que la mécanique quantique a raison et que le bon sens a tort ; c'est fâcheux mais c'est comme ça.

Complémentarité et Intrication



- Une analyse détaillée
 - Etat initial séparatrice $|0\rangle$
 - Etat final chemin b $|\alpha\rangle$
 - État cohérent (oscillation classique+bruit quantique)
 - Etat particule/séparatrice $|\Psi\rangle = |\Psi_a\rangle|0\rangle + |\Psi_b\rangle|\alpha\rangle$
 - Intrication particule/séparatrice
 - (paire EPR si états orthogonaux)
 - Signal de franges $\langle \Psi_a | \Psi_b \rangle \langle 0 | \alpha \rangle$
 - Petite masse, grand déplacement $\langle 0 | \alpha \rangle = 0$
PAS DE FRANGES
 - Grande masse, petit déplacement $\langle 0 | \alpha \rangle = 1$
FRANGES

Académie 2011 13

Où est l'intrication dans notre expérience ? Décrivons la chose de manière un peu technique. L'état initial de la séparatrice, idéalement identifiée à un oscillateur harmonique, est le repos $|0\rangle$, c'est-à-dire le vide. L'état final, si la particule passe par le chemin a , c'est aussi le vide, il ne s'est rien passé. Si la particule passe par le chemin b , la séparatrice a un petit mouvement d'oscillation, qui se décrit par ce qu'on appelle un « état cohérent de l'oscillateur harmonique ». Cet état est complètement décrit par une amplitude classique ; nous y reviendrons tout à l'heure en détail. Cet état, je l'ai noté $|\alpha\rangle$. Ça veut dire que quelque part, là, au milieu de l'interféromètre, je ne peux plus parler de l'état de la particule toute seule, il faut que je parle de l'état $|\Psi\rangle$ de la particule ET de la séparatrice. Cet état global est une superposition quantique de l'état 'la particule est dans le chemin a et la séparatrice est au repos' et de l'état 'la particule est dans le chemin b et la séparatrice est en mouvement'. Il a toutes les caractéristiques d'un état intriqué. La particule et la séparatrice ont interagi, et elles sont dans un état intriqué, somme de deux états, ou de deux fonctions d'onde, différentes.

Maintenant, à partir de là, il est relativement facile de calculer le signal de franges. Finalement, ce signal de franges est (en gros) la somme des modules au carré des deux fonctions d'onde décrivant les états que je viens de citer, plus un terme qui est le produit scalaire de ces deux fonctions d'onde et qui contient tout le signal d'interférences. Si les états $|0\rangle$ et $|\alpha\rangle$ sont très différents l'un de l'autre, on peut bien distinguer les deux chemins suivis par la particule. En revanche, leur recouvrement (ou leur produit scalaire) est alors nul et on n'a plus de franges du

tout. En revanche, si ces deux états sont très peu distinguables, on a un tout petit déplacement devant les fluctuations quantiques dans l'état $|0\rangle$. Le produit scalaire $\langle 0|\alpha\rangle$ est pratiquement égal à 1 et on a un signal de franges tout à fait normal. Donc s'il y a disparition des franges c'est parce que la particule s'est fortement intriquée avec l'état de mouvement de la séparatrice.



Complémentarité et intrication

- Les interférences quantiques sont détruites si la particule s'intrique avec un système externe ayant une information non ambiguë sur le trajet suivi
 - Un autre degré de liberté de la particule elle-même (polarisation)
 - La séparatrice (à la Bohr)
 - Un détecteur de chemin externe
 - Ou un environnement thermodynamique
 - Deux états orthogonaux de l'environnement pour les deux chemins: pas de franges
 - Pour les photons qui s'intriquent mal: surtout des franges
 - Pour des particules matérielles, intrication avec l'environnement aisé: interférences fragiles
 - Et d'autant plus fragiles que la particule interférante est « grosse »
 - » Peu d'interférences avec des boules de billard
 - » Peu de superpositions quantiques à l'échelle macroscopique

Académie 2011 14

En fait, il s'agit là d'un phénomène très général. Les interférences sont détruites dès que la particule s'intrique avec n'importe quoi, c'est-à-dire si il y a deux états de ce n'importe quoi qui sont différents suivant que la particule a suivi un chemin ou l'autre. Cela peut être la séparatrice de l'interféromètre, comme on vient de le discuter, cela peut être un détecteur de chemin externe – on a, quelque part, un détecteur qui s'allume quand la particule passe dans le chemin b et qui ne s'allume pas quand elle passe dans le chemin a –, cela peut être un autre degré de liberté de la particule elle-même. Si on prend un photon, il a un degré de liberté qui est sa « position » (avec quelques guillemets !) et il en a un autre, qui est sa polarisation. Si on change la polarisation dans les deux chemins, il y a intrication entre position et polarisation.

Mais cela peut aussi être un environnement thermodynamique. Si la particule qui interfère modifie l'environnement thermodynamique, auquel elle est forcément couplée, de telle manière qu'il y ait deux états orthogonaux de l'environnement pour les deux chemins suivis, dans ce cas-là, il n'y aura pas de franges. Autrement dit, si la particule laisse quelque part, n'importe où, une

information, même non lue – ce n'est pas la peine que quelqu'un regarde, ce n'est la peine de faire intervenir une conscience... – sur la position de la particule, que ce soit dans la particule, dans l'interféromètre, dans un détecteur explicite ou dans un environnement thermodynamique, alors on n'aura pas de franges, on n'aura plus de phénomène d'interférence.

Les photons sont à peu près insensibles à ce qu'ils traversent et donc ils s'intriquent très mal avec l'environnement, ce qui explique qu'on puisse faire des interféromètres, comme ceux de LIGO ou de VIRGO, avec des différences de marche kilométriques. En revanche, si on prend des particules matérielles, elles interagissent très fortement avec l'environnement. La moindre collision d'un atome dans un interféromètre atomique avec une molécule de gaz résiduel change l'état de cette molécule de gaz résiduel de manière appréciable, change au moins son état de vibration ou de rotation, et cela suffit pour que l'environnement sache par quel chemin est passé l'atome. Il est donc extrêmement difficile de faire des interférences avec des particules matérielles. C'est d'autant plus difficile qu'elles sont plus grosses. Si on peut encore le faire avec un atome de C_{60} , ce serait très dur de faire interférer des boules de billard, parce qu'il est extrêmement difficile de faire en sorte que, dans tout son chemin, la boule n'entre pas en collision avec au moins une autre particule de gaz résiduel. Même dans l'espace interstellaire le plus vide qu'on puisse imaginer on n'y arriverait pas. Quand bien même on y arriverait, il resterait encore des choses subtiles comme le fond d'ondes de gravitation, qui interagit suffisamment avec la boule pour savoir par quel chemin elle est passée.

Cela nous donne donc l'idée que plus les objets sont complexes plus ils vont s'intriquer avec l'environnement et moins il y aura de superposition quantique, ce qui nous amène déjà au problème de savoir pourquoi il n'y a pas de superposition quantique à notre échelle et nous donne une idée qualitative de ce que pourrait être sa solution.



Superpositions, jusqu'où ?

- Le « chat de Schrödinger »

- Pas de superpositions quantiques à notre échelle.

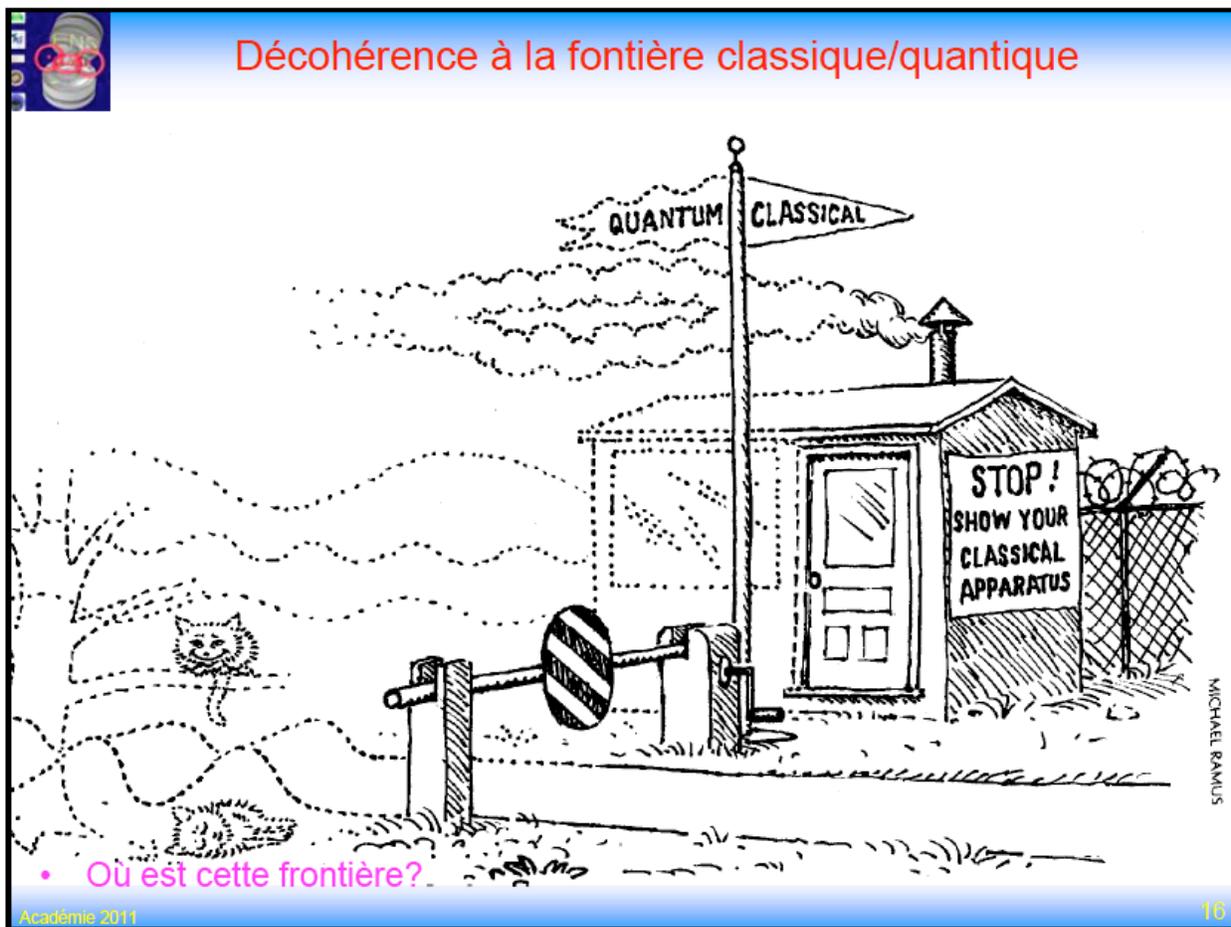


- Nous n'observons qu'une infime partie des états quantiques possibles. Pourquoi ?

Académie 2011
15

Cela nous amène au problème de la mesure tel que présenté dans le célèbre article de Schrödinger daté de 1935 et illustré par lui au moyen de son fameux chat. On doit bien sûr définir la mesure sur un sous-système de l'univers complet (le chat dans l'article de Schrödinger). Comme vous l'avez deviné via l'une de mes interventions de la séance précédente, je suis un philosophe du *for all practical purposes*, et j'aime bien ne pas me poser trop de problèmes conceptuels et pouvoir me dire « pour tout propos pratique, je peux définir un sous-système ».

Si ce sous-système un peu compliqué il a un espace de Hilbert colossal, gigantesque. Pour une mole de spin, la dimension de l'espace de Hilbert est 2 à la puissance $6 \cdot 10^{23}$. Bref l'espace de Hilbert est gigantesque. Mais finalement, je n'observe jamais, dans un objet macroscopique, que quelques états dans cette foison. Je n'observe qu'un tout petit secteur de l'espace de Hilbert. Pourquoi ? Il s'agit d'un problème important, intimement lié à l'étrangeté du monde quantique telle qu'illustrée, dans le papier de Zurek dans *Physics today* en 1991, par ce très beau dessin de Ramus que vous connaissez certainement, avec le monde classique, bien classique, bien net, séparé par un barbelé du monde quantique, tout flou, avec le chat à moitié mort, à moitié vivant. Et je pense que la décohérence nous aide à un peu mieux comprendre tout ça.



La décohérence, c'est donc important pour comprendre pourquoi on ne voit qu'une toute petite partie des états possibles, pourquoi je suis là et pas en même temps dans mon bureau, pourquoi les choses sont blanches ou noires, et pas blanches et noires à la fois. C'est aussi important, bien entendu, pour la mesure.

Superposition, mesure et décohérence

- Un problème essentiel dans la mesure quantique
 - La linéarité prédit des appareils de mesure dans des superpositions
 - En haut ET en bas

$$|\uparrow\rangle|\uparrow\rangle \rightarrow |\uparrow\rangle|\nearrow\rangle$$

$$|\downarrow\rangle|\uparrow\rangle \rightarrow |\downarrow\rangle|\swarrow\rangle$$

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

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\nearrow\rangle + |\downarrow\rangle|\swarrow\rangle)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle|\text{chat}\rangle + |\downarrow\rangle|\text{chat}\rangle)$$

- Alors que les postulats prescrivent un mélange (haut OU bas)
- L'infortuné chat de Schrödinger est une métaphore de mesure

Académie 2011 17

Prenons un appareil de mesure tout bête, qui mesure la composante selon Oz d'un spin $1/2$ – ce système est le paragon des systèmes quantiques. Il n'y a que deux résultats possibles, $+1/2$ ou $-1/2$. Posons que l'aiguille va vers le haut si le système est dans l'état $|+\rangle$ (dans l'état propre de l'observable 'composante selon Oz du spin' correspondant à la valeur propre $+1/2$) et vers le bas si le système est dans l'état $|-\rangle$ (correspondant à la valeur propre $-1/2$).

Jean-Pierre Gazeau. C'est une question portant sur la frontière classique-quantique. On apprend habituellement qu'un système physique est considéré comme quantique lorsqu'une grandeur comme l'action qui le caractérise est du même ordre que la constante de Planck. Où se situent ici les grandeurs caractéristiques du système qui permettent de le déclarer « quantique » ?

Jean-Michel Raimond. Je pense que c'est extrêmement difficile. On s'en aperçoit, et il y a eu des débats récents, par exemple à propos des circuits supraconducteurs, qui sont des systèmes quantiques macroscopiques. Il n'est pas évident de déterminer quel est le paramètre quantique macroscopique qui décrit bien la macroscopicité du système. Je pense que l'un des mérites de la décohérence est précisément de nous donner une indication sur les paramètres macroscopiques du système. Dans la décohérence, on le verra, il y a deux constantes de temps très séparées, et c'est la séparation de ces constantes de temps qui donne la taille du système. On pourra y revenir à la fin si tu veux. Le problème est très subtil. Ce n'est pas parce qu'on a beaucoup de particules dans un système qu'il est nécessairement macroscopique. Un circuit supraconducteur, dans lequel passe un

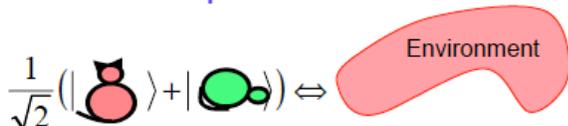
quantum de flux, est un système quantique. On peut exciter de la cohérence entre ses deux états, et cela correspond à quelques milliers ou quelques dizaines de milliers de paires qui circulent dans le circuit dans un sens et dans l'autre à la fois. Mais ce n'est pas parce qu'il y a des dizaines de milliers de paires que c'est pour autant macroscopique. Ce n'est pas parce que quelque chose est gros que c'est macroscopique.

Jean-Michel Raimond. Revenons à la mesure. Si, maintenant, on mesure un spin qui se trouve dans une superposition de l'état $|+\rangle$ et de l'état $|-\rangle$ et si l'évolution, celle donnée par l'équation de Schrödinger, est unitaire, la théorie nous dit que nous obtiendrons à la fin un état intriqué du système mesuré et de l'appareil de mesure, un état qui sera une superposition quantique de deux états macroscopiques. Et cela est très choquant ; ce n'est pas du tout ce que donne l'expérience, qui nous montre que c'est ou l'un ou l'autre, avec des probabilités. Donc il y a quelque chose de plus que l'évolution unitaire prévue par la théorie. Et le malheureux chat de Schrödinger n'est finalement qu'un paradigme d'appareil de mesure. Il mesure macroscopiquement si l'atome est désintégré ou pas. Paradigme ou métaphore, si vous préférez.



Décohérence et superpositions quantiques

- Un système quantique est nécessairement couplé à un environnement complexe
 - Gaz ambiant
 - Rayonnement résiduel
 - Et même le fond d'ondes de gravitation

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|\text{chat}\rangle + |\text{pas chat}\rangle) \Leftrightarrow$$


- Pour des systèmes microscopiques, dans des conditions bien contrôlées
 - Couplage à l'environnement négligeable « pour tout propos pratique ».
 - Particulièrement vrai pour les photons
 - Interféromètres kilométriques
- Pour un système mésoscopique ou pire macroscopique
 - Le couplage à l'environnement ne peut jamais être négligé
 - Evidemment le cas de tout appareil de mesure, surtout si c'est un chat

Académie 2011
18

La décohérence consiste simplement à reconnaître qu'un système quantique est forcément couplé à un environnement complexe, et qu'il l'est d'autant plus qu'il est lui-même complexe.

On ne peut pas isoler un système quantique. Pour tout propos pratique, on peut l'isoler dans une certaine mesure, mais il reste toujours un couplage résiduel, un environnement thermodynamique (dont on évitera, pour tout propos pratique, de considérer que c'est l'univers tout entier). Il y a toujours un environnement thermodynamique, que ce soit le gaz, le rayonnement résiduel, le fond d'ondes de gravitation, etc. Et c'est le couplage, et donc l'intrication avec cet environnement, qui va détruire la superposition quantique. Zurek et d'autres ont popularisé cette approche récemment.

Cependant, si on a affaire à un système microscopique, un atome, un photon, et si on travaille beaucoup pendant des dizaines d'années, on arrive, pour tout propos pratique, à rendre le couplage à l'environnement négligeable pendant la durée d'une expérience. Donc on peut faire des interférences, donc on peut faire toutes les jolies expériences d'information quantique que nous connaissons. Si le système est mésoscopique ou, encore pire, macroscopique, il est extrêmement difficile de réaliser cette sorte d'« adiabaticité » (avec beaucoup de guillemets : adiabaticité n'est pas vraiment le mot correct), du système quantique, et il va falloir tenir compte de ce couplage à l'environnement. Evidemment, tel est le cas de tout appareil de mesure.



Modèles de décohérence

- Pas de théorie générale
- Des cas simples où on peut, dans le cadre de la mécanique quantique standard, traiter explicitement le couplage à l'environnement comme une perturbation à l'évolution du système
 - Particule massive et mouvement brownien (couplage au gaz ambiant)
 - Oscillateur harmonique couplé à un bain
 - Amortissement d'un mode du champ électromagnétique
- Description de l'état du système en termes d'opérateur densité
 - Généralisation de la notion d'état quantique
 - Modèle pour l'évolution de cet opérateur fondés sur des critères très généraux (e.g. Markov). Equations de Lindblad
 - Très bien vérifiés dans un grand nombre de situations expérimentales
 - Un certain nombre de caractéristiques générales pour toutes les prédictions de ces modèles

Académie 2011 19

La décohérence revient donc essentiellement à tenir compte du couplage à l'environnement... Je ne pense pas qu'il existe à ce jour une théorie générale de la décohérence,

qui dit que, dans tous les cas, on peut décrire proprement le couplage d'un système sans faire aucune hypothèse ni sur le système ni sur l'environnement. Mais il y a quand même des modèles extrêmement généraux et génériques, dans lesquels on peut traiter, plus ou moins explicitement, l'évolution. On le peut, en général, au prix d'approximations qui sont extrêmement bien contrôlées. Tel est par exemple le cas de la particule massive qui subit un mouvement brownien. Il y a des équations qui traitent très bien ce processus. C'est aussi le cas, qui nous occupera plutôt aujourd'hui, de l'oscillateur harmonique, système quantique simple, couplé à un bain de n'importe quelle nature. Si l'on décrit l'état du sous-système – l'oscillateur harmonique considéré tout seul – en termes d'opérateur densité, on peut écrire des équations d'évolution pour cet opérateur, les équations de Lindblad, qui sont fondées sur des approximations très raisonnables sur l'environnement. L'environnement est compliqué – dans un environnement, il y a des fréquences résonnantes qui sont dans tout le spectre ou pratiquement tout le spectre – et l'environnement est grand, c'est-à-dire qu'il n'est pas, ou pratiquement pas, modifié par les interactions avec le système. On peut donc écrire ces équations, qui ont des conséquences expérimentales qu'on peut vérifier. À la limite, quand on fait un circuit RLC et qu'on regarde l'amortissement de ce circuit dans le régime oscillant, on vérifie l'équation de Lindblad pour un oscillateur amorti, et on la vérifie très bien.



Etats pointeurs

- Des états stables ou presque stables en présence du couplage à l'environnement
 - Ex: états position pour le mouvement brownien
 - À la diffusion résiduelle près
 - Vide ou état fondamental pour un oscillateur harmonique
 - à température nulle
 - Etats cohérents de l'oscillateur harmonique
 - Meilleure représentation possible d'une oscillation classique
 - États minimaux du point de vue des relations de Heisenberg
 - Un état cohérent reste cohérent et son énergie s'amortit exponentiellement comme l'énergie classique
 - Ces états sont pratiquement insensibles à la décohérence
 - Le couplage à l'environnement n'interdit pas tous les états quantiques

Académie 2011 20

Tous ces modèles ont un certain nombre de caractéristiques générales. La première, est qu'il existe des "états pointeurs". Sans entrer dans les détails, les états pointeurs sont des états qui sont stables ou quasi stables en présence de l'environnement, des états qui, pratiquement, n'évoluent pas même si le système est couplé à l'environnement. En quelque sorte (avec des guillemets !) ce sont des « états propres » de l'opérateur qui couple le système à l'environnement. Par exemple, dans le cas du mouvement brownien les états positions sont des états quasi stables parce que, en gros, tout ce que fait une particule qui a une position donnée, est d'avoir un petit mouvement – brownien justement – qui diffuse en \sqrt{t} .

Si on prend un oscillateur harmonique à température nulle, le vide est un état pointeur, strictement un état stable. Si l'oscillateur est dans l'état vide, il reste dans l'état vide. Le vide, je l'ai dit, est l'état fondamental de l'oscillateur harmonique. Les états cohérents de l'oscillateur harmonique, qui sont des états classiques, décrivent aussi bien qu'on peut en physique quantique, compte tenu de Heisenberg, l'oscillation dans un puits de potentiel. Ils sont des états quasi pointeurs, quasi stables, c'est-à-dire qu'ils restent cohérents, qu'ils restent de même nature ; simplement, leur amplitude s'amortit lentement. Tous ces états-là sont pratiquement insensibles à la décohérence. Ils évoluent très lentement, ou pas du tout, en présence du couplage à l'environnement, et ils forment techniquement une base de l'espace de Hilbert du système.



Superpositions quantiques mésoscopiques

- Superpositions d'états pointeurs
 - Rapidement transformées en un mélange statistique
 - Un état ET l'autre devient un état OU l'autre
 - L'incertitude sur l'état est de nature classique
 - Temps de décohérence
 - Court à l'échelle du temps de dissipation classique (e.g. de l'énergie) associé au système
 - D'autant plus court que les états superposés sont différents.
 - Caractéristique essentielle de la relaxation d'un système mésoscopique:
 - Deux échelles de temps très séparées
 - Une très lente (durée de vie de l'énergie)
 - Une très rapide (temps de décohérence)

Académie 2011 21

En revanche, si on forme une superposition d'états pointeurs, on montre, dans tous ces modèles, qu'elle est très rapidement transformée en un mélange statistique des états pointeurs. Si je fais « pointeur a + pointeur b » et branche le réservoir, très rapidement je me retrouve dans un état de mélange statistique « 50 % de pointeur a et 50 % de pointeur b ». Un mélange statistique décrit simplement quelque chose où, pour tout propos pratique, tout se passe comme si le système était préparé une fois sur deux dans l'état pointeur a et une fois sur deux dans l'état pointeur b . Cette évolution de la superposition vers le mélange, bien entendu, prend un certain temps, très bref, appelé, assez logiquement, temps de décohérence.

Ce temps de décohérence a deux caractéristiques essentielles : il est d'autant plus court qu'on superpose des états pointeurs qui sont plus différents. Plus les états pointeurs sont éloignés dans une métrique qui est à définir, plus le temps de décohérence est court, et ce temps de décohérence est, pour des états macroscopiquement différents, infiniment court par rapport à l'échelle de temps de dissipation ordinaire du système. Si on prend un oscillateur harmonique amorti, par exemple, le temps de décohérence d'une superposition macroscopique est infiniment court à l'échelle du temps d'amortissement. La caractéristique essentielle de la relaxation d'un système mésoscopique est de posséder ces deux échelles de temps. On a le temps d'amortissement de l'énergie, que je vais appeler « échelle de temps lent », et on a le temps de décohérence, qui est le temps de vie des superpositions quantiques d'états pointeurs, qui, lui, est une échelle de temps rapide.

Il faut dire, bien entendu, que tout cela ne constitue pas une addition à la mécanique quantique. Tout ce que je fais est d'appliquer la théorie de la relaxation standard de la mécanique quantique, qui est connue depuis les années 1940-1950 ; il y a des tas de travaux qui datent de cette époque-là, Lindblad et d'autres. J'applique vraiment la théorie standard de la relaxation quantique à un système couplé à un bain sur lequel je fais un certain nombre d'hypothèses.



Un exemple simple

- **Mouvement brownien (Leggett)**
 - Particule de masse m dans un gaz thermique
 - Un bon modèle pour la position de l'aiguille d'un appareil
 - **Temps long:** temps d'amortissement de la vitesse par friction

$$T_r = \frac{1}{\gamma}$$
 - **Temps rapide:** décohérence d'une superposition de deux paquets d'onde séparés spatialement de a

$$T_d = T_r \left(\frac{\lambda_T}{2a} \right)^2$$

λ_T : longueur d'onde de de Broglie thermique

$$\lambda_T = \frac{\hbar}{\sqrt{mkT}}$$

4 10^{-11} m pour un atome de Rubidium a 300K
 - Très court pour de petites séparations
 - **Extraordinairement court pour des séparations macroscopiques**
 - (si court que le modèle n'a plus de sens)

Académie 2011 22

Un exemple simple, proposé par Leggett, est, encore une fois, le mouvement brownien. Je prends une particule de masse m qui est dans un gaz qu'on met en équilibre à la température T . C'est un bon modèle pour la position de l'aiguille d'un appareil : l'aiguille la plus simple, c'est une particule ponctuelle de masse m .

Alors, quel est le temps long ? C'est le temps d'amortissement de la vitesse par friction. Il dépend évidemment de la pression et de la température du gaz, bref, c'est $1/\gamma$ et il est calculable.

Quel est le temps rapide ? Je considère une superposition de deux paquets d'ondes qui sont séparés spatialement d'une quantité a , typique de ce que j'ai dans un interféromètre et dans un appareil de mesure. Le temps de décohérence est alors le temps de relaxation ordinaire multiplié par le carré du rapport de la longueur d'onde de de Broglie thermique de la particule au double de la séparation a . Plus a est grand, plus ce temps est court, et ce paramètre $\lambda_T/2a$ a une tendance marquée à être très petit, parce que λ_T est très petit. Si vous prenez un atome de rubidium comme particule ponctuelle (ce n'est pas une masse ponctuelle très lourde, une masse de 85 unités atomiques) à 300 degrés Kelvin, la longueur d'onde de de Broglie thermique est 4.10^{-11} m. Si vous prenez un kilo à la température ambiante, c'est une longueur d'onde ridiculement petite, en gros 10^{-38} m. Cela veut dire que, pour un atome unique de rubidium, le temps de décohérence devient plus court que le temps de relaxation dès que la séparation des deux paquets d'ondes est plus grande que 4.10^{-11} m! C'est court pour des petites séparations, extraordinairement court pour des séparations macroscopiques. Il faut faire très attention ici aux

ordres de grandeur. Si je prends un kilo à un mètre, je vais trouver des temps de décohérence de 10^{-50} seconde, qui n'ont tout simplement pas de sens, parce que cela n'a pas de sens de parler de mouvement brownien à une échelle de temps aussi petite. On sort des hypothèses qui permettent d'utiliser les équations dont je parlais.



Darwinisme quantique: un toy model

- Un spin, un environnement
 - **Système:** qubit, spin ou atome à deux niveaux $|0\rangle, |1\rangle$
 - **Environnement:** un grand ensemble de systèmes identiques initialement dans l'état $|0\rangle$
 - **Interaction:**

$$|0\rangle|0, 0, \dots, 0\rangle \rightarrow |0\rangle|0, 0, \dots, 0\rangle$$

$$|1\rangle|0, 0, \dots, 0\rangle \rightarrow |1\rangle|1, 1, \dots, 1\rangle$$
 - **Etats pointeurs** $|0\rangle, |1\rangle$
 - Manifestement préservés par le couplage
 - **Des états qui disséminent leur copie dans l'environnement**
 - **Tous les observateurs de l'environnement d'accord sur l'état du système. Etats « objectivés »**
 - Darwinisme quantique: les états les plus aptes à la survie !

Académie 2011 23

A quoi ressemblent ces états pointeurs ? Il y a un joli terme qui a été introduit par Zurek : le « darwinisme quantique ». Qu'est-ce qui fait émerger les états pointeurs ? Imaginons un système tout simple : un qubit, un spin ou un atome à deux niveaux, deux états, $|0\rangle$ et $|1\rangle$. L'environnement, c'est un grand nombre de systèmes qui sont tous identiques et qui sont tous initialement dans l'état $|0\rangle$. J'imagine que, pendant le temps qui m'intéresse, l'interaction est très simple : si mon système est dans l'état $|0\rangle$, tous les systèmes de l'environnement restent dans l'état $|0\rangle$; si mon système est dans l'état $|1\rangle$, tous les systèmes de l'environnement basculent dans l'état $|1\rangle$ – j'ai choisi un *toy model*. Quels sont alors les états pointeurs ? Il est évident que ce sont $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Ils restent stables, en tout cas vis-à-vis de l'environnement avec lequel ils ont cette interaction. Quelle est leur caractéristique ? Elle est que $|0\rangle$ et $|1\rangle$ disséminent leur copie dans l'environnement. Ils sont en quelque sorte, objectivés par ces multiples copies dans l'environnement ; tous les observateurs qui peuvent mesurer les systèmes de l'environnement,

quoi qu'ils fassent, seront d'accord sur ce qu'est l'état du système, ou $|0\rangle$ ou $|1\rangle$. Le premier observateur qui mesure obtient un certain résultat, et tous les autres seront d'accord pour trouver la même chose, un état objectif, $|0\rangle$ ou $|1\rangle$.



Décohérence

- Superposition initiale

$$(|0\rangle + |1\rangle)|0, 0, \dots, 0\rangle \rightarrow |0\rangle|0, 0, \dots, 0\rangle + |1\rangle|1, 1, \dots, 1\rangle$$

- Information maximale dans l'environnement sur l'état du système.
- Etat réduit du système: 0 ou 1 avec des probabilités égales
- **Essentiellement, la décohérence est une mesure de l'état du système par l'environnement dans la base des états pointeur.**
 - Tous les 'observateurs' de l'environnement partagent la même information sur le système
 - Mais cette mesure reste 'non lue'. Donc l'état du système, bien que réduit, reste inconnu.

Académie 2011 24



Décohérence et mesure quantique

- Deux apports essentiels
 - L'incertitude sur le résultat de la mesure est une alternative probabiliste classique
 - De même nature que celle de la physique statistique classique
 - Dieu joue aux dés, mais avec des dés classiques.
 - La décohérence définit la quantité mesurée
 - L'appareil est finalement dans un mélange probabiliste des états pointeur
 - Sans décohérence, l'appareil serait dans une superposition d'états, exprimant une mesure dans une base arbitraire
 - On mesure les états du système corrélés aux états pointeurs du réservoir
 - Le couplage système-appareil de mesure ET la dynamique de la décohérence définissent ensemble la quantité mesurée.



Décohérence et mesure quantique

- Mais ne résout pas tous les problèmes conceptuels de la mesure quantique
 - Ne dit rien sur le pourquoi et le comment de l'émergence d'un unique résultat pour une mesure complète
 - Ne se substitue pas aux postulats standard. La théorie de la décohérence repose sur les notions de trace partielle et d'état réduit qui reposent sur la description standard des systèmes quantiques

Académie 2011 26

Cela dit, demandons-nous d'abord ce que, dans l'ordre des idées générales, on peut dire sur le lien entre décohérence et mesure ? Il ne faut pas lui en faire dire trop et il ne faut pas lui en faire dire trop peu. Je crois qu'il y a deux choses, essentiellement, dans ce que dit la décohérence sur la mesure.

La première chose, c'est que, finalement, l'incertitude sur le résultat de la mesure est une simple alternative probabiliste classique. Si vous mesurez un système dans une superposition à poids égaux de $|0\rangle$ et $|1\rangle$, le résultat est $|0\rangle$ dans 50 % des cas et $|1\rangle$ dans 50 % des cas. Donc Dieu joue aux dés, c'est vrai, mais ce sont des dés classiques. Cette incertitude, je dirai – mais là, je sors peut-être de mon domaine de compétence – me paraît être exactement de même nature que celle de la physique statistique. Après tout, elle décrit aussi des systèmes qui sont dans des superpositions probabilistes : on ne sait pas quel est l'état microscopique d'un système macroscopique mais il existe et on n'en connaît que les probabilités.

Quelque chose de plus subtil est, à mon sens, que c'est la décohérence qui définit la quantité mesurée. En effet, l'appareil de mesure, à la fin de son temps de décohérence, est dans un mélange statistique des états pointeurs et les états que je mesure (les états propres de ma mesure) sont donc les états du système qui sont intriqués avec les états pointeurs.

Imaginons qu'on puisse séparer la phase d'évolution hamiltonienne du système et de l'appareil de mesure (laquelle phase met cet appareil de mesure dans une superposition d'états) et

la phase de décohérence. Et imaginons la mesure que nous avons déjà discutée d'un spin. Supposons que les deux possibilités soient « spin up, aiguille vers le haut » et « spin down, aiguille vers le bas » – ou, en abrégé, « spin up, haut » et « spin down, bas ». Si je considère l'état intriqué « spin up, haut » + « spin down, bas », je peux aussi l'écrire $1/2[(\text{« spin up + spin down »}) (\text{« haut + bas »}) + (\text{« spin up – spin down »}) (\text{« haut – bas »})]$. Alors est-ce que je suis en train de mesurer que le spin est en haut ou en bas ou est-ce que je suis en train de mesurer le spin dans une base {« spin up + spin down », « spin up – spin down »} ? Ce qui me le dit, c'est que les états (« aiguille vers le haut + aiguille vers le bas ») et (« aiguille vers le haut – aiguille vers le bas ») ne sont pas des états pointeurs, donc ce ne sont pas les états associés à ceux là que je mesure. Ce que je mesure, c'est « aiguille vers le haut » ou « aiguille vers le bas », qui sont corrélés à « spin up » et « spin down » respectivement. Donc, en définitive, dans un appareil de mesure, ce qui définit ce que je mesure sur le système, c'est, d'une part, le hamiltonien d'interaction entre le système et l'appareil de mesure lui-même, évidemment, mais c'est aussi la base des états pointeurs de l'appareil de mesure.

Bernard d'Espagnat. Je suis, bien sûr, pleinement d'accord avec vous en ce qui concerne votre second point mais je suis un peu perplexe concernant le premier. Quand vous dites que la probabilité, là, est de même nature que celle de la physique classique, que Dieu joue aux dés, mais avec des dés classiques, est-ce que ces dés sont vraiment classiques ? Non. Ils sont classiques à nos yeux, ils nous apparaissent comme classiques, mais il me semble qu'il y a ici une différence à introduire entre « nous apparaissent » et « sont vraiment ». À moins que vous ne rameniez – et d'après ce que vous dites il se pourrait que ce soit un peu ça – la notion de ce qui est vraiment à, simplement, ce qui nous apparaît à nous tous, en toute espèce de circonstance. Est-ce qu'il n'y a pas quelque chose comme ça ?

Jean-Michel Raimond. J'ai, comme vous l'avez sans doute deviné, une philosophie assez pragmatique et *for all practical purposes*.

Bernard d'Espagnat. Oui, c'est ça.

Jean-Michel Raimond. ...et ne me posant pas de problèmes philosophiques, parce que je suis totalement incapable de les poser avec compétence, j'ai tendance à identifier les deux points de vue, c'est-à-dire que, de mon point de vue, du point de vue de l'expérience que je fais dans l'état actuel de nos connaissances (tout cela devant un jour être remis en cause, je l'espère, sans quoi la physique est finie et j'en serais bien triste), pour tout propos pratique, au jour d'aujourd'hui, j'ai tendance à identifier ce qui me sert à décrire tout ce que je peux faire dans une expérience pratique avec la réalité, avec ce qui est. C'est une philosophie pragmatique, en sachant bien entendu que ma vue de ce qui est risqué de changer le jour où la mécanique quantique changera.

Bernard d'Espagnat. Il me semble qu'il y a quand même une différence, parce qu'en physique classique vous pouviez faire cette identification sans aucun problème. On y admet que les choses que nous voyons sont par elles-mêmes comme nous les voyons. En physique quantique on sait que c'est plus compliqué.

Jean-Michel Raimond. Je ne suis pas sûr de voir l'état thermodynamique d'un système compliqué. Oui, pour une particule de base, je vois la vitesse, et encore... Pour un système thermodynamique un peu complexe, je ne suis pas sûr de voir ce que...

Bernard d'Espagnat. Ce qu'il y a, c'est que, dans la pensée classique ordinaire, celle, disons, du matérialisme à son apogée, l'identification dont il s'agit allait jusqu'à la métaphysique,

alors qu'en physique quantique on ne peut la pousser jusqu'à cet extrême. On doit y prendre le point de vue pragmatique que vous mentionnez et certes vous avez tout à fait raison de le prendre et d'écartier de vous les problèmes philosophiques. Mais il est néanmoins intéressant de voir que maintenant prendre ce point de vue pragmatique est devenu obligatoire, alors qu'aux beaux temps de la physique classique on pouvait demeurer dans une espèce de métaphysique chosiste implicite.

Jean-Michel Raimond. Je suis pratiquement sûr qu'il serait impossible, dans le cadre strict de la physique quantique, de répondre à la question philosophique, et donc ne sachant pas y répondre, je préfère ne pas me la poser ; on en a déjà longuement discuté lors de la séance précédente. J'ai très peur, après, de buter dans les solipsismes « le monde n'existe pas » ou la fonction d'onde de l'univers, qui, tous les deux, me paraissent sans échappatoire.

Bernard d'Espagnat. Il ne faudrait pas que nous interrompions trop longuement votre exposé d'une expérience fondamentale par nos excursions en un terrain qui, je le reconnais, est plus mouvant. Hervé Zwirn désire cependant ajouter quelque chose.

Hervé Zwirn. Dans cette même direction, j'ai une proposition à faire dans le but de donner une heuristique pour essayer de clarifier le débat quant à ce qu'on peut dire en mécanique quantique et ce qu'on ne peut pas dire.

Vous avez dit « ce qui se passe avec la décohérence, c'est qu'on passe du "et" au "ou" », et tout est là, en fait : comment passe-t-on du « et » au « ou » ? Le « et », on voit très bien ce que c'est, c'est la superposition, c'est l'intrication. Le « ou », en revanche, suppose que l'on soit arrivé à un état qui est un mélange statistique, au sens classique du terme, comme en physique statistique classique. Mais, pour qu'on puisse dire cela il faut que l'opérateur densité du système associé au « ou » ait été diagonalisé. Or, cela ne se produit pas en toute rigueur de manière complète. Il subsiste des termes non diagonaux extrêmement petits. Ca se produit – comme vous le dites très bien – pour tout propos pratique, ce qui veut dire qu'il est impossible pratiquement de mettre en évidence le fait que la diagonalisation est pas complète. Mais, plaçons-nous dans un monde dans lequel on n'ait pas d'ordre de grandeur en tête, c'est-à-dire qu'on ne sache pas combien de temps ça prendrait que des termes non-diagonaux minuscules redeviennent non-négligeables. Ce qui se passe, et on le sait parce qu'on fait le calcul, c'est que les termes non-diagonaux qui sont toujours présents dans l'opérateur densité sont en fait d'une taille tellement faible qu'ils sont négligeables pour tout propos pratique même s'ils pourraient, en théorie, redevenir non-négligeables au bout d'un temps de récurrence de Poincaré qui est, de toute façon, en dehors de tout sens physique. Et donc, cette estimation numérique, nous permet de dire que tout se passe comme si l'état était diagonalisé. Mais imaginons qu'on ne connaisse pas les valeurs numériques qui sont affectées aux exponentielles décroissantes des termes non-diagonaux et qu'on soit simplement en train de regarder le formalisme. On dirait, à ce moment-là, en l'absence de connaissance du temps nécessaire pour que les termes non diagonaux redeviennent importants, on dirait « on n'est pas dans un état "ou" », parce qu'il existe toujours des termes non-diagonaux. Je crois que c'est cela que veut dire Bernard d'Espagnat. Si on se place dans un monde où on oublie les valeurs numériques et qu'on regarde simplement ce que sont les choses, eh bien, on n'est pas dans un état associé à « ou », on est toujours dans un état associé à « et ».

Jean-Michel Raimond. À cela près qu'il y a, dans la décohérence précisément, et surtout quand elle vient d'un objet macroscopique, une telle réserve d'ordres de grandeur qu'on doit pouvoir rester dans « *for all practical purposes* ». Les temps de récurrence sont tout à fait gigantesques, bien plus longs que la durée de vie de l'Univers. Il n'y aura plus d'univers, l'univers ne sera plus que rayonnement longtemps avant qu'un temps de récurrence se produise, donc ça n'a aucun sens.

Ce qui m'inquiète plus, et, à la limite, ce qui est plus difficile, est sans doute, avant cela, de définir ce qu'est un système. Où mets-je la frontière ? Comment puis-je isoler suffisamment un système de l'environnement pour qu'effectivement je puisse distinguer les variables du système des

variables de l'environnement ? Il s'agit d'un problème plus délicat, et c'est précisément pour cette raison qu'il est difficile de faire des expériences de mécanique quantique. Il est difficile de l'isoler suffisamment pour pouvoir parler d'un système en tant que tel. Il s'agit d'un problème conceptuel plus grave que celui des récurrences de Poincaré ou de l'existence de termes non-diagonaux dans la matrice densité, dont l'expression avec des zéros ne tiendrait pas dans la mémoire d'un ordinateur.

Hervé Zwirn. Ce qui montre clairement la différence de points de vue entre le physicien et le philosophe. Il est évident que physiciens et philosophes peuvent tomber d'accord sur le fait que, *for all practical purposes*, il n'y aura pas d'effet mesurable, mais, ça, c'est *a posteriori*, une fois qu'on a fait les calculs et qu'on s'est rendu compte de ces ordres de grandeur. Maintenant, si on oublie les ordres de grandeur résultant du calcul et que l'on regarde si la matrice densité est réellement diagonale, on se rend compte que ce n'est pas le cas. Le philosophe, à ce moment-là, se dit, l'état du système est toujours superposé. Sur le plan strictement philosophique, il y a une différence entre quelque chose qui est extrêmement petit mais non nul, par rapport à quelque chose qui est rigoureusement nul.

Jean-Michel Raimond. Je crains, d'un point de vue pragmatique de béotien à la tête dure, que cette préoccupation légitime du philosophe ne soit seconde à d'autres préoccupations, qui sont : peut-on parler de sous-système ? peut-on parler de la mécanique quantique tout court ? Si on ne sait pas parler de sous-système, on ne sait parler de rien, et je crois que ces effets de séparation d'un système en sous-systèmes posent des problèmes qui sont plus immédiats que le problème des récurrences de Poincaré ou de la non-nullité *stricto sensu* des éléments non-diagonaux de la matrice densité.

Bernard d'Espagnat. Oui. Peut-on même parler d'un système autrement qu'à titre d'interprétation ?

Jean-Michel Raimond. Peut-on parler d'un système qui soit autre que l'ensemble de l'univers ? Là, on tombe dans un solipsisme qui n'est tenable ni par un expérimentateur ni même par un philosophe, je pense.

Jean Petitot. Si je peux enrichir un tout petit peu la remarque d'Hervé, j'ajouterai une petite différence par rapport à ce que tu viens de dire... L'écart entre une valeur presque nulle et une valeur vraiment nulle, est plus un problème d'idéalité mathématique qu'un problème philosophique. Les objets mathématiques sont, par définition, des idéalités et donc, à certains moments, on franchit certaines bornes de ce qui est interprétable physiquement. C'est évident, mais je ne dirai pas que c'est un problème philosophique ou ontologique.

Hervé Zwirn. Je n'ai pas dit que c'était ce problème-là qui était philosophique.

Jean Petitot. C'est le lien entre mathématiques et expérience qui est en jeu, et ce dont nous parlons veut dire que les mathématiques décrochent, à ces limites, de toute effectivité et n'ont plus aucun sens expérimental.

Jean-Michel Raimond. Je ne voudrais pas jeter le trouble dans les esprits mais il y a des choses très remarquables qui ont été faites récemment sur la relaxation d'un système quantique intriqué. On trouve que, dans beaucoup de cas, l'intrication ne tend pas vers zéro exponentiellement mais s'annule explicitement, brutalement à un certain instant. Mathématiquement, l'intrication s'annule, donc il n'est pas impossible que des effets de ce style, si on savait faire la théorie de la décohérence avec une précision suffisante, ne puissent apporter une solution au problème des éléments non-diagonaux infinitésimaux. Mais ce n'est pas mûr et, pour tout propos pratique, cela n'a

aucun sens, parce que ces remarques portent sur l'extrême bout de la queue de l'exponentielle, dans une zone où il n'y a pratiquement plus rien à voir.

Je crois quand même, et ça ce n'est pas philosophique, au fait que la décohérence définit la quantité mesurée. Il est important de savoir quelle est la dynamique de la décohérence pour savoir ce que mesure un appareil. Cela est vrai aussi en physique classique : si vous ne connaissez pas l'amortissement de l'appareil, vous ne savez pas ce qu'il mesure.

En revanche, bien entendu, elle ne dit rien sur le pourquoi ni le comment de l'émergence d'un résultat unique quand on fait la mesure, l'instanciation. D'autre part, clairement, ce n'est pas une addition aux postulats standards. Elle ne se substitue pas aux postulats standards, elle est équivalente à eux. On met dans la théorie de la décohérence, explicitement, et dans toute cette approche en termes d'équations pilotes, la notion de trace partielle, qui est équivalente au postulat de réduction. On ne peut pas démontrer les postulats de la mesure à partir de la décohérence, sans courir le risque d'un argument circulaire.

Bernard d'Espagnat. La décohérence n'est pas une nouvelle théorie.

Jean-Michel Raimond. Non, c'est la relaxation quantique telle qu'on la pratique depuis Bloch, depuis les tout débuts de la mécanique quantique, appliquée à un système mésoscopique suffisamment complexe pour qu'il y ait deux échelles de temps bien distinctes. C'est purement un épiphénomène.

□



Explorer expérimentalement la décohérence ?

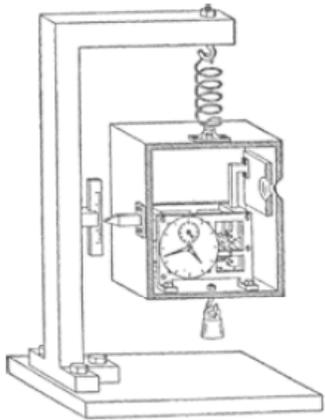
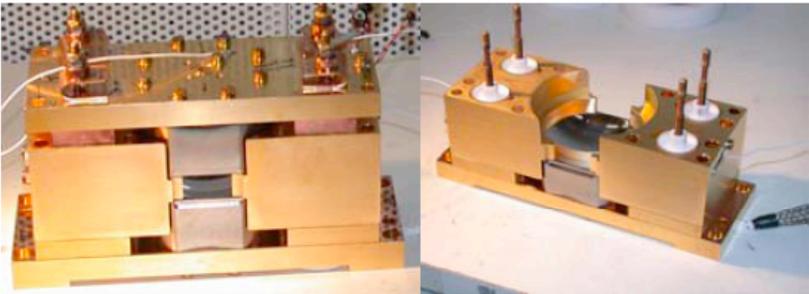
- Facile !
 - On le fait tous les jours en n'arrivant pas à être dans une superposition quantique d'états...
- Pas si simple ?
 - Résoudre la dynamique de la décohérence impose un système mésoscopique (pour qu'on ait bien les deux échelles de temps) très faiblement couplé à son environnement
 - Grand temps de relaxation classique pour que le temps de décohérence soit assez long pour être résolu
 - Impose de disposer de moyens délicats de sonder l'état du système
- Peu de systèmes se prêtent à ces expériences. En particulier:
 - Pièges ioniques
 - Electrodynamique quantique en cavité.
 - Dans les deux cas, un oscillateur harmonique couplé à un réservoir, manipulé et sondé par des systèmes à deux niveaux

Académie 2011 27

Comment explorer expérimentalement la décohérence ? On pourrait dire : « c'est facile, on le fait dans la vie de tous les jours ». Evidemment, mais c'est un peu insatisfaisant. Si on veut la regarder fonctionner, il ne faut pas se contenter de regarder l'état final, les mélanges statistiques de la vie de tous les jours, il faut essayer d'en résoudre la dynamique et pour cela il faut partir d'un système dont la constante de temps long est suffisamment longue pour qu'on puisse mesurer le temps de décohérence qui est évidemment beaucoup plus court. Il faut aussi des moyens délicats pour scruter l'état du système, parce que ce n'est pas tout à fait évident de savoir si un système est dans un état de superposition quantique ou non. Il y a quelques systèmes qui se prêtent à ces expériences, en particulier ceux des deux premières manipulations réalisées dans les années 1990, les pièges à ions, et l'électrodynamique en cavité. Dans les deux cas, on joue expérimentalement avec le modèle quantique le plus simple non trivial, qui est un système à deux niveaux ou spin $\frac{1}{2}$ couplé à un oscillateur harmonique.

Un objet mésoscopique

- Un champ de quelques photons dans une « boîte à photons »

– Cavité supraconductrice

- Les meilleurs miroirs
- Stocke un champ micro-onde (51 GHz, longueur d'onde 6mm)
pendant un temps macroscopique: **0.13 s**

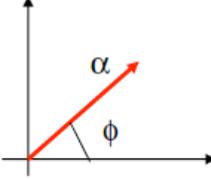
Académie 2011 28

Que va-t-on manipuler comme objet mésoscopique dans nos expériences ? On manipule un champ de quelques photons qui est stocké dans une boîte à photons ; c'est la version moderne de la fameuse boîte à photons d'Einstein. Bien entendu, ce n'est pas une « boîte à photons », c'est une cavité, deux miroirs face à face, une cavité Fabry-Perot réalisée avec des miroirs supraconducteurs d'une qualité géométrique extraordinaires, ce qui fait que dans le domaine millimétrique, vers cinquante gigahertz, six millimètres de longueur d'onde, on arrive à réaliser le meilleur miroir au monde, un miroir sur lequel le photon peut rebondir un milliard de fois sans se perdre. On a donc une cavité qui fait à peu près trois centimètres de long et cinq centimètres de diamètre et qui peut stocker un photon pendant 0,13 seconde. Bien entendu, les photons sont éternels dans l'espace libre, mais, ils détestent être en captivité et en meurent très vite. Conserver un photon piégé 0,13 seconde, ce n'est donc pas évident.

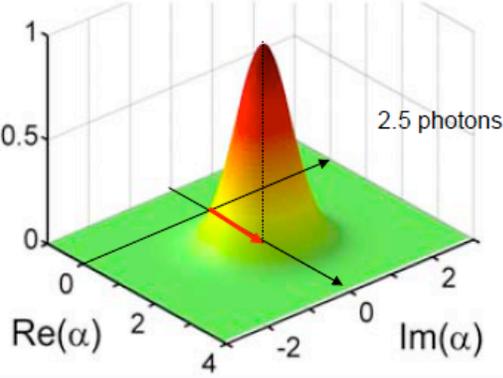
Un objet mésoscopique

- Champ créé par une source classique dans cette « boîte à photons »

- Description classique:
 - Une amplitude, une phase



- Description quantique
 - Une « fonction d'onde »
 - (fonction de Wigner)
 - Fluctuations quantiques

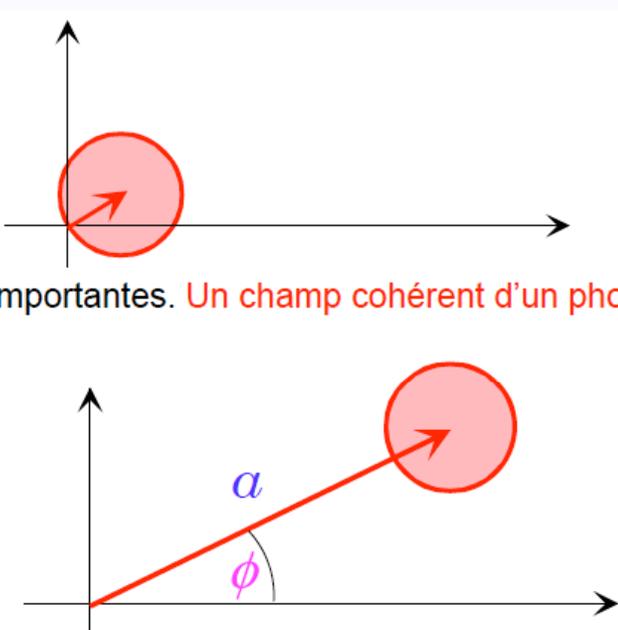


Académie 2011 29

Dans cette cavité, on va mettre un champ classique, un champ mésoscopique, un de ces états cohérents de l'oscillateur harmonique. Bien entendu, vous savez qu'un champ oscillant classique, peut être décrit dans le plan de Fresnel par une amplitude et une phase ou par un nombre complexe. Quantiquement, on peut le décrire par une sorte de fonction d'onde dans le plan de phase, qui est la fonction de Wigner. Essentiellement, ce que nous dit la physique quantique, c'est que, superposées à l'amplitude classique, on a des fluctuations quantiques et que l'on peut essentiellement comprendre l'état cohérent comme une densité de probabilité de présence du champ électrique, dont l'amplitude n'est appréciable que dans un petit cercle autour de l'amplitude classique. Alors traçons un cercle pour représenter cela simplement. J'ai une amplitude classique et un cercle de rayon constant qui décrit les fluctuations quantiques qui sont essentiellement celles imposées par la limite d'Heisenberg.

Un objet mésoscopique

- Petit champ:
 - Fluctuations importantes. Un champ cohérent d'un photon est un objet quantique
- Grand champ:
 - Petites fluctuations. Un champ cohérent de 10 photons est essentiellement classique



Académie 2011 30

Si je considère un champ de l'ordre du photon, l'amplitude des fluctuations quantiques est de l'ordre de l'amplitude du champ. C'est finalement un objet très quantique dont toute la dynamique va être gouvernée par des fluctuations quantiques. En revanche, si l'amplitude vaut quelques dizaines – dans les bonnes unités, le carré de l'amplitude est le nombre de photons qu'il y a dans le champ –, l'amplitude classique domine l'amplitude des fluctuations quantiques et on se retrouve avec un objet qui est essentiellement un objet qui peut, pour tout propos pratique là encore, être compris comme un objet classique. On peut préparer ces états cohérents dans la cavité simplement au moyen d'une source classique de rayonnement, une sorte de laser, et, en tournant un bouton, passer d'un objet très quantique, qui contient un photon en moyenne, à un objet très classique, qui contient des dizaines de photons. On peut donc régler la taille de l'objet qu'on va manipuler entre une échelle résolution microscopique, où il n'y aura pas de décohérence, et une échelle très macroscopique, où il y aura décohérence.

Bernard d'Espagnat. Vous passez d'un état à, en moyenne, un seul photon à un état à beaucoup de photons, juste en tournant un bouton ?

Jean-Michel Raimond. Oui. Je peux préparer, dans ma cavité, par des moyens purement électroniques ces états cohérents, qui sont des états quasi classiques. Je sais coupler à ma cavité une source classique et je sais moduler, régler, l'amplitude de cette source classique.

Jean-Pierre Gazeau. Ce sont les états cohérents du champ électromagnétique.

Jean-Michel Raimond. Oui.

Jean-Pierre Gazeau. Quand tu dis « à n photons »... ce n'est jamais déterminé, le nombre de photons dans un état cohérent.

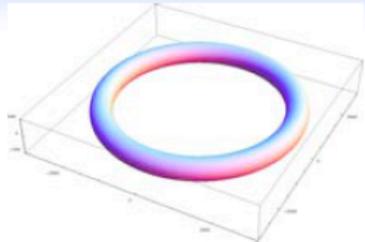
Jean-Michel Raimond. Non, non, le nombre *moyen* de photons est déterminé, c'est le carré de l'amplitude, mais ce n'est pas un nombre entier.

Un état cohérent du champ électromagnétique a une statistique de photons qui est poissonnienne, avec un nombre moyen de photons qui est le carré de l'amplitude et avec une dispersion qui est 1 sur la racine carrée du nombre moyen de photons.

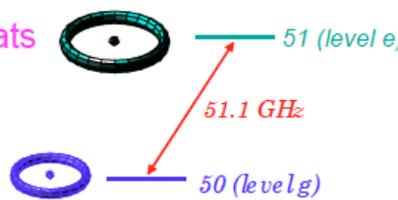
□



Comment préparer un chat ?



- Interaction du champ avec un unique atome
 - Etat atomique très particulier
 - État de Rydberg circulaire
 - très fortement couplé au champ
 - Atome et cavité non résonants
 - Pas d'échange d'énergie
 - Atome modifie la fréquence de résonance de la cavité
 - Change la phase classique du champ
 - Atome dans une superposition quantique d'états
 - Champ dans une superposition quantique de deux phases différentes!



51 (level e)

51.1 GHz

50 (level g)

 - Un objet mésoscopique dans une superposition d'états avec des propriétés classiques différentes !

Académie 2011
31

Alors, comment va-t-on préparer un chat ? On va mettre un champ mésoscopique cohérent dans la cavité et on va coupler avec lui un système à deux niveaux similaire à un spin $\frac{1}{2}$, un atome à deux niveaux. C'est un atome, effectivement, qui est préparé dans ce qu'on appelle des états de Rydberg circulaires. C'est un peu technique, ce sont des états qui sont à la fois très excités et très proches de l'ionisation et qui sont la meilleure réalisation quantique de l'orbite de

Bohr. Ce sont des états qui ont des nombres quantiques orbitaux et magnétiques maximum, ce qui fait que l'orbitale est cette sorte de pneu de vélo centré sur l'orbite de Bohr. Ils ne sont pas très faciles à préparer. Ce sont des états qui sont complètement classiques, toutes leurs propriétés peuvent être calculées classiquement, tous les nombres quantiques étant grands. Ils ont une très grande durée de vie, ils sont facilement détectables, on peut les mesurer un par un, on peut les détecter, on peut les manipuler de manière extrêmement subtile, comme on va le voir.

Jean-Pierre Gazeau. Il y a combien de niveaux qui sont mis ensemble ?

Jean-Michel Raimond. On va isoler deux niveaux, c'est-à-dire qu'on va se débrouiller pour qu'il y ait deux niveaux qui jouent un rôle.

Jean-Pierre Gazeau. C'est pour créer un état de Rydberg ?

Jean-Michel Raimond. Non, l'état de Rydberg est un état bien donné. Là, on considère deux niveaux, qui sont g et e , qui sont les états circulaires, avec des nombres quantiques principaux de 50 et de 51. Il y a une infinité d'états de Rydberg. Dans la multiplicité de nombre quantique principal 50, il y a 5 000 niveaux – $2n^2$ – mais on se débrouille pour mettre des champs électriques, etc., qui lèvent toutes les dégénérescences et qui font qu'on ne voit plus que celui-là, qu'on ne prépare que celui-là, de manière sélective, avec une sélectivité de 98 % ou 99 %, La cavité est accordée au voisinage de cette transition-là, et seulement de cette transition-là.

□

Qu'est-ce qu'on va faire d'eux ? On va faire interagir l'atome et le champ, et on va les faire interagir de façon non-résonnante. Le point est qu'un atome non-résonnant n'est pas capable d'émettre ou d'absorber des photons car cela ne conserverait pas l'énergie. Tout ce qu'il peut faire, c'est se comporter comme un petit bout de diélectrique transparent. Il n'émet ni n'absorbe de photons mais il a un indice de réfraction. L'atome qui traverse la cavité change la fréquence de résonance de la cavité. Et il se trouve que ces atomes sont extraordinairement fortement couplés au rayonnement simplement parce qu'ils sont très gros. Cet atome-là a une taille qui est de 2.500 fois la taille de l'atome d'hydrogène, c'est un atome qui fait à peu près 0,2 micron de diamètre. Donc, étant gros, ils sont fortement couplés au rayonnement. Un seul atome qui traverse la cavité peut changer la phase de l'amplitude classique du champ de plusieurs dizaines de degrés, un gros effet, quelle que soit l'amplitude du champ, et il peut la changer d'une manière différente s'il est dans le niveau e ou dans le niveau g .

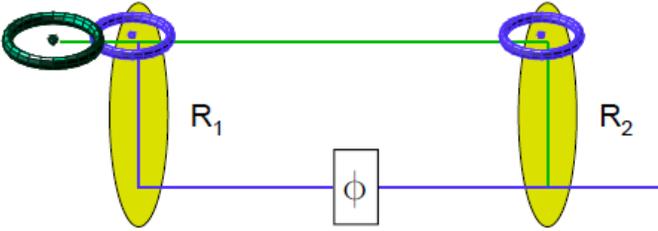
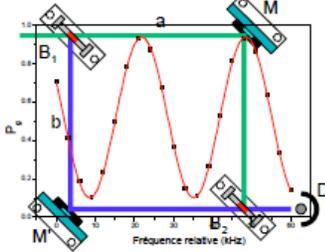
Cela ressemble à s'y méprendre à un appareil de mesure : on a une amplitude qui pointe dans le plan de Fresnel. Si l'atome est dans le niveau e , l'amplitude va partir avec une phase dans un sens. Si le niveau est g , l'amplitude va partir avec une phase dans l'autre. Donc l'amplitude qui pointe dans le plan de Fresnel, c'est l'aiguille de mon appareil de mesure. Le couplage avec l'atome, c'est précisément la dynamique qui fait que : « si l'atome est dans un niveau, je pars dans un sens ; si l'atome est dans l'autre niveau, je pars dans l'autre sens ». J'ai donc un prototype d'appareil de mesure.

Jean-Pierre Gazeau. Ça ne va pas changer le nombre de photons ?

Jean-Michel Raimond. Ça ne change pas le nombre de photons parce que je n'ai pas le droit de les absorber ou de les émettre puisque cela ne conserverait pas l'énergie.

Un interféromètre atomique: Ramsey

- Deux impulsions classiques $\pi/2$ résonnantes avec une transition e/g

- Probabilités de détection finales modulées en fonction de la phase relative des deux impulsions (parfaitement contrôlée) ET de l'histoire de la fréquence atomique entre ces deux impulsions

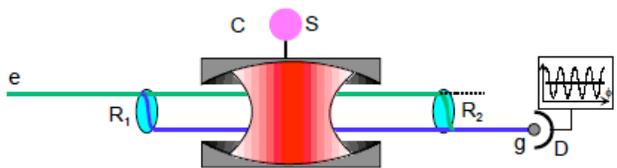
Académie 2011 32

Je vais en fait d'abord faire une expérience de complémentarité. Je présente en deux mots l'interféromètre atomique qui est celui qu'il y a dans toutes les horloges atomiques. Il s'agit de l'interféromètre de Ramsey. Je suis initialement dans le niveau e et l'atome va interagir successivement avec deux impulsions de micro-ondes tout à fait classiques. Dans cette expérience préliminaire il n'y a pas encore de cavité, et je me débrouille pour que chacune de ces deux impulsions transfère à moitié le niveau e dans le niveau g , c'est-à-dire que, à partir de e , elle prépare l'atome dans une superposition de, à la fois, e et g .

Si l'atome passe de e à g , il peut le faire de deux manières : ou bien il effectue sa transition quand il reçoit la deuxième impulsion, ou bien il effectue sa transition quand il reçoit la première. Il y a donc deux chemins quantiques qui conduisent du même état initial au même état final. S'il y a deux chemins quantiques, il doit y avoir interférence. Ça ressemble à s'y méprendre au modèle de Mach-Zehnder. La probabilité d'observer l'effet 'l'atome passe de e à g ' est modulée en fonction de la phase relative de ces deux impulsions successives ou de ce qui arrive à l'atome entre les deux impulsions. Donc on a un interféromètre atomique, un interféromètre d'état interne.

Une expérience sur la complémentarité

Cavité comme un détecteur externe dans l'interféromètre de Ramsey



- Prototypé d'un appareil de mesure quantique
- Un système mésoscopique (le champ) qui acquiert une information sur l'état d'un système microscopique (l'atome)
- Le champ est une 'aiguille' qui 'pointe' vers l'état de l'atome
- Information non ambiguë si l'aiguille est suffisamment longue
- Un appareil de mesure se doit d'être classique

Champ cohérent dans la cavité initialement



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

$$\begin{array}{l}
 |e\rangle | \text{---} \text{---} \rangle \longrightarrow |e\rangle | \text{---} \text{---} \rangle \\
 |g\rangle | \text{---} \text{---} \rangle \longrightarrow |g\rangle | \text{---} \text{---} \rangle
 \end{array}$$

Comment?

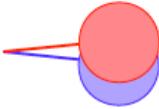
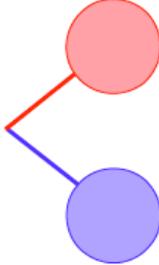
Académie 2011 33

Nous faisons donc une expérience de complémentarité. La cavité, avec son champ cohérent, est, comme je vous l'ai dit, un appareil de mesure dont l'aiguille d'amplitude du champ est capable de dire si l'atome est dans e ou dans g . Eh bien, je mets ça à l'intérieur de mon interféromètre. Vous voyez que e se couplant avec l'état du champ va faire tourner « l'aiguille » dans un sens et que g va faire tourner l'aiguille dans l'autre sens. Donc finalement, la cavité est un appareil de mesure, dont l'aiguille – la phase du champ – est susceptible de me donner une information sur le chemin suivi par l'atome dans l'interféromètre. Si l'information est suffisante pour me dire dans quel état était l'atome au milieu, je ne dois pas avoir de franges. Si l'information est insuffisante, je dois avoir des franges.



Deux cas limites

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

Académie 2011
34

Quand est-ce que l'information est suffisante ? Elle l'est si le déplacement de phase de mon champ est grand à l'échelle des fluctuations quantiques. Si mon déplacement de phase est tout petit par rapport à l'échelle des fluctuations quantiques, je ne sais rien sur le chemin suivi et je dois observer des franges. C'est comme tout à l'heure : l'impulsion de la particule était petite à l'échelle des fluctuations quantiques de ma séparatrice et j'avais des franges. Si le déphasage est grand, au contraire, je peux déterminer, au moins en principe, dans quel état était l'atome, et les franges disparaissent.

C'est effectivement ce qu'on observe. En manipulant le champ comme je le disais tout à l'heure, je suis capable de modifier à ma guise le déplacement de phase du champ dû à l'interaction avec l'atome, et je constate que, quand les deux états de phase correspondant aux deux états atomiques sont bien séparés je n'ai pas de franges. Il s'agit bien à nouveau une expérience de complémentarité, mais, cette fois-ci, une expérience de complémentarité qui, au lieu de se faire avec un appareil macroscopique de mesure, se fait avec un appareil de mesure qui, ici, contient trois photons, un tout petit appareil de mesure.

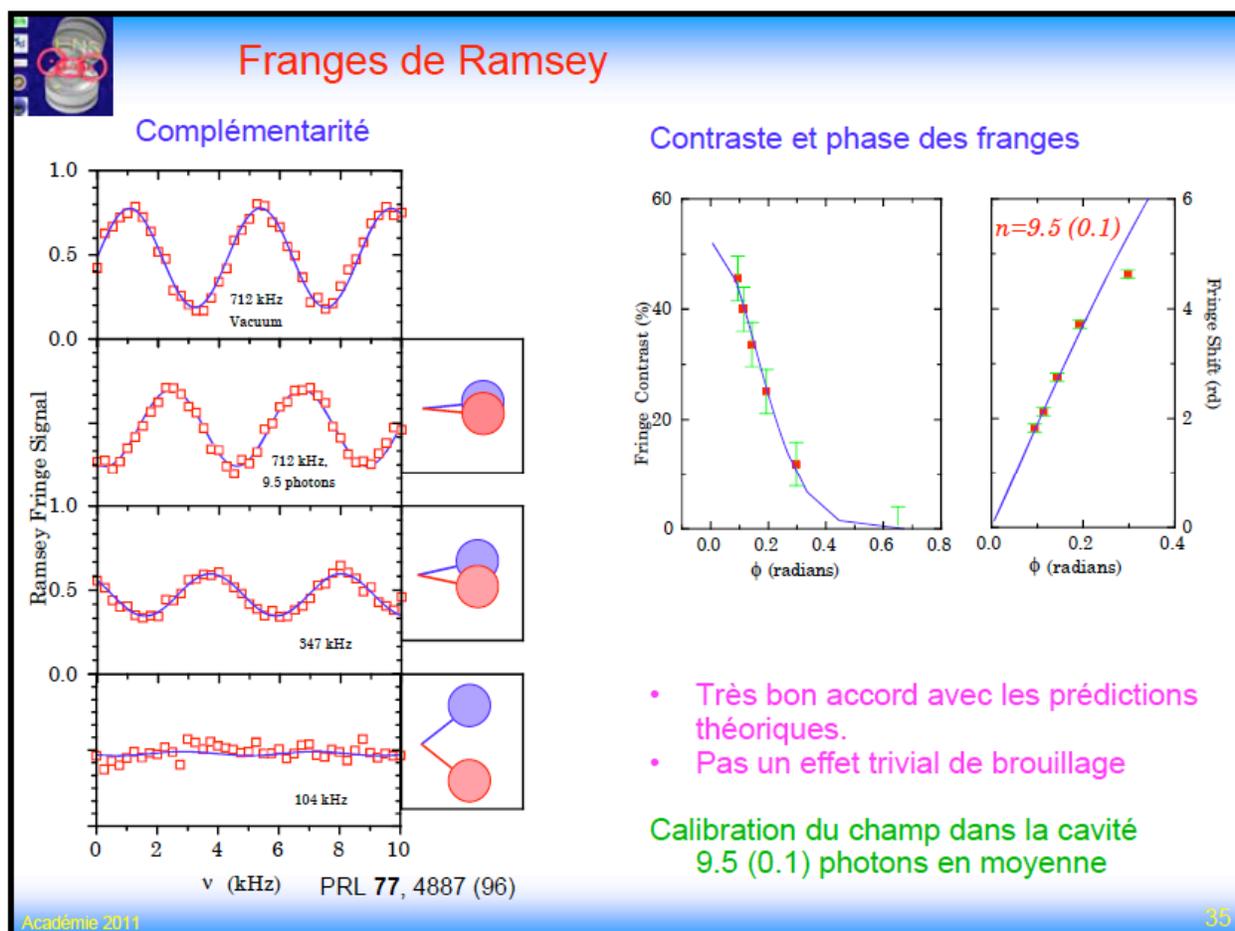
Jean-Pierre Gazeau. Quand tu dis « déplacement de phase », on s'attend à ce qu'il y ait quand même une incertitude sur le nombre moyen de photons.

Jean-Michel Raimond. Dans tout cela, il y a évidemment une incertitude sur le nombre

moyen de photons, qui est constante dans toute cette expérience.

Jean-Pierre Gazeau. Mais qui sera en relation, quand même, avec l'incertitude sur la phase ?

Jean-Michel Raimond. Non, parce que l'interaction avec l'atome ne change pas du tout la distribution du nombre de photons. On change uniquement la phase du champ, la distribution du nombre de photons reste constante, on l'a vérifié. Pour le vérifier, on envoie des centaines d'atomes à travers la cavité et on constate que l'intensité du champ ne change pas. On peut vérifier, en plus, que la décroissance, de la visibilité des franges est exactement conforme à la théorie.



Jean-Michel Raimond. Voilà pour la première étape. Mais en fait, ce qu'il est intéressant de regarder ce n'est pas tellement l'état de l'atome. Car une fois que j'ai détecté l'atome dans l'état g , que reste-t-il dans la cavité ? Le calcul montre – c'est un exercice de master de mécanique quantique – que c'est la superposition quantique des deux états. En un mot, l'atome traverse le champ, il s'intrique avec le champ, mais ensuite il reçoit la seconde impulsion de micro-onde. Par elle, je brouille l'information sur l'état de l'atome, je re-mélange les états de l'atome juste après qu'il a interagi avec le champ. Ce qui me reste à la fin dans le champ, c'est

soit cette superposition là – si je détecte l'atome dans un certain état – soit la superposition avec un signe moins si je le détecte dans l'autre.

Le procédé que je viens de décrire me fournit cette superposition d'états quantiques du champ et je suis capable, maintenant, de regarder ce qui arrive à cette superposition mésoscopique d'états quantiques. Est-ce qu'elle reste dans une superposition quantique ou est-ce qu'elle passe dans un mélange statistique ? On va révéler la dynamique de la décohérence.

Une version de laboratoire du chat de Schrödinger

Etat final du champ

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

Superposition cohérente de deux états classiques.

Très semblable au chat de Schrödinger



Décohérence transforme cette superposition en mélange statistique

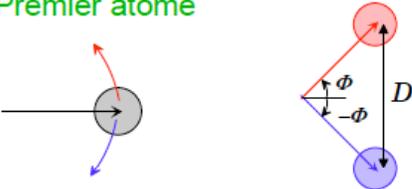
Relaxation lente: la dynamique de la décohérence est accessible

Décohérence prise sur le fait

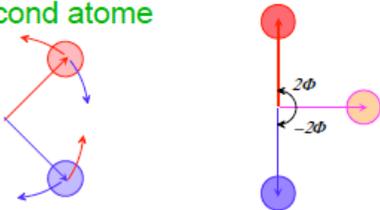
Un atome sonde la décohérence

Interférences quantiques impliquant le champ dans la cavité

Premier atome



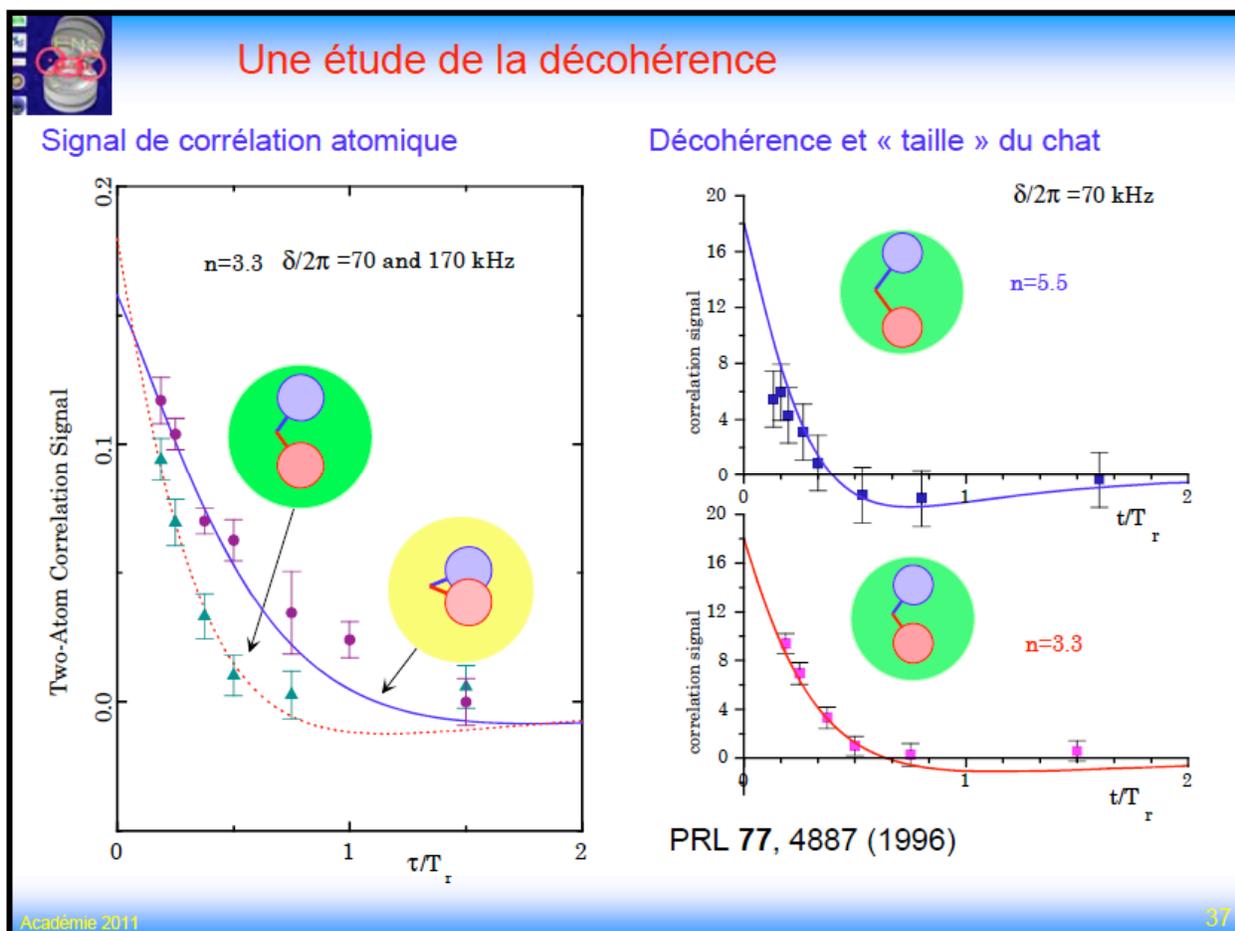
Second atome



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

Académie 2011 36

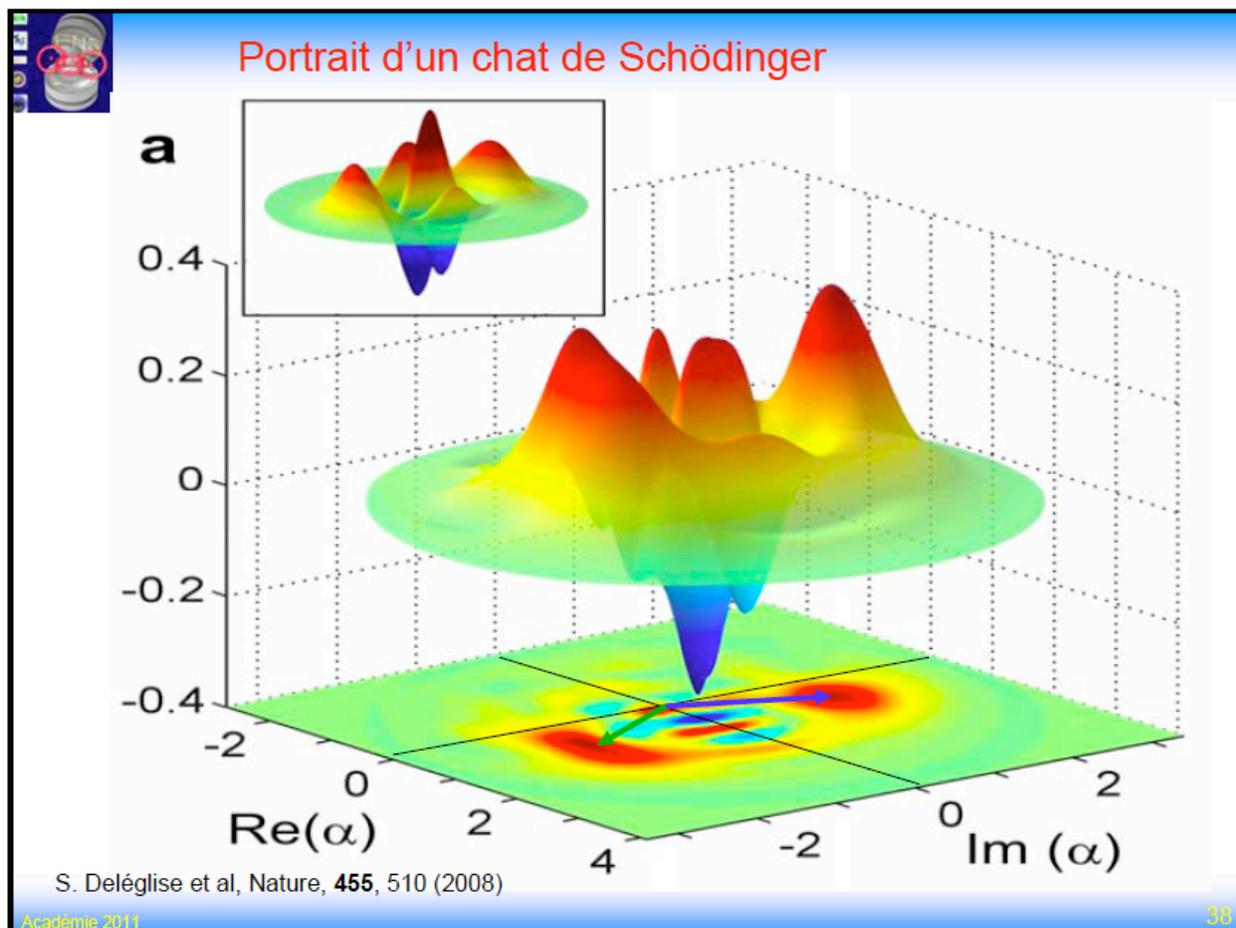
Comment révèle-t-on la dynamique de la décohérence ? Je pourrais vous l'écrire ; c'est un peu long, il faut un demi-tableau. Essentiellement, on va envoyer un deuxième atome, un atome sonde celui-là, qui est capable de nous dire si, à un instant donné, le champ est dans cet état de superposition qu'on vient de voir ou dans un mélange statistique. En gros, on fait une interférence quantique sur le champ lui-même, qui est capable de nous dire si on est bien dans cet état de superposition ou dans un simple mélange statistique.



Je vais vous montrer tout à l'heure un signal plus récent mais voilà le signal qu'on a obtenu en 1996. C'est en fonction du temps : on prépare cette superposition quantique, on la laisse un certain temps dans la cavité, on la mesure, et on sort un signal qui est proportionnel au degré de quanticité de la superposition, aux éléments non-diagonaux de la matrice densité. Voilà l'évolution du signal en fonction du temps, en unités du temps de relaxation de la cavité, et pour deux séparations de phase de l'état du champ. On constate qu'effectivement le caractère quantique de la superposition s'effondre plus vite que le temps de relaxation de l'énergie, et d'autant plus vite qu'on sépare plus les états pointeurs.

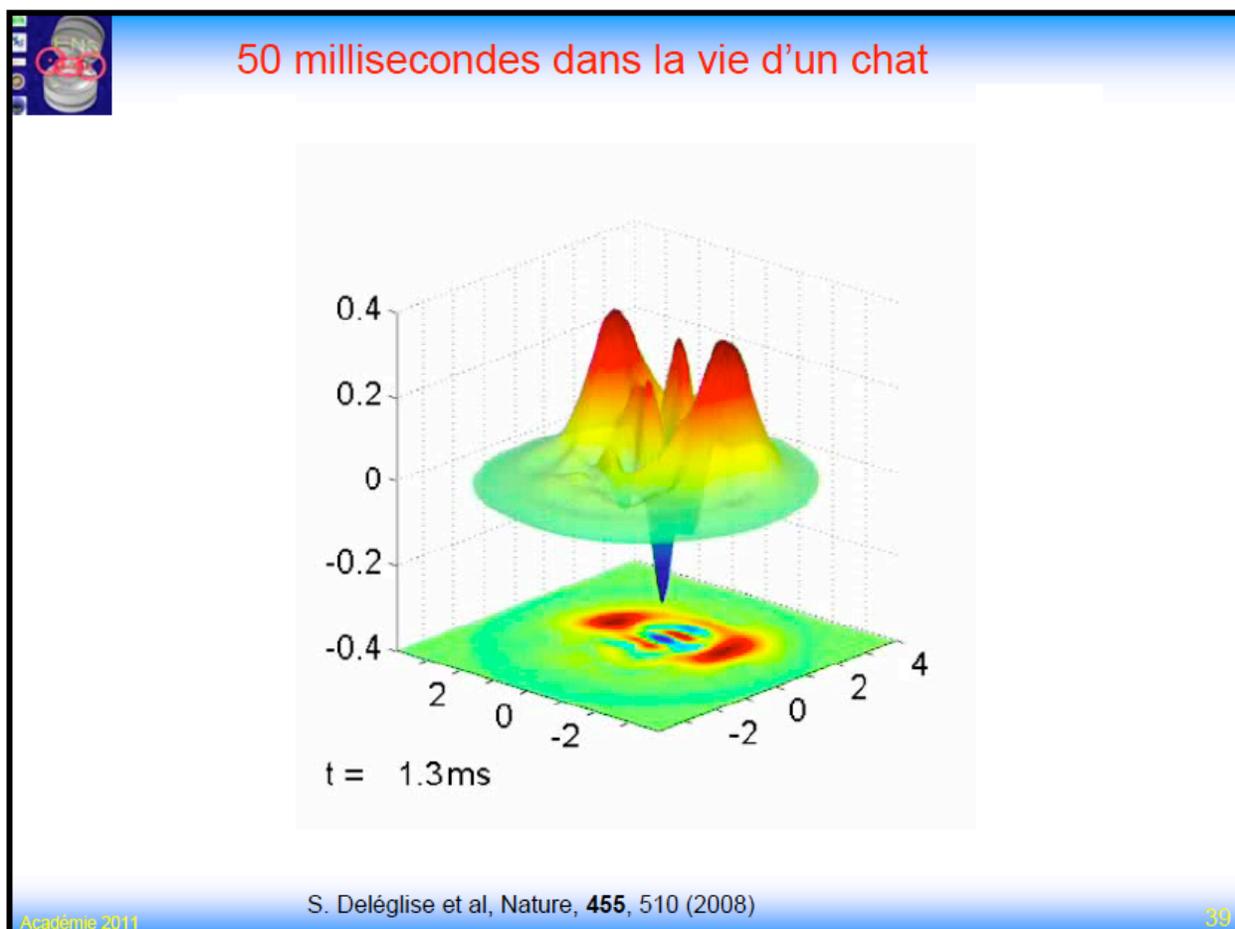
Voilà ce qu'on faisait en 1996. C'est un signal dont je dirai qu'il est un peu indirect, un peu difficile à interpréter. On a beaucoup progressé depuis et, en 2008, on a été capables, avec Samuel Deléglise, non pas de se contenter de signaux indirects mais bien de faire une reconstitution complète de la matrice densité du champ dans la cavité. On est capables de préparer le chat comme je vous l'ai expliqué : on envoie l'atome, il crée une superposition d'états de phase, et puis on efface l'état de l'atome, et il reste dans la cavité ce que j'appelle un chat de Schrödinger, c'est-à-dire cette superposition de deux états cohérents de phases différentes. Ce qu'on est capables de faire, c'est de reconstruire l'état de ce chat en fonction du temps. En fait, plutôt que la matrice densité, qui est une matrice compliquée, pas très visuelle, on regarde la fonction de Wigner, une fonction décrivant l'état du champ (elle contient la même information que la matrice densité). Une fonction de Wigner est une distribution de quasi-probabilité dans le

plan de phase. Elle permet donc de calculer toutes les valeurs moyennes quantiques. Ce n'est pas une vraie distribution de probabilités car à certains endroits elle peut prendre des valeurs négatives.



Donc voilà la fonction de Wigner reconstruite d'un chat de Schrödinger. On y voit tout ce qu'on attend d'un chat. On voit deux « oreilles ». Ce sont les deux composantes cohérentes qu'on attend, qui sont en superposition. Elles ont bien la forme d'une oreilles de chat, une forme en courbe, parce que, en fait, la préparation de notre chat n'est pas parfaite. On déforme un peu les états cohérents en séparant leurs phases. Si on avait un mélange statistique, on n'aurait que les deux oreilles. Mais comme c'est une superposition quantique à l'instant initial on a, entre les deux oreilles, un « sourire » ou des « moustaches », des franges d'interférences qui révèlent le fait que ce chat qu'on vient de préparer – on le regarde juste après qu'on l'a préparé – est dans une superposition quantique.

En plus, dans cette méthode on est capable de suivre l'évolution de cette fonction de Wigner dans le temps avec une bonne résolution temporelle.



Ce chat – j’ai oublié de le dire – contient douze photons en moyenne. Plus précisément, la séparation entre les deux oreilles est de douze photons. C’est ce qui compte pour le temps de décohérence. On s’attend à un temps de vie du chat (temps de décohérence) de l’ordre de dix-neuf millisecondes. Donc on peut le résoudre dans le temps. Je vais vous montrer maintenant la vie et la mort d’un chat, cinquante millisecondes dans la vie d’un chat. Le film est ralenti d’un facteur mille. Ce qu’on constate, c’est que les moustaches disparaissent, relativement rapidement ; après vingt millisecondes, il n’y a plus grand-chose. Les oreilles sont toujours là, l’énergie est toujours là, il y a toujours un champ, mais ce n’est plus du champ quantique, ce n’est plus une superposition quantique, ce n’est plus qu’un mélange statistique. Si on dépouille ce film systématiquement, on est capable de mesurer un temps de décohérence, et on le trouve conforme, aux erreurs de mesure près, à la théorie. On est capable, vraiment, de préparer un chat à l’instant initial et de regarder comment il décohère de manière très quantitative.

Un participant. C’est une évolution assez compliquée, en fait.

Jean-Michel Raimond. C’est une évolution compliquée à cause du bruit sur la reconstruction d’état. L’évolution théorique est un amortissement exponentiel des franges, rapide, pendant qu’on a un amortissement exponentiel lent de leur séparation. C’est donc beaucoup plus calme que le film expérimental.



Décohérence et déphasage

- **Décohérence:** intrication quantique avec l'environnement
- **Déphasage:** action d'un bruit classique sur l'état du système (ex. champs parasites)
 - L'action du déphasage peut dépendre de la taille du système (ex: bruit de phase sur un état cohérent)
 - **Mais une différence essentielle**
 - **Le déphasage peut (en principe) être annulé** en mesurant la perturbation classique ou en la compensant
 - Ex: échos de spin
 - **La décohérence résulte d'une intrication et ne peut être inversée de manière simple**
 - Codes correcteurs d'erreur quantique. Complexité hérissée

Académie 2011 40

Voilà, j'ai à peu près terminé. Juste une chose. Il y a un peu de confusion dans la littérature entre décohérence et déphasage. Qu'est-ce que c'est que le déphasage ? C'est quelque chose qui est extrêmement important expérimentalement, à savoir l'action d'un bruit classique sur le système quantique qui brouille aussi la cohérence quantique. Par exemple, un bruit de phase dans un interféromètre, dû à un camion qui passe dans la rue. Cela peut ressembler beaucoup à de la décohérence et peut avoir la même dynamique. *Stricto sensu*, ce n'est cependant pas du tout la même chose. Au moins en principe, on peut défaire le déphasage. Si on était capable de mesurer l'origine de ce bruit, on pourrait, par un système de rétroaction, de filtrage et de correction, en annuler l'effet, alors que, la décohérence est vraiment une intrication entre un système mésoscopique et un environnement. On ne peut pas, à moins de savoir renverser le temps – mais hélas, on ne le sait pas –, défaire l'intrication. La décohérence n'est donc pas défaisable au sens où le déphasage le serait. Je crois que c'est une chose importante. Il faut faire bien attention à réserver le vocable « décohérence » à des situations où il y a réellement intrication.

Toutefois on peut malgré tout défaire la décohérence avec les codes correcteurs d'erreur quantique. Il s'agit d'un très joli résultat d'information quantique. On peut utiliser l'intrication pour combattre la décohérence, mais c'est d'une complexité hérissée et c'est expérimentalement monstrueux.

Pour conclure, je dirai qu'on arrive maintenant à mettre en évidence la décohérence. À mettre en évidence non pas le produit fini, qui est dans la sphère de la mécanique quantique, mais la dynamique de la décohérence de systèmes suffisamment gros pour qu'ils comportent deux échelles de temps bien séparées et suffisamment simples pour qu'on puisse un peu croire à la description quantique qu'on en fait. Cela nous montre que cette dynamique est effectivement redoutablement efficace et redoutablement rapide, ce qui va être un gros problème si on veut faire un ordinateur quantique.

On peut mieux comprendre la décohérence encore. On peut être capable, en mesurant expérimentalement la décohérence d'un objet mésoscopique, de faire ce que l'on appelle de la tomographie de processus quantiques, c'est-à-dire de remonter, à partir de signaux expérimentaux, aux équations qui les gouvernent et de les comparer à nos équations-modèles. On l'a déjà fait, de manière très précise, pour la décohérence de la distribution du nombre de photons. On constate, effectivement, que, par exemple, le réservoir absorbe les photons du système un par un et non deux par deux.

La décohérence, on peut mieux la comprendre, mais on peut aussi mieux la combattre, ce qui est intéressant. Est-ce qu'on peut, maintenant, isoler un système quantique de la décohérence ? Ce n'est peut-être pas intéressant philosophiquement mais c'est très intéressant pragmatiquement si on veut faire quelque chose avec la physique quantique d'un système mésoscopique. C'est très compliqué, on est en train d'essayer avec la rétroaction quantique où on prend de l'information sur le système et où on réagit sur lui pour essayer de combattre la décohérence.

Mais, en un mot, et si je voulais résumer toute cette abondance pléthorique de transparents en une phrase, je dirais que la décohérence, finalement, résulte d'une information « *which path* » qui est acquise par l'environnement quand il s'intrique avec le système. Finalement, il n'y a pas autre chose, dans la décohérence.

Décohérence, intrication et complémentarité

- Trois phénomènes intimement liés
 - La décohérence résulte d'une information « which path » acquise par l'environnement quand il s'intrique avec le système
 - Au cœur des trois:
 - La superposition quantique

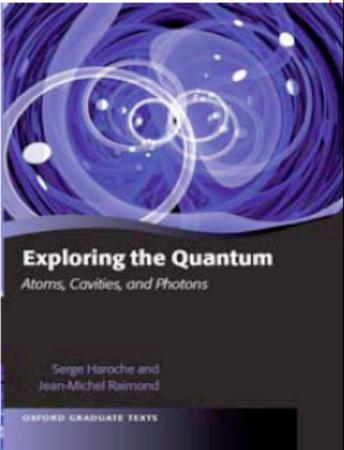
Décohérence
 Superposition
 Intrication Complémentarité

Académie 2011 42

Donc, finalement, il y a un joli triangle à faire entre décohérence, intrication et complémentarité. Une expérience de décohérence, c'est une expérience de complémentarité qui met en évidence l'intrication du système et de son environnement. Bien entendu, au milieu du triangle – on peut dessiner un triangle maçonnique avec l'oeil au milieu –, il y a la superposition quantique qui est au coeur de tout.

L'équipe

- S. Haroche, M. Brune, JM Raimond, S. Gleyzes
- **Electrodynamique en cavité**
 - I. Dotsenko
 - C. Sayrin, X. Zhou, B. Peaudecerf, T. Rybarczyk
- **Puce supraconductrice**
 - Sha Liu
 - R. Teixeira, C. Hermann
- **Collaborations:**
 - Cavités: P. Bosland, B. Visentin, E. Jacques
 - CEA Saclay (DAPNIA)
 - Feedback: P. Rouchon, M. Mirrahimi, A. Sarlette
 - Ecole des Mines Paris
- www.cqed.org
- €€:
 - EC (AQUITE, CCQED), ERC (DECLIC), ANR
 - CNRS, UMPC, IUF, CdF

Bon, voilà, je crois que j'ai terminé. En ce qui concerne les gens qui ont collaboré, ou qui sont actuellement dans le groupe, je dirai qu'il y a en premier lieu Serge Haroche et Michel Brune. Serge et Michel étaient là dans l'expérience de décohérence de 96. Les autres sont un peu trop jeunes pour y avoir participé. Il y a aussi ce bouquin qu'on a commis à Oxford, qui contient l'explication mathématique détaillée de tout cela, y compris le traitement propre de ce que sont les états pointeur.

(Applaudissements.)

DÉBAT

Bernard d'Espagnat. Nous vous remercions bien vivement pour ce passionnant exposé d'une expérience dont, manifestement, la portée est exceptionnelle.

Jean-Michel Raimond. Je suis flatté, Monsieur d'Espagnat, par votre appréciation de cette expérience mais je voudrais insister : ce n'est pas la seule. Il y a eu des expériences de Wineland sur les pièges à ions, et il y a, récemment, des expériences très belles de John Martinis, de UCLA, qui fait des expériences en quelque sorte complémentaires des nôtres, où il remplace les atomes par des circuits supraconducteurs et nos belles cavités 3D par des cavités intégrées sur un *chip*. Il est capable de préparer des super-chats de Schrödinger et de les regarder décohérer en

temps réel en reconstruisant la fonction de Wigner en temps réel. Il y a donc d'autres confirmations dans d'autres domaines que ce modèle spin-oscillateur, qui est un bon modèle pour regarder.

Bernard d'Espagnat. C'est bien quand même l'une des premières.

Jean-Michel Raimond. C'est la première.

Bernard d'Espagnat. C'est bien ce que je croyais savoir. Naturellement, le sujet va soulever beaucoup de questions, en particulier d'ordre philosophique comme celles que nous avons essayé de poser tout à l'heure. Toutefois votre expérience met aussi en jeu un procédé – une 'astuce' - de technique quantique qui éveille l'intérêt et la curiosité du théoricien. Je me suis longtemps posé la question : comment votre deuxième atome fait-il pour observer l'état du système tout en le laissant dans un état de superposition quantique ? A première vue cela surprend car on pense à toutes les expériences - plus simples ! – dans lesquelles la prise de connaissance du chemin adopté par une particule placée dans une superposition d'états détruit cette superposition ; et l'on tend à généraliser la chose et à penser que toute prise de connaissance d'un état de superposition détruit celui-ci. Le seul fait que votre expérience soit possible montre que cette généralisation est trop hâtive et en lisant des textes de vous je pense bien avoir compris comment vous vous y preniez pour éviter les montages trop simples où elle serait valable. Mais pourriez-vous, sans trop de détails techniques, nous éclairer tous quelque peu à cet égard ?

Jean-Michel Raimond. Autant l'expérience récente – comment reconstruire la fonction de Wigner – est techniquement difficile mais fournit la fonction de Wigner qui est visuelle, autant, pour cette expérience ancienne, c'est un peu subtil. Tout est dans cet interféromètre de Ramsey, dans lequel est plongée notre cavité. Donc que fait la première impulsion de micro-onde classique ? Elle transforme e en $e + g$ et g en $g + e$. Et que fait la seconde ? La même chose. Donc quand je détecte ici l'atome, en g par exemple, je n'ai aucun moyen de savoir s'il a traversé la cavité dans e ou dans g , parce qu'il peut arriver de g en venant de e ou en venant de g . C'est pour ça que, quand je détecte l'atome dans g , je projette le champ sur une superposition de ces deux états de phase. C'est très difficile à dire avec des mots. C'est tellement facile à écrire avec des kets mais j'avais peur de vous ennuyer avec des pages de ce type.

Que fait le second atome ? Le premier atome entre dans la cavité dans une superposition d'états. Il s'intrique avec les deux phases. Ensuite, on casse cette intrication de manière intelligente, de manière à ce que la superposition de ces deux phases reste dans la cavité. Que fait le deuxième atome si tout est cohérent ? Il fait exactement la même chose que le premier. Il entre dans la cavité dans une superposition d'états. Il est donc dans une superposition d'indices de réfraction. Vous voyez que ce qu'il fait c'est qu'il tourne de deux manières possibles les deux composantes de phase laissées par la premier atome. Donc, finalement on a un chat à quatre pattes dont deux se recouvrent.

Soit les deux atomes ont traversé la cavité dans le même état – quand je dis « soit », ça correspond à des termes dans une fonction d'onde compliquée de deux atomes et de la cavité –, et ils ont ajouté leurs effets. Donc j'ai une composante qui a tourné d'un angle de 2φ , si φ est la rotation produite par le niveau e . Ou ils étaient dans l'autre état, g , et les deux champs tournaient de -2φ .

Et puis il y a deux manières d'atteindre cet état final qui est à la même phase que l'état initial. Soit le premier atome a tourné vers le haut et le deuxième atome a tourné vers le bas, e

puis g , soit le premier atome a tourné vers le bas et le deuxième a tourné vers le haut, g puis e . On atteint le même état final du champ par deux chemins atomiques différents mais indistinguables puisque je ne sais pas dans quel état est l'atome quand il traverse la cavité. Je le détecte toujours dans un état mélangé. Donc il doit y avoir interférence quantique.

Le signal qu'on mesure est en fait une probabilité conditionnelle de détecter le deuxième atome dans e si le premier était dans e moins la probabilité de détecter le deuxième atome dans g si le premier atome était dans e . La différence de probabilités conditionnelles révèle cette interférence. On peut bien sûr écrire tout cela en quelques lignes de formalisme.

Bernard d'Espagnat. Nous n'en doutons pas mais ici je pense que nous nous contenterons du commentaire qualitatif que vous venez de nous donner, qui est déjà très éclairant. Cela dit, excusez-moi d'accaparer abusivement la parole et, qui plus est, pour une question encore une fois un peu technique. Mais philosophiquement elle me paraît importante. Jusqu'à maintenant, vous avez fait de telles expériences avec des photons. Or les photons sont des particules de masse nulle, et l'on sait que le champ électromagnétique quantique, du fait, justement que ses quanta sont de masse nulle, peut se représenter de beaucoup de manières différentes. Il y a, en particulier, ces états cohérents que vous utilisez, qui sont faciles à produire avec des particules de masse nulle, mais pas avec des particules de masse non nulle. Or, s'il y a un saut qualitatif bien net entre 'masse nulle' et 'masse non nulle' il n'y en a pas de bien clair entre 'mésoscopique' et 'macroscopique'. Par conséquent, ce serait bien intéressant si on pouvait refaire ce même type d'expérience avec des systèmes, certes encore mésoscopiques mais incorporant des particules de masse non nulle. Et, sans aller jusqu'à une réalisation pratique, il me semble que c'est une question intéressante qu'on peut se poser de savoir si, en droit, c'est possible. C'est-à-dire : si le mécanisme que vous venez de décrire pour des photons et qui permet à ce deuxième atome de tester l'état de cohérence de votre système sans le détruire, si ce mécanisme pourrait en principe – j'écarte les difficultés d'ordre pratique – être mis en oeuvre avec des particules de masse non nulle.

Jean-Michel Raimond. Je serai encore plus positif : non seulement la chose est faisable mais elle est en train d'être tentée. Il y a des premières évidences de signaux dans le domaine des atomes froids. On peut, à partir de condensats de Bose-Einstein et par des méthodes qui sont non-simples, envisager de préparer un petit ensemble d'atomes – petit car les temps de décohérence sont courts pour des raisons évidentes – dans une superposition macroscopique. Avec deux puits de potentiel, on peut préparer un ensemble de N atomes dans un état qu'on appelle un NOON state, par référence à un célèbre Western [High Noon]. Cet état décrit N atomes dans un puits et zéro dans l'autre, plus zéro dans l'un et N dans l'autre.

Olivier Darrigol. Ce sont des bosons. Pour des fermions c'est plus compliqué.

Jean-Michel Raimond. Oui, ce sont des bosons, des bosons matériels. Pour des fermions, c'est plus dur, sans être impossible, parce qu'on a beaucoup plus de mal à manipuler les fermions et à les refroidir convenablement.

Olivier Darrigol. Dans le cas concret d'un vrai chat, ou plus macroscopique en général, on n'a pas affaire à des superpositions d'états qui ont une relation mutuelle simple, alors que dans le cas que tu nous as présenté, ton chat mort-vivant, il y a une relation très simple pour passer

d'un état à l'état qu'on lui superpose. Peut-on envisager des superpositions plus complexes?

Jean-Michel Raimond. On peut le faire en principe, ce serait assez facile : on peut transformer notre chat de phase en chat d'amplitude, c'est-à-dire zéro plus vide plus un état cohérent, ou dans n'importe quelle superposition. On a même fait une proposition récente pour faire une superposition arbitraire d'états cohérents qui ne se recouvrent pas. On peut faire ainsi des choses plus compliquées, on l'envisage, des chats à huit pattes.

Omivier Darrigol. C'est plus dur à sonder.

Jean-Michel Raimond. Et on peut le sonder. Une manière simple de sonder est de défaire la préparation. La probabilité de la réussite de cette inversion du temps nous dit s'il y a eu de la décohérence dans l'intervalle. Ce n'est pas impossible de faire des chats de forme plus compliquée.

Il y a un autre type d'expérience qui, sans doute, va déboucher bientôt, en matière d'optomécanique quantique. L'idée est de coupler le mouvement de vibration d'un miroir à de la lumière qui arrive sur ce miroir et d'utiliser la force de pression de radiation pour exciter de manière quantique le mouvement de vibration d'un miroir. On en est au stade où des gens savent, en exploitant ce couplage entre lumière et position, pratiquement refroidir un oscillateur mécanique, qui est un oscillateur qui fait quelques microgrammes, avec une fréquence de vibration de l'ordre du mégahertz, dans son fondamental de vibration.

À partir du moment où on sait faire ça, faire un chat de Schrödinger en transposant nos techniques devient possible, ainsi qu'explorer la décohérence de l'état de vibration. Ce sera encore un état de vibration qui vit dans un plan de Fresnel, ce sera le même genre d'état, mais qui cette fois-ci ne portera plus sur l'oscillation d'un champ électromagnétique mais bien sur l'oscillation d'un petit objet matériel, macroscopique, ce qui ne veut pas dire que le bon paramètre de macroscopicité soit la masse de l'objet. Là encore, ce sera le nombre de photons dans l'état cohérent, ou plutôt de phonons. Il faut faire très attention, il y a eu beaucoup de confusion dans la littérature sur ce qu'est le paramètre de macroscopicité le plus pertinent

Juste un ordre de grandeur amusant. Un photon stocké dans notre cavité correspond bien entendu à un champ électrique à 51GHz, qui est de 1.5 millivolt par mètre, une valeur assez macroscopique pour le champ d'un seul photon! On peut, à partir de ce champ et du champ magnétique associé, calculer le courant total qui circule dans les miroirs (le courant de surface qui génère le champ réfléchi par le miroir tout en empêchant le champ incident d'entrer dans le supraconducteur). Ce courant est de l'ordre de 30 nanoampère. C'est une valeur très macroscopique, mais ça n'est pas cela le paramètre pertinent pour décrire à quel point le système est macroscopique. On peut faire un modèle détaillé, d'ailleurs, et on constate que les charges portant ce courant ne sont pas intriquées avec le champ de la cavité et donc ne contribuent pas à la décohérence. En un mot, elles ne font pas partie de l'environnement..

Olivier Darrigol. Parce que c'est supraconducteur.

Jean-Michel Raimond. D'une part, parce que c'est supraconducteur et, d'autre part, parce que le miroir est tellement macroscopique que ce courant ne représente rien pour lui. Il représente un déplacement des charges complètement ridicule, et l'amplitude d'oscillation des charges est dans leur disque d'incertitude de Heisenberg. Il faut faire très attention, quand on veut parler d'un chat, à ce qu'est le bon paramètre de macroscopicité. Je crois que la meilleure

manière de le définir est d'observer effectivement une décohérence, d'observer qu'on a une échelle de temps qui dépend de l'état qu'on prépare. L'échelle de temps de relaxation pour les états cohérents, c'est 0,13 seconde, pour le chat, c'est 0,017 ; deux échelles de temps bien séparées. Le rapport des deux nous dit à quel point le système est mésoscopique.

Michel Bitbol. Je me permets de revenir à la question philosophique qu'ont posée M. d'Espagnat et Hervé Zwirn, en la prenant sous un autre angle, peut-être pour essayer de raviver le dialogue.

Mon « autre angle » va consister simplement à comparer la théorie quantique à la théorie classique des probabilités. Vous savez que l'une des lois les plus importantes de la théorie classique des probabilités est la loi des grands nombres. Contrairement à ce qu'on pense souvent, cette loi ne dit pas que la fréquence d'un certain type d'événement tend uniformément et certainement vers la probabilité qui a été calculée *a priori* en se servant d'arguments de symétrie ou de minimisation de l'information manquante. Elle dit simplement que plus le nombre de tirages est grand, plus la *probabilité* que la fréquence s'approche de la probabilité calculée *a priori*, est forte. Elle évalue des probabilités, des probabilités pour que les fréquences mesurées convergent vers les probabilités évaluées, des probabilités pour que ces probabilités de second niveau soient corroborées par des fréquences de second niveau, et ainsi de suite jusqu'à l'infini. Autrement dit, la théorie des probabilités reste (comme on aurait dû s'y attendre) étroitement confinée dans le domaine des énoncés probabilistes. À aucun moment elle ne dit quelque chose sur ce qui *est* ou sur ce qui peut *être*, mais simplement sur la *probabilité* que quelque chose soit.

Jean-Michel Raimond. La théorie des probabilités s'applique *stricto sensu* à la mécanique quantique. Tout ce que je peux calculer, c'est la probabilité d'obtenir une fréquence d'apparition dans une séquence de l'expérience. La théorie des probabilités s'applique tout à fait.

Michel Bitbol. C'est exactement ce que je voulais dire. La théorie quantique est également une forme de théorie des probabilités ; une théorie qui inclut en elle la théorie classique des probabilités d'une manière assez particulière (en la généralisant). Dès lors, la plupart des enseignements que nous avons tirés au sujet du statut et des limites de la théorie classique des probabilités s'appliquent immédiatement à la théorie quantique. Reprenons l'exemple de la théorie de la décohérence, qui est une partie de la théorie quantique. De la même façon que la théorie classique des probabilités ne dit pas que la fréquence mesurée converge inévitablement et strictement vers la probabilité calculée, la théorie de la décohérence ne dit pas que les systèmes vont tendre inévitablement et strictement vers un comportement classique. Elle dit simplement que la *probabilité* de trouver un système qui, tout en interagissant avec l'environnement, présenterait une forte déviation par rapport au comportement classique, tend vers zéro.

Jean-Michel Raimond. Je suis d'accord avec vous, à cela près qu'il est clair que pour les systèmes quantiques, c'est vraiment une probabilité qui tend très rapidement, très exponentiellement vers zéro.

Michel Bitbol. Oui, mais ce que je voulais simplement souligner à travers cette comparaison, c'est que, de même que la théorie classique des probabilités ne sort pas du champ des énoncés probabilistes, ne dit rien sur ce qui *est*, mais simplement sur la *probabilité* que quelque chose soit, la théorie quantique ne sort pas non plus du champ des énoncés probabilistes,

et ne dit donc rien des propriétés que l'on suppose *être* celles des objets. Tout ce que fait la théorie quantique est d'énoncer les *probabilités* pour que quelque chose soit ou ne soit pas mesuré. Chaque proposition de la théorie quantique n'a de statut que probabiliste, aucune d'entre elles n'a de statut ontologique.

Hervé Zwirn. Je suis complètement d'accord avec ce que tu viens de dire. C'est toute la question de savoir quel est le statut des probabilités extrêmement faibles. Est-ce qu'une probabilité de 10^{-50} a un sens physique quelconque ? Est-ce qu'il faut considérer qu'en réalité elle est équivalente à une probabilité nulle ou est-ce qu'on doit la considérer comme différente ? Pour l'interprétation philosophique de la décohérence – car, encore une fois, on se situe ici sur le plan philosophique –, je pense que la position qu'on adopte dépend tout simplement de la position qu'on a par rapport à la question des probabilités très faibles. Dans le cas où on assimile des probabilités très faibles à zéro et, *for all practical purposes*, c'est ce qu'il faut faire, on peut considérer que la décohérence nous dit que le monde devient classique. En revanche, dans le cas où on considère qu'une probabilité extrêmement petite n'est pas pour autant réductible à zéro alors la décohérence ne suffit pas à rendre pas le monde classique.

Jean-Michel Raimond. Est-ce qu'on est gêné en physique statistique par des probabilités d'événements du genre « nous allons tous mourir dans les trois minutes qui viennent parce tout l'air de cette pièce va se condenser là-bas, dans ce coin-là, sous la forme d'un monticule de dix centimètres de côté » ? La probabilité est à peu près de l'ordre des probabilités qu'on évoque dans le monde quantique. Et ça ne nous gêne pas, philosophiquement, de faire de la physique statistique en dépit de ces probabilités.

Un participant. Dans ce genre de situation, qui consiste à mettre à zéro tout ce qui est très petit, la difficulté, pour moi, c'est où mettre le curseur, parce que le fait est que tu peux faire des expériences ou vivre des situations qui sont borderline où on peut encore voir le processus de décohérence, et puis arrive un moment... Mais à partir de quand tu peux mettre la borne ? C'est ça...

Jean-Michel Raimond. Aharonov a fait de nombreux papiers pour dire qu'on pouvait avoir des événements surprenants en mécanique quantique mais à condition que leur probabilité soit faible. Ce que je veux dire, c'est que, « philosophiquement » – avec les guillemets que vous pouvez mettre quand je dis « philosophiquement » –, je ne vois pas en quoi, sous ce rapport, le statut de la physique quantique est différent de celui de la physique statistique ordinaire, qui se débarrasse tout autant des événements improbables.

Hervé Zwirn. Mais elle ne s'en débarrasse pas réellement. Elle s'en débarrasse uniquement sur le plan pratique. On sait tous qu'il y a une probabilité non nulle que nous mourions dans trois minutes si tout l'air de la pièce se rassemble là, mais ça nous inquiète en fait assez peu.

Jean-Michel Raimond. Oui, il y a d'autres choses qui m'inquiètent plus.

Hervé Zwirn. Pour autant, même en physique statistique classique, on ne dit pas « c'est impossible ».

Jean-Michel Raimond. Oui, mais, ce que je veux dire, c'est que le débat philosophique que nous pouvons avoir semble finalement se réduire à la question « qu'est-ce qu'on fait avec les probabilités très faibles ? qu'est-ce qu'on fait avec les “infiniment petit” ? », et cette question me paraît se poser tout autant pour la physique statistique que pour la physique quantique, et à peu près dans les mêmes termes.

Bernard d'Espagnat. Il me semble qu'il y a un autre aspect de la question, qui est le suivant. Considérons le système et l'environnement. Il y a des observables communes au système et à l'environnement, des observables qui se réfèrent à la corrélation entre les grandeurs du système et les grandeurs de l'environnement. Si j'admets que le tout initialement était dans un cas pur (c'est-à-dire : je décris le système par un vecteur d'état et je décris l'environnement par un vecteur d'état, initialement le système composé est également, donc, dans un cas pur) il va le rester, ce qui fait qu'il va y avoir des observables communes au système et à l'environnement, dont les résultats de mesures, si elles étaient faites, seraient extrêmement différents, non pas voisins mais extrêmement différents, de ce qu'ils seraient si nous avions affaire non pas à un état pur mais à un mélange. Ces observables sont naturellement, dans le cas d'un système macroscopique, tout à fait inaccessibles pour nous mais, philosophiquement, on peut penser à un démon de Laplace qui, comme tout bon démon de Laplace, sait calculer infiniment vite et a des sens infiniment subtils, qui pourrait donc observer ces observables, et qui dirait « non, on n'a pas affaire à un système qui a telles propriétés. Le vrai c'est que le système vous *apparaît* comme ayant ces propriétés ». Reste, bien sûr, que raisonner de cette manière induit inévitablement une discussion assez subtile sur le thème : « quelles sont vraiment les capacités qu'on peut attribuer aux démons de Laplace ? »

Jean-Michel Raimond. Il y a des arguments dans un des bouquins d'Omnès – je ne sais plus lequel – qui considère, justement, cette question. Par des arguments semi-qualitatifs, qui valent ce qu'ils valent mais qui seraient sans doute modélisables, il trouve que ces démons de Laplace devraient avoir une énergie très supérieure à toute l'énergie totale de l'univers et avoir un temps de mesure très supérieur à des milliards de fois l'âge de l'univers pour être capable de résoudre la valeur de ces observables. Donc, je pense qu'il est peut-être philosophiquement possible de s'en passer.

Bernard d'Espagnat. Oui, mais, voyez-vous, notre univers est comme ça, mais il pourrait être autrement, c'est là une donnée contingente en ce sens qu'elle n'est pas 'law-like' mais 'fact-like'. Or si on veut définir ce qui est réel, la réalité, sous peine de cercle vicieux il ne faut pas partir d'aspects contingents de cette même réalité.

Jean-Michel Raimond. Cette fois-ci c'est dans *Gödel, Escher, Bach*, d'Hofstadter... il imagine qu'on mesure les équations du mouvement de toutes les particules de l'atmosphère et qu'en inversant on puisse entendre Bach jouer de l'orgue. C'est en principe possible, nonobstant les exposants de Lyapounov frénétiquement positifs qu'il y a derrière. C'est en principe possible ; pourtant, on vit très bien sans l'idée de le faire (hélas, dans un sens !). C'est aussi inaccessible que de désintriquer les variables l'environnement, il y a une dilution fantastique de l'information dans l'environnement.

Bernard d'Espagnat. Tout à fait, mais le raisonnement que j'essaie de faire semble nous montrer qu'on n'a pas le droit de tirer argument de ce que certaines grandeurs existantes sont *de*

facto non observables pour justifier l'idée que telles et telles propriétés sont réellement possédées par le système alors que la physique quantique nous apprend que cette idée serait insoutenable si les grandeurs en question étaient observables.

Jean-Michel Raimond. Je crois que l'on pourrait quand même mettre une limite pragmatique à ce genre de raisonnement, là encore pragmatique et *for all practical purposes*. Si l'extraction de cette information nécessite plus de ressources que n'en sont disponibles dans l'univers connu, ce n'est peut-être pas la peine d'en parler. Que ce soit l'extraction de Bach jouant de l'orgue ou l'extraction de ces observables extrêmement subtiles, par n'importe quelle intelligence, par n'importe quelle technologie fondée sur la mécanique quantique ou la physique statistique telles qu'on les connaît, ça nécessite sûrement plus de ressources que n'en sont disponibles dans l'univers. Si on mobilise toute l'énergie et tout l'âge de l'univers pour effectuer le calcul, on n'entendra toujours pas Bach jouer de l'orgue. Donc ça n'a pas de sens d'en parler. Si c'est faisable, c'est faisable par quelque chose qui est transcendant à l'univers et, là, je crois quand même qu'on entre violemment dans le domaine de la métaphysique. Oui, Dieu pourrait peut-être le faire, mais, ça, c'est une autre question.

Bernard d'Espagnat. Dans la philosophie matérialiste, disons, classique on ne s'embarrassait pas de considérations aussi subtiles, axées sur ce que l'on peut *faire*. On reconnaissait que, bien sûr, nous ne sommes pas capables de mesurer les grandeurs très très petites, très très délicates, etc., mais on considérait que ceci est un détail sans portée conceptuelle, qui reflète simplement nos incapacités humaines et qui évidemment n'a rien à voir avec la composition de l'univers, dont les grandeurs sont ce qu'elles sont, bien indépendamment de nous. Et l'on ajoutait que celles de ces grandeurs qui sont connues de nous ont vraiment les valeurs que nous leur voyons. Je considère que cette philosophie là n'est pas compatible avec la mécanique quantique standard même compte tenu de la décohérence. Mais il est clair qu'il s'agissait d'une conception logiquement indémontrable, autrement dit d'une métaphysique. Et je serais bien d'accord avec vous pour dire que dans l'exercice de son métier le scientifique ne doit se fier à aucune métaphysique.

Jean-Michel Raimond. Quand on construit un code cryptographique, le but, c'est qu'il ne soit décodable, non pas évidemment par des ennemis s'ils ont la même technologie que nous, mais par des ennemis qui auraient une technologie infiniment plus avancée ou même par des extraterrestres qui disposeraient de ressources infinies et de technologies qui sont simplement fondées sur la même physique que nous. Ceci dit, ces ressources ont une limite, qui est la taille de l'univers. Pour reconstituer Bach ou pour mesurer ces observables, il ne s'agit pas d'une augmentation linéaire de la résolution de mesure, il s'agit bien d'une augmentation exponentielle. Un espace de Hilbert, c'est grand, c'est résolument grand. Mon excellent collègue Peter Knight le dit très bien dans son anglais parfait : « The Hilbert space is huge, really huge. »

Reconstruire ces observables nécessite précisément de faire des mesures qui résolvent tout, tous les états de l'espace de Hilbert de l'environnement, et, ça, c'est exponentiellement difficile. Je crois vraiment qu'on peut assez facilement se passer de considérer ce genre de questions.

Jean Petitot. J'aimerais faire une remarque un peu plus mathématique et revenir à ce que tu disais tout à l'heure sur les idéalités mathématiques. On a l'impression, dans la discussion, qu'il

Il y a deux problèmes très différents qui convergent : d'une part, le problème des probabilités faibles, tu citais Borel, le problème des précisions infinies dans les systèmes hyperboliques, etc., qui renvoient en fait à la structure du continu – qu'est-ce qu'on admet dans la structure du continu numérique ? – et, d'autre part, le problème que posait M. d'Espagnat à propos du réalisme métaphysique. Mais le problème du réalisme métaphysique, me semble-t-il, est quand même très différent de celui de la structure ultime du continu.

On a utilisé plusieurs fois le terme d'infinitésimal. Alors, il faudrait peut-être quand même regarder ce que les mathématiciens ont dit sur la structure fine du continu, et justement sur la notion d'infinitésimal. Tout cela a été repris dans le cadre de ce qu'on appelle l'analyse non standard et j'aimerais donc faire une remarque à ce sujet. Il y a d'abord l'analyse non standard, qu'on appellerait classique, celle d'Abraham Robinson qui a repris Leibniz et qui a montré comment le calcul infinitésimal leibnizien pouvait être un calcul parfaitement cohérent. Pour cela il a dû utiliser les outils logiques.

Et puis ensuite, se sont développés des points de vue je pense beaucoup plus intéressants sur l'analyse non standard. D'abord, des points de vue intuitionnistes qui mettent en avant le fait que les mathématiques classiques sont idéales de façon extrêmement forte, précisément parce qu'elles sont classiques et non pas intuitionnistes, qu'elles introduisent donc énormément d'opérations qui sont concrètement impossibles à faire, et que, si on veut des mathématiques effectives, il faut utiliser la logique intuitionniste qui n'est pas du tout la logique classique.

Or le continu, vu dans une logique intuitionniste, devient très différent du continu classique à la Weierstrass, Cantor, Dedekind, etc., qu'on a appris à l'école. Le continu intuitionniste est soumis à des contraintes d'effectivité. Cela a été développé, par exemple, par la grande école de Strasbourg, de Georges Reeb et de Jacques Harthong. Ils ont été conduits à des points de vue qui, peut-être, se rapprochent de notre discussion, des points de vue finitistes sur le continu, non seulement des points de vue intuitionnistes mais des points de vue radicalement finitistes, à savoir que les nombres très grands fonctionnent, en droit, pas en fait – ce n'est pas un problème pragmatique, Monsieur d'Espagnat –, comme des infinis et que les nombres très petits fonctionnent, en droit, comme des infinitésimaux.

Il y a des éminents mathématiciens, le plus connu est peut-être Pierre Cartier, une grande personnalité de Bourbaki, qui, ces dernières années, ont développé des points de vue radicalement finitistes sur le continu, en relation avec ce que vous disiez à propos de la physique, à savoir que les nombres trop petits ou trop grands qui transcendent complètement les limites physiques n'ont absolument aucune signification, même mathématique, c'est-à-dire qu'on ne peut pas faire aller l'idéalité mathématique au-delà de ça. Il y a une espèce de phénomène d'horizon, et, si on essaie de dépasser cet horizon, en fait, on tombe dans des mathématiques tellement idéales qu'elles ne peuvent plus avoir de lien réel avec la physique. Il y a là quelque chose, je crois, d'assez intéressant.

Jean-Michel Raimond. La physique a deux longueurs de ce style qui sont la longueur de Planck – on sait très bien que la physique échoue à cette échelle parce qu'elle n'est pas auto-consistante entre la relativité générale et la mécanique quantique – et la taille de l'univers d'un autre côté – parce qu'on ne sait pas très bien ce qu'il y a au-delà.

Jean Petitot. Oui, mais c'est un point de vue de physicien, et je pourrais donc vous répondre, comme l'a fait M. d'Espagnat, que c'est un fait un peu contingent. Ce qui est intéressant, c'est que quand on regarde logiquement la structure du continu, on se retrouve dans des questions de droit. Et donc faire intervenir une approche finitiste du continu encore plus radicale que l'approche intuitionniste pourrait peut-être être intéressant pour notre discussion.

Hervé Zwirn. C'est peut-être intéressant mais je crois que ça n'est rien d'autre qu'une position de principe philosophique au départ. Les intuitionnistes partent d'un postulat de principe qui est différent de ceux qui n'acceptent pas la logique intuitionniste.

Jean Petitot. Oui mais c'est le problème de l'effectivité.

Hervé Zwirn. Mais on peut ne pas accepter l'effectivité. D'ailleurs, la plupart des mathématiciens ne l'ont pas acceptée. Donc je crois que tu as raison de mettre en avant cette chose-là parce que ça donne une analogie au débat que nous avons, mais ça ne résoudra pas...

Jean Petitot. Ce n'est pas un débat de dire que, en physique, on doit utiliser des théories effectives.

Hervé Zwirn. Non, quand je dis « débat », c'est qu'on peut être d'accord avec cette position de principe ou pas. Il y aura des écoles qui vont être d'accord avec cette position de principe et qui vont refuser le continu au sens plein du terme. C'est vrai qu'en physique en-dessous de la longueur de Planck, on peut dire qu'on ne sait pas ce qu'il y a. Peut-être l'espace-temps est-il discret. Une longueur de 10^{-100} mètres, ça n'a peut-être pas de sens, tout simplement. Aujourd'hui, personne n'en sait rien. En mathématiques, c'est pareil, on peut être intuitionniste en refusant même l'infini de N , ce n'est même pas l'infini continu, même le dénombrable pour les intuitionnistes est suspect. Tout ce qui est infini actuel et non potentiel est suspect. C'est un éclairage intéressant parce qu'il donne une sorte d'analogie au débat qu'on a là à propos de « *for all practical purposes* », mais je pense qu'on ne résoudra pas le problème, au sens où il existera toujours, même une fois qu'on l'aura posé de cette manière. C'est d'ailleurs une manière intéressante de le poser. Il y aura toujours des gens qui seront d'un côté et des gens qui seront de l'autre, parce que c'est une question qui est au-delà de la discussion, c'est une question de sentiment. Les gens qui refusent d'admettre que les positions consistant à exiger l'effectivité sont des positions restrictives parce qu'elles conduisent à une limitation des théorèmes mathématiques qu'on peut obtenir et à une abolition de tout un ensemble de choses qui comptent – y compris toute la théorie des ensembles moderne –, eh bien, ces gens ont un sentiment fort, qui provient d'eux-mêmes, à l'intérieur, mais ils ne peuvent pas le prouver. Les gens qui veulent absolument soutenir à l'inverse que cette position est ridicule parce qu'on a besoin d'aller beaucoup plus loin que ce que permet l'effectivité, et qui défendent notamment toute la théorie des ensembles moderne, ont une position qu'ils ne peuvent pas non plus prouver. On peut simplement argumenter mais de manière non décisive.

Je crois que, dans notre discussion liée à la physique, c'est la même chose. Je veux dire : il est vrai que, *for all practical purposes*, il est stupide ou complètement irréaliste de considérer des énergies qui dépassent très largement l'énergie de l'univers connu ou des temps qui seraient des milliards de fois supérieurs à l'âge de l'univers. Ça n'a pas de sens, *for all practical purposes*, et on peut se dire que dans ce cas, tout le reste de la discussion n'a pas de sens. Inversement, on

peut se dire qu'il y a des mondes (au sens de la théorie des mondes possibles de Lewis) dans lesquels il y a d'autres possibilités. Il ne s'agit ni de science-fiction ni de fantaisie, la sémantique des modes possibles est quelque chose de sérieux utilisé par les logiciens pour donner une interprétation à la logique modale. Dans ce cadre, on peut imaginer des mondes possibles qui soient totalement différents du nôtre. Dans l'un des mondes possibles de Lewis, il serait parfaitement envisageable que la mesure de ces observables dont on parlait tout à l'heure, qui, dans le nôtre, est complètement impossible, soit possible. Et, si on se place sur un plan philosophique et qu'on accepte ce cadre-là, alors il devient légitime de se dire : « soutenir que la décohérence aboutit à rendre le monde classique voudrait dire en logique modale "nécessairement la décohérence aboutit à l'état classique" ». Cela s'interprète dans la théorie des mondes possibles comme : « dans tout monde possible, la décohérence aboutit à un état classique ». , Or, cela est faux parce qu'il existe des mondes possibles qui ne sont pas le nôtre et dans lesquels la décohérence ne conduit pas à un état classique parce qu'on pourrait y effectuer des mesures permettant de départager l'état diagonalisé de l'état non diagonalisé. Bien sur, ce n'est plus de la physique, c'est de la philosophie pure.

Jean-Michel Raimond. C'est de la philosophie pure. Il est clair que ce monde possible aurait des lois physiques qui seraient probablement très différentes du nôtre. En ce sens, la mécanique quantique ou, plutôt, la physique de base serait très différente du nôtre et peut-être le problème de la décohérence ne se poserait-il même pas.

Hervé Zwirn. C'est une possibilité mais je parle d'un autre monde possible qui serait en tous points semblable au nôtre, mais qui ne différerait que par les ordres de grandeur qu'on aurait le droit de manipuler. Je sais bien que, si on veut donner un sens rigoureux à ça, c'est difficile car lorsqu'on cherche à manipuler la valeur des constantes physiques, on aboutit très vite à des conséquences qui rendent le monde en question très différent du nôtre. Là, évidemment, je ne suis pas capable de donner la description précise d'un monde dans lequel, toutes choses égales par ailleurs, la décohérence aboutirait à quelque chose de mesurable ou n'aboutirait pas à un état classique, y compris *for all practical purposes*. Mais, en philosophie, on peut se poser cette question et, encore une fois, personne ne pourra trancher. La question consiste à savoir si on s'autorise à s'interroger sur ce type de choses ou pas.

Jean-Michel Raimond. On peut imaginer dans ce cas-là des choses tellement vastes que la raison chancelle un peu. On est un peu dans la situation, qui est pourtant beaucoup plus modeste, des théoriciens des super-cordes, qui essaient désespérément de trier leurs 10^{253} vides différents. À combien en est-on ? Peut-être un peu moins. Ils ont peut-être réussi à en trouver 10^{15} ou 10^{20} . Ils ont trop de liberté dans leurs théories. Si on commence à imaginer des mondes qui n'obéiraient pas aux lois qui sont celles du nôtre, alors, là, je renonce... Ou je deviens un auteur de science-fiction, parce qu'on peut faire de très jolies choses en science-fiction sur ce genre d'univers parallèles.

Hervé Zwirn. Bien sûr, mais là, il ne s'agit pas d'autoriser n'importe quoi. C'est la différence très précise en logique modale entre ce qui est nécessaire et ce qui est possible. Dans l'interprétation sémantique de la logique modale, "est nécessaire" ce qui est vrai dans tout monde possible, "est possible", ce qui est vrai dans un monde possible. Bien évidemment, le but n'est pas d'autoriser n'importe quoi, sinon ça n'a plus d'intérêt.

Jean-Michel Raimond. Je crains qu'à la réflexion on constate que ce monde aurait finalement des propriétés tellement aberrantes qu'on serait en train de dire n'importe quoi. Qu'il ne pourrait en quoi que ce soit être un tantinet semblable au nôtre.

Bernard d'Espagnat. Il commence à être un petit peu tard, et le sujet est loin d'être épuisé. Nous y reviendrons dans notre prochaine séance.

FIN