

Jongler avec les atomes et les photons : la passion d'une vie de chercheur

(Serge Haroche mardi 28 février 2017 à l'Académie des Sciences)

En introduction, Serge Haroche explique qu'il a eu beaucoup de chance d'entrer, après ses études à l'ENS, dans le laboratoire Kastler Brossel. A cette époque apparaissait des sources de lumières extraordinaires que l'on pouvait domestiquer.

Au cours du demi-siècle (1950 – 2000) la recherche vit des révolutions successives qu'il classe par décennies :

- 1960 – 1970 : découverte du pompage optique par Kastler

C'est une méthode qui permet de manipuler les atomes à l'aide de lumière, de les mettre dans des situations particulières, inconnues dans la nature.

- 1970 – 1980 : révolution de la spectroscopie haute résolution

Les lasers sont de plus en plus sophistiqués, on peut contrôler et faire varier les fréquences ce qui permet d'obtenir des sources accordables de lumière provoquant une révolution en spectroscopie. Ce progrès se manifeste avec l'émergence des horloges atomiques (HA), stabilisées sur la fréquence de transition atomiques.

- 1980 – 2000 : les lasers deviennent puissants et fiables

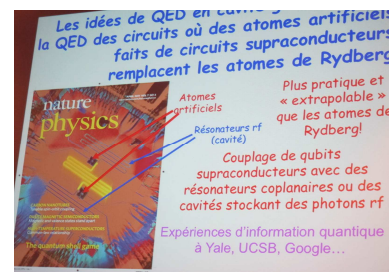
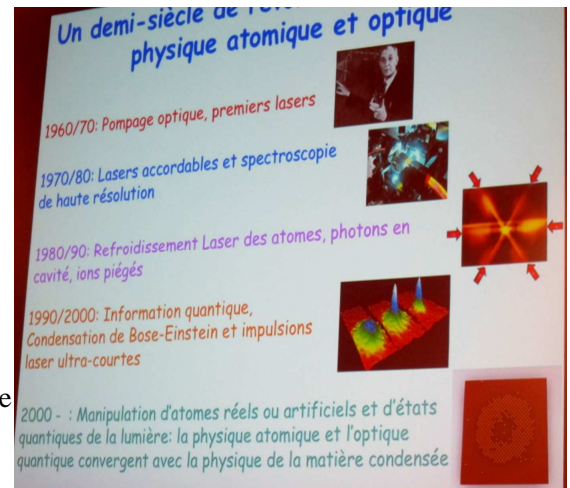
On peut manipuler les niveaux externes de l'atome, changer leur vitesse, les ralentir, les arrêter dans leur course et les piéger dans des gradients de champ lumineux pour les étudier un à un.

- 1990 – 2000 : arrivée de « l'information quantique »

On est capable de manipuler des atomes isolés, de stocker de l'information dans les atomes, de les coupler entre eux pour former des bits quantiques ou qbit. Avec ces qbits on effectue des opérations de logique qui sont différentes de celles que l'on trouve dans un ordinateur ordinaire. On profite des lois contre-intuitives de la MQ (superpositions d'états quantiques) pour fabriquer des portes logiques, à la fois ouvertes et fermées. On assiste au mariage entre la théorie de l'information et l'optique quantique, à présent appelé : information quantique. Le refroidissement des atomes conduit à une nouvelle phase de la matière que l'on appelle condensat de Bose-Einstein (prédit par A.E. en 1920). La matière ultra-froide a des propriétés quantiques tout à fait nouvelles. On parvient aussi à réaliser des impulsions laser extrêmement courtes.

- 2000 – 2015 : tous ces phénomènes explosent littéralement

Avec des structures composées de supraconducteurs à plusieurs dimensions on fabrique des atomes artificiels qui possèdent des niveaux quantiques et se comportent comme des atomes ordinaires mais qui sont beaucoup plus pratiques à manipuler. (C'est l'Electronique quantique des circuits ou Circuit QED).



Un autre aspect plus quantitatif : les ordres de grandeur des mesures

Dans plusieurs directions, au moins 10 ordres de grandeur ont été gagnés pendant ces cinquante ans soit un facteur 10 tous les 5 ans.

La précision sur les durées

Dans les années cinquante les meilleures précisions des durées sont obtenues avec des horloges à quartz, de l'ordre de 10^{-8} s ; Ce qui signifie que 2 horloges à quartz synchronisées ne dérivent pas, l'une par rapport à l'autre, de un 100 millionième de seconde (10^{-8}), soit 1 seconde sur quelques années. Avec les oscillations des transitions optiques (10^{15} Hz) dans les HA, on est capable de compter à une oscillation près, une seconde sur l'âge de l'Univers (10^{18} s). On est donc passé de 10^{-8} à 10^{-18} s.

La sensibilité des mesures

Dans les années 60 on travaillait sur 10 à 100 milliards d'atomes (quelques pico-grammes de matière 10^{-12} g) ; actuellement on peut contrôler, interroger, les atomes individuellement. On peut faire la même chose avec les grains de lumière dans les cavités. On a donc gagné une dizaine d'ordres de grandeur sur la sensibilité des mesures.

Les températures

Dans les années 60, on refroidissait la matière avec de l'azote liquide ou, mieux encore, avec de l'hélium liquide ce qui permettait d'obtenir des températures de l'ordre de quelques kelvins. A ces températures, le mouvement des atomes dans les échantillons brouille la mesure des fréquences des transitions atomique à cause des effets Doppler. Maintenant on sait réaliser des atomes froids à 10^{-10} K, presque immobiles. On est passé des vitesses de l'ordre du km/s à des vitesses de l'ordre du mm/s. Comme la température est liée au carré de la vitesse, gagner 10 à 12 ordres de grandeur sur la température fait gagner 6 ordres de grandeurs sur la vitesse. A ces faibles vitesses, les effets gravitationnels deviennent essentiels et l'on a toute sorte d'applications extrêmement intéressantes.

L'obtention de durées courtes

Dans les années 60 pour obtenir des durées courtes on utilisait des étincelles, des décharges très rapides. Avec les premiers lasers on atteint la nanoseconde (10^{-9} s). Actuellement on sait réaliser des impulsions laser dont la durée se mesure en atto-seconde (10^{-18} s). Avec ces durées très courtes on peut faire une sorte de stroboscopie de la matière à l'échelle de 10^{-18} s, ce qui permet d'observer des phénomènes ultra-rapides (des électrons dans les atomes ou les molécules) et de suivre l'évolution des réactions chimiques au fur et à mesure qu'elles se produisent.

On notera que, dans le cas de la seconde (ordre de grandeur perceptible à nos sens), en utilisant une échelle logarithmique, on est aussi proche de l'âge de l'Univers (10^{18} s) que des phénomènes les plus rapides que l'on est capable d'étudier.

Après ce long préambule Serge Haroche revient au cheminement qui l'a conduit aux expériences actuelles en termes d'électron ou de photon unique.

Cette partie concerne principalement l'aspect sensibilité des mesures. On va parler d'expériences dans lesquelles on contrôle les atomes isolés, **on va chercher à jongler avec** pour mettre en évidence des phénomènes physiques fondamentaux conduisant à des applications pratiques.

Avant cela je vais vous montrer ce que l'on arrive à faire en termes de manipulations d'atomes et de photons.

Première expérience

S.H. montre une photo sur laquelle on voit une série de points lumineux alignés. Cette structure à une dimension est constituée d'ions positifs qui se repoussent et sont maintenus par des forces électriques. Les distances entre ces ions sont de l'ordre du micromètre. On les voit comme des petits points brillants parce qu'ils diffusent la lumière d'un laser en résonance sur une transition électronique particulière. Cette lumière est captée par l'objectif d'un microscope. En fait il y a 30 particules et la longueur totale est celle du diamètre d'un cheveu. En changeant la fréquence du laser, on peut éteindre chacun de ses petits points brillants ; dès que le laser n'est plus résonant, ce point ne diffuse plus la lumière. Chaque particule évolue dans un sous-espace de 2 états qu'on représente, dans le jargon des physiciens, par le spin « up » ou « down ». Ces 2 états sont équivalents aux deux directions opposées d'un petit moment magnétique. On est capable de manipuler, de contrôler l'état de ces atomes ; de même on est capable de contrôler les interactions entre atomes à l'aide de faisceaux lasers (en utilisant l'effet Doppler cette fois-ci de façon positive). On peut étudier les superpositions d'états et les intrications quantiques.

Une autre expérience est réalisée à l'ENS Paris avec des photons.

Sur la projection apparaît un graphe en « marches d'escalier ». Ces marches représentent la décroissance d'un champ dans une cavité. Les photons disparaissent un à un simplement parce qu'ils sont absorbés par les parois de la cavité. C'est un phénomène quantique, les absorptions se produisent à des instants aléatoires ce qui fait que la durée de ces marches d'escalier varie d'une expérience à une autre. On voit l'instant où le champ saute quantitativement d'une marche à une autre. Cette fois-ci, il ne s'agit pas de spin, d'un système à deux états, mais d'une échelle harmonique de niveaux d'énergie équidistants. Chaque niveau correspond à un nombre de photons. On est donc capable d'étudier comment cette chaîne évolue et comment les photons apparaissent et disparaissent.

Un exemple un peu plus compliqué.

Il s'agit d'un réseau d'atomes à deux dimensions, ces atomes sont maintenus dans un réseau régulier par des forces optiques à l'aide de faisceaux lasers qui se croisent au niveau de l'échantillon. Ces faisceaux interfèrent entre eux en donnant des zones dans lesquelles l'intensité de la lumière est importante et, de façon périodique, des zones où il n'y a pas de lumière. Les atomes sont attirés aux nœuds de ce réseau par des forces d'origine optique. On fabrique ainsi des structures ordonnées qui rappellent ce que l'on trouve en physique du solide dans la structure d'un cristal. La différence essentielle c'est que la distance entre les atomes est ici de l'ordre du micron alors que dans un cristal elle est de l'ordre de l'angström (10^{-10} m) c'est à dire quatre ordre de grandeurs plus petit. Dans le système étudié, les forces qui maintiennent la cohésion du cristal sont beaucoup plus faibles puisque les atomes sont beaucoup plus loin les uns des autres que dans un cristal réel. Pour détruire un cristal réel, il suffit de quelques dizaines ou quelques centaines de degrés, alors qu'ici ces structures peuvent être préservées à des températures qui sont l'ordre du nanokelvin ou quelques dizaines de nanokelvins. C'est de la matière ultra-froide mais ordonnée et on peut contrôler, dans ces damiers ou ces échiquiers à atomes, les interactions entre les atomes, étudier ce qui se passe et simuler ainsi les phénomènes qui se produisent dans la nature à des échelles différentes avec des applications extrêmement intéressantes : la possibilité par exemple de synthétiser, en apprenant comment se comportent les atomes, des matériaux nouveaux qui peuvent avoir des propriétés exploitables pratiquement. Le prix Nobel de physique de 2012 a été décerné pour la mise au point de certaines méthodes qui sont utilisées pour manipuler et contrôler ces systèmes quantiques individuels. Comment les voir, comment changer leur état, comment les étudier « in vivo ». Bref étudier ces systèmes sans les détruire. J'ai partagé ce prix avec David Wineland, un américain qui travaille au Bureau des standards au Colorado. Les

expériences réalisées aux USA et celles de Paris sont en fait les deux aspects de la même réalité physique, les deux faces d'une même médaille.

Aux USA, les chercheurs manipulent des ions piégés dans des structures d'électrodes réalisant une configuration de champ qui les piège. Ils utilisent des photons produits par des lasers pour refroidir des atomes et les porter dans des états bien définis. Ils les détectent par l'effet de fluorescence qu'ils produisent.

A Paris on fait l'opposé, c'est-à-dire qu'au lieu de piéger des atomes, on piège la lumière des photons micro-ondes dans une cavité. On utilise des faisceaux d'atomes qui traversent la cavité un à un pour manipuler le champ et emporter de l'information.

Ce qu'il faut noter dans ces expériences c'est qu'elles ne sont pas destructives.

Voir des particules isolées, les étudier, c'est quelque chose que la physique sait faire depuis très longtemps. Les accélérateurs de particules au CERN permettent l'observation de phénomènes associés à des particules uniques. Lorsqu'on détecte un photon avec un photodétecteur, le clic du photodétecteur c'est la destruction d'un photon unique. Dans ces expériences on utilise des forces brutales qui détruisent les systèmes et on observe le résultat des collisions qui ont détruit les atomes ou des noyaux atomiques ou des électrons qui sont produit par des destructions de photons.

Ici les systèmes sont observés mais pas détruits.

Principe du pompage optique

Claude Cohen Tannoudji a découvert au cours de sa thèse dirigée par Kastler et Brossel le « light-shift » c'est-à-dire le fait que la lumière, quand elle est non résonante, et surtout quand elle est non résonante, déplace les niveaux d'énergie des atomes. Ces déplacements jouent un rôle central dans le refroidissement laser, dans le piégeage des atomes par laser, ce qui explique le prix Nobel de Claude en 1997.

Le pompage optique est la méthode mère de la population des systèmes. Je vais en parler un peu. Il s'agit d'éclairer un échantillon d'atomes dans une cellule avec de la lumière et de faire passer les propriétés de la lumière vers les atomes. C'est-à-dire faire passer le moment angulaire de la lumière – (le fait que la lumière transporte un moment angulaire lorsqu'elle est polarisée circulairement) sur le moment angulaire des atomes. La situation la plus simple est celle que j'ai décrite. L'état fondamental de l'atome que j'étudiais était le mercure qui possède deux sous-niveaux, un spin nucléaire (spin $+ \frac{1}{2}$ ou $- \frac{1}{2}$). On a donc deux niveaux à l'état fondamental et l'état excité atteint par excitation optique a également deux niveaux. Pour absorber un photon de la lumière polarisée circulairement, la seule transition possible pour l'atome est celle qui mène de l'état $- \frac{1}{2}$ à l'état $+ \frac{1}{2}$ car c'est la seule transition qui conserve le moment cinétique ; s'il est dans le niveau $+ \frac{1}{2}$ il ne peut pas absorber le photon. Donc ce qui va se passer c'est que l'atome va être porté dans le niveau excité $+ \frac{1}{2}$ et au bout d'un temps de quelques nanosecondes il va retomber. S'il retombe sur le même niveau, globalement il ne se sera rien passé. Par contre il peut retomber, avec une autre polarisation de la lumière, sur l'autre niveau (fondamental $+ \frac{1}{2}$, voir note à la fin du texte) et dès qu'il est tombé sur cet autre niveau il devient transparent pour la lumière, puisque la lumière ne peut être absorbée par l'atome dans un état $+ \frac{1}{2}$.

Note du transcripteur : La technique de pompage optique utilise le phénomène de résonance optique (absorption de lumière suivie de réémission) pour transférer aux atomes du moment cinétique. Dans ce but, la lumière incidente est polarisée circulairement. On peut ainsi concentrer les atomes d'une vapeur (atomes alcalins, mercure) dans des états Zeeman positif ou négatif du niveau fondamental. On réalise ainsi l'orientation atomique : le moment cinétique et le moment magnétique des atomes pointent dans une direction privilégiée. Cette orientation atomique peut être détruite soit par le processus de relaxation aux parois, soit par la résonance magnétique. Applications : mesure des moments magnétiques des atomes et des noyaux.

Après quelques cycles d'absorption et de fluorescence tous les atomes sont pompés dans l'état fondamental $+ \frac{1}{2}$ et donc les moments magnétiques, qui sont complètement désorientés au départ dans la cellule s'orientent sous l'effet de la lumière. C'est ce que l'on appelle le pompage optique : on sort les atomes de l'équilibre. Il y a différentes variantes de cette expérience. La lumière sert à orienter, mais elle sert également à détecter. Vous voyez que lorsque la source a été pompée, elle n'absorbe plus la lumière et donc, au fur et à mesure que le pompage progresse, la lumière transmise, qui mesure le degré de polarisation atomique, augmente. La lumière sert à la fois à manipuler les atomes et à détecter cette manipulation. La méthode est tout à fait générale dans les expériences de refroidissement atomique. La lumière sert à la fois à refroidir et la fluorescence à détecter les atomes refroidis.

Ma thèse

Elle a consisté à pomper les atomes puis à les perturber à l'aide de bobines qui produisent un champ de radiofréquence qui venait perturber les moments magnétiques qui étaient orientés par le pompage ; on utilisait les propriétés de la lumière pour voir ce qui se passait.

« Formalisme de l'atome habillé »

On décrit le système d'atomes qui interagissent avec des photons de haute fréquence comme un système global. C'est globalement que l'on étudiait les niveaux d'énergie. L'image obtenue nous a permis de décrire de façon unifiée les phénomènes et même d'en prévoir d'autres. Il y avait des effets quantiques mais certains de ces effets étaient voilés du fait qu'ils concernaient de grands ensembles. En particulier on ne pouvait pas avoir des sauts quantiques avec ce genre de système. A cette époque j'avais déjà l'idée de travailler sur des systèmes plus petits. Mais pour cela il fallait remplacer les lampes classiques par des lasers.

Après ma thèse je suis parti dans un labo aux USA auprès des grands maîtres de la spectroscopie laser : Arthur Schawlow et John Hall (tous deux prix Nobel).

S.H. explique son stage aux USA en 1972 – 1973 dans le labo d'un spécialiste des lasers à colorant accordables.

Étude avec des « atomes de Rydberg » circulaires

Dans ces atomes, l'électron est porté sur une orbite très excitée, il est donc très loin du noyau et du cœur formé par les autres électrons. La taille de ces atomes est gigantesque, elle peut-être des centaines ou des milliers de fois plus grande que pour un atome ordinaire c'est-à-dire atteindre des dimensions biologiques (celles des virus). Ces atomes sont difficiles à conserver au laboratoire car ils sont très fragiles, il faut des conditions de protection spéciales, difficile à réaliser, pour les protéger des perturbations.

Ces atomes furent d'abord observés en radioastronomie à l'aide d'antennes. On observe des raies dans les transitions des atomes d'hydrogène, d'hélium ou de carbone. Ce sont des ions qui ont capturé un électron et l'électron en retombant d'un niveau de Rydberg au niveau voisin émet des transitions dans le domaine des ondes millimétriques et micro-ondes. Ces observations renseignent les radioastronomes sur la densité dans l'espace interstellaire de ces constituants d'atomes primordiaux, en particulier dans la constellation d'Orion.

Serge Haroche essaya de produire ces atomes au laboratoire, la difficulté était de les faire survivre suffisamment longtemps. La fragilité de ses systèmes implique qu'ils sont très sensibles aux perturbations ; ils peuvent ainsi servir de sonde pour mesurer de tous petits effets. Il utilisa principalement des atomes de Rydberg circulaires : l'orbite la plus élevée avant ionisation de l'atome

est circulaire, une sorte de bouée qui représente l'équivalent de l'orbite que Bohr avait initialement décrite dans première théorie sur l'atome d'hydrogène.

Comment exciter ces atomes avec des lasers ?

La technique nécessite de faire des transitions de fréquences très petites qui tombent dans le domaine des ondes millimétriques ou radio. Dans l'orbite circulaire l'onde « tourne » autour du noyau avec une longueur d'onde qui est simplement la longueur d'onde de De Broglie de l'électron. La condition de quantification qui définit la position exacte des niveaux d'énergie c'est qu'il faut qu'il y ait un nombre entier de longueur d'onde de De Broglie dans l'orbite circulaire. Du coup on revient à la mécanique quasi-classique.

On peut décrire ces atomes circulaires par de la physique classique ; néanmoins ces atomes ont des propriétés quantiques extrêmement marquées. Alors qu'est-ce que l'on peut faire avec ces atomes géants ? La première idée est d'utiliser des puissances **extrêmement faibles**, car ils sont d'une extrême sensibilité, afin de détecter les photons individuels. La deuxième idée : comment faire pour non seulement détecter les photons mais pouvoir les observer sans les détruire. C'est-à-dire être capable de les observer « in vivo ».

Les « chats de Schrödinger »

On peut manipuler les champs quantiques et préparer des champs contenant quelques photons dans des états étranges, contre-intuitifs, que l'on appelle les « chats de Schrödinger ». Pour cela il est nécessaire d'isoler parfaitement le dispositif de l'extérieur. En pratique on travaille dans une cavité permettant de contenir les photons pendant des temps très longs ; d'où le développement de la mécanique quantique en cavité.

Les cavités utilisées

Elles sont constituées de deux miroirs sphériques, des blocs en cuivre polis avec une extrême précision. Ces blocs sont recouverts par une mince couche de Niobium supraconducteur qui permet d'éviter des pertes dans les miroirs. Un atome circulaire interagit avec un ou quelques photons dans cette boîte. En fait c'est une situation extrêmement simple sur le plan conceptuel, l'atome a deux niveaux concernés par la transition résonante ou quasi résonante. La cavité c'est une échelle harmonique d'états à 0, 1, 2, 3 ... photons. C'est le système le plus simple que l'on peut imaginer en physique quantique.

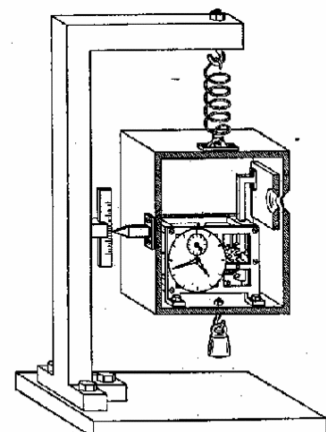
La qualité des miroirs

La lumière peut rebondir plus d'un milliard de fois sur ces miroirs avant de se perdre. Cela permet de garder les photons pendant un temps de l'ordre du 1/10 de seconde. Les photons parcourent 40 000 km entre ces deux miroirs (à peu près le périmètre de la Terre !). Ils restent piégés pendant un temps très long, temps suffisant pour qu'une succession d'atomes traversent un à un la cavité, se couplent à son champ, et emportent de l'information et après on détruit les atomes.

En fait c'est une situation très proche d'une expérience de pensée : la boîte à photons d'Einstein et Bohr en 1927.

Expérience de pensée d'Einstein et Bohr en 1927

Ils imaginaient une boîte à photons avec des parois réfléchissantes dans lesquelles les photons seraient piégés. Une horloge à l'intérieur déclencherait un dispositif qui ouvrirait un obturateur permettant aux photons de s'échapper en un temps très bref. Il s'agissait de compter le nombre de photons présents avant et après l'ouverture de



l'obturateur. Pour cela ils imaginaient un système ingénieux qui consistait à peser la boîte dans le champ de gravitation terrestre et à compter les photons par le poids de la boîte à l'aide de la relation $E = mc^2$.

Dans notre système on compte bien les photons, mais à l'aide d'atomes qui sont pris dans un dispositif qui est une Horloge Atomique. Le dispositif est une combinaison d'une boîte et d'une horloge.

Comment détecter ces atomes de Rydberg

L'électron de Rydberg est piégé dans le potentiel coulombien en $1/r$ du noyau de l'atome. Cet atome est dans un état ou dans l'autre (0 ou 1) au sens de la théorie de l'information. Il y a deux lignes horizontales qui sont les niveaux d'énergie e et g concernés par la transition. On applique un petit champ électrique dont le potentiel varie linéairement dans l'espace. Quand on ajoute le potentiel coulombien au potentiel du champ électrique, on abaisse la barrière de potentiel d'un côté. ce qui fait que l'électron dans le niveau supérieur s'échappe plus facilement que dans le niveau inférieur.

On applique une rampe de champ qui augmente avec le temps. On constate que l'on a deux composantes de courant électrique correspondant au niveau supérieur et au niveau inférieur de la transition, donc une information binaire. Un bit d'information **par atome détecté**.

On peut faire l'expérience avec un atome et recommencer un grand nombre de fois, ou alors on envoie des atomes successifs dans l'expérience pour recueillir davantage d'informations sur le champ dans la cavité.

Deux exemples d'expérience

Première expérience : mettre en évidence des superpositions d'états entre l'atome et le champ, une intrication atome-champ.

Supposons que l'atome entre dans la cavité dans l'état excité et que la cavité est vide.

Pour noter que c'est un état quantique, on l'écrit entre une barre et un crochet, c'est la notation de Dirac ici $|e,0\rangle$ État excité sans photon.

Qu'est-ce qui va se passer ?

Si la cavité est résonante au bout d'un certain temps l'atome va tomber dans l'état du bas $|g,1\rangle$ Et un photon va partir dans la cavité. On va passer de $|e,0\rangle$ à $|g,1\rangle$. Si la cavité est très bonne et que le photon reste dedans assez longtemps l'atome va revenir à l'état $|e,0\rangle$; il revient dans sa situation initiale. On a une situation réversible - le système oscille entre les deux états- qui s'effectue à la fréquence de Ramsey.

Lorsque l'on est ni dans l'état $|e,0\rangle$ ni dans l'état $|g,1\rangle$, cette oscillation conduit à des états intermédiaires car l'on est dans une superposition de deux états à la fois e et g avec des poids qui dépendent du temps, ce que l'on appelle des amplitudes de probabilité dont le carré représente la probabilité de trouver le système en e ou en g . Le champ est dans l'état 0 ou 1. Les superpositions d'états sont essentielles pour comprendre ce qui se passe au niveau microscopique quand l'atome réagit avec un photon.

Si maintenant l'atome sort de la cavité lorsque l'on est à mi-chemin entre 0 et g on a une situation d'intrication. On a, à la fois, l'atome dans l'état g avec un photon et l'atome seul dans l'état e sans photon. Attention ce n'est pas ou mais ET ; Les deux situations se produisent en même temps et le système est à la fois dans les deux états.

On peut alors avoir des effets d'interférence qui sont liés à la présence de ces deux états.

Le phénomène d'intrication

Deux systèmes qui ont interagi restent liés l'un à l'autre par un lien immatériel que l'on appelle intrication quantique. Lorsque l'on fait une mesure sur un système un effet immédiat se produit sur l'autre même à très grande distance.

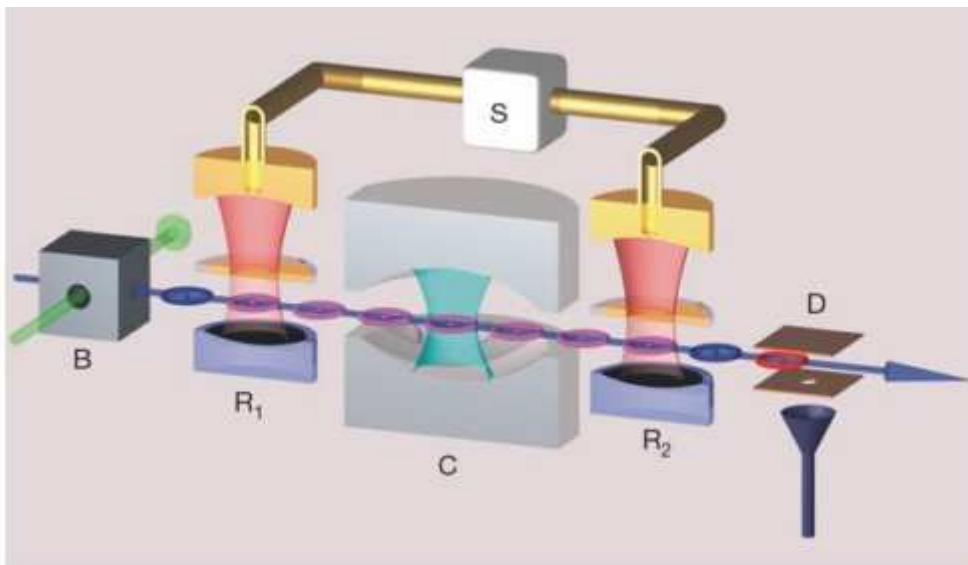
Deuxième expérience : détection non destructible de la lumière

Dans l'effet photoélectrique, un photon arrive sur un atome et il éjecte un électron, le photon est détruit, annihilé et il est détecté en mesurant le courant associé à l'électron éjecté. En fait c'est ce qui se passe dans la vision ordinaire. Chaque photon qui rentre dans notre œil est détruit sur la rétine et cette destruction conduit à un signal vers le cerveau qui constitue la vision. Toute la vision se fait par destruction de milliards de photons.

Ce n'est pas le cas en physique quantique. Dans ce cas il est possible d'imprimer l'information sur l'atome sans détruire le photon, pour cela il faut une action moins violente entre le faisceau et l'atome : c'est une méthode non destructive.

Le dispositif utilisé

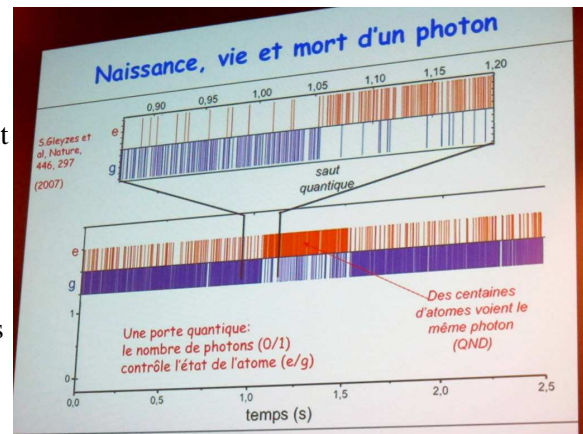
A gauche, on prépare des atomes de Rydberg circulaires un à un à l'aide d'une impulsion lumineuse. Ces atomes traversent (au centre) une cavité qui contient des photons que l'on veut mesurer. **Cette cavité n'est pas résonante**, sinon les photons seraient absorbés, mais elle déplace les niveaux d'énergie atomiques et finalement on détecte, de façon binaire, les atomes en les ionisant. Donc, il faut faire d'abord une expérience de spectro dans laquelle on cherche à déterminer quelle est la fréquence de résonance des atomes. Mais on ne peut pas irradier les atomes dans la cavité ; cette cavité est pratiquement fermée, elle contient le champ que l'on veut mesurer sans l'absorber. En fait on agit avant et après la cavité. On soumet les atomes à des impulsions micro-ondes, en amont et en aval, dans les zones R_1 et R_2 .



On balaye la fréquence dans ces zones R_1 et R_2 , et lorsque l'on mesure la probabilité de trouver finalement l'atome dans l'un des niveaux ou dans l'autre on observe un système de franges appelé franges de Ramsay. C'est un phénomène d'interférence quantique qui est lié au fait que la transition entre les deux niveaux de l'atome a pu s'effectuer soit dans la première zone soit dans la seconde et qu'une amplitude est associée à chacune de ses possibilités. Ces amplitudes INTERFERENT. Les franges sont différentes suivant qu'il y a zéro ou un photon dans la cavité. Si vous avez zéro photon vous obtenez un réseau de franges. Si vous avez un photon vous obtenez des franges décalées à cause du déplacement « light shift » et donc si maintenant vous révéléz la fréquence de votre appareil pour être au sommet d'une frange brillante, s'il y a un photon, vous serez dans le creux des franges. En mesurant l'atome vous saurez tout de suite, avec ce seul atome, s'il y a 0 ou 1 photon dans la cavité. Un bit d'information est suffisant pour distinguer 0 ou 1. On ne fait rien dans la cavité, on profite du fait qu'à la très basse température à laquelle on travaille, il y a de temps en temps un photon thermique

(donné par la loi de Planck, qui apparaît et disparaît dans la cavité et ensuite on envoie les atomes un par un. Ils traversent les deux zones R1 et R2 et à la fin on pose la question est-ce que l'atome est dans l'état e ou g et on observe le signal que vous voyez sur la diapositive (ci-dessous).

Vous voyez en fonction du temps ce qui se passe jusqu'à un certain temps. Les atomes sont dans le niveau g (en bleu), il y a un peu de bruit ; il y a quelques atomes qui sont dans l'état e mais on voit tout de suite qu'il y a une transition brutale qui se produit à un instant donné : un saut quantique. Un photon arrive dans la cavité, ce photon survit pendant un certain temps et puis il disparaît. C'est une méthode non destructive puisque des centaines d'atomes voient le même photon. Alors qu'avec une méthode destructive le premier atome l'aurait détruit. J'insiste sur le fait qu'il s'agit d'une porte quantique. Un premier système quantique qui est un nombre de photon (0 ou 1) qui contrôle l'état de l'atome (e ou g) d'une façon qui conduit à l'intrication. Ce système a toutes les caractéristiques d'une porte. On peut ainsi faire des portes entre atomes. Le premier atome met un photon dans la cavité et ce photon sert de contrôle pour le deuxième atome et ainsi de suite avec les atomes successifs qui traversent la cavité les uns derrière les autres. On compte des photons comme on compte des billes dans une boîte.



Aspect ondulatoire

Est-ce que l'on peut faire des expériences qui font apparaître l'aspect ondulatoire du champ ? Dans ce cas il faut mesurer non pas le nombre de photons mais un autre paramètre : la phase du champ électromagnétique. Si on mesure cette phase, on peut effectivement faire apparaître l'aspect ondulatoire du champ et réaliser une expérience de pensée de type chat de Schrödinger. Le fait qu'avec le même dispositif expérimental on puisse faire à la fois les deux expériences complémentaires illustre ce que Bohr appelait le « principe de complémentarité ». Un système de particules se comporte soit comme un système de particules si on cherche à compter les photons, soit comme une onde si on s'intéresse à la phase et non pas à l'amplitude du champ.

Principe du chat de Schrödinger

Dans la boîte il y a le chat et un seul atome qui se trouve dans l'état excité e ou dans l'état de base g . L'atome évolue comme un système quantique, dans une superposition de deux états. S'il est dans l'état excité rien ne se passe. S'il est dans l'état du bas il déclenche un dispositif qui va conduire à la mort du chat. Si vous admettez que l'atome est à la fois dans l'état du haut et dans l'état du bas, le chat doit être à la fois mort et vivant ; plus que cela, il doit y avoir une intrication entre l'état de l'atome et l'état du chat. En fait il s'agissait d'une plaisanterie de Schrödinger qui voulait démontrer qu'il y a une barrière entre le monde microscopique et le monde macroscopique.

Le problème de la décohérence

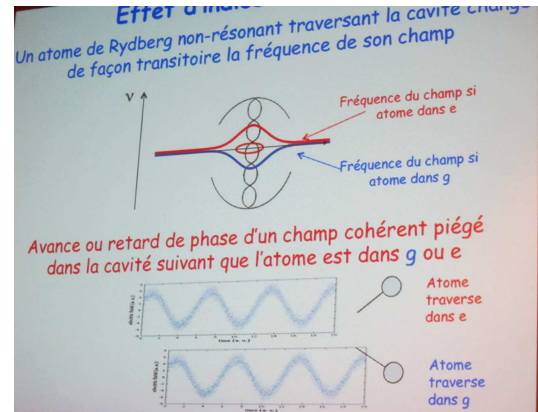
Si on applique uniquement les lois de la physique quantique et si l'on couple un gros système à un petit, le caractère quantique du petit va automatiquement être transféré sur le gros. Cela illustre la question de la limite classique/quantique. Il s'agit de comprendre pourquoi on n'observe jamais la même chose sur les gros systèmes, c'est le problème de la décohérence.

Quelle a été notre version de l'expérience ?

Nous avons exploité ce que l'on appelle « l'effet d'indice à un seul atome »

Dans la cavité vous avez une onde stationnaire du champ qui peut contenir un petit champ classique ; un champ classique c'est un champ dans lequel le nombre de photons n'est pas bien défini mais qui a une phase bien définie.

Un atome traverse la cavité, s'il est dans le niveau g , il va déplacer la fréquence du champ pendant le temps où il passe dans la cavité, d'une petite quantité vers le bas : la fréquence diminue. S'il traverse la cavité en étant dans l'autre niveau (e), il va augmenter la fréquence du champ. Et donc le champ va prendre une avance ou un retard de phase pendant le temps que l'atome traverse la cavité. Cette avance ou ce retard de phase va avoir un signe différent suivant que l'atome est dans initialement l'état g ou e . Si l'atome traverse la cavité dans un niveau, il va avoir une phase ; s'il le traverse dans l'autre niveau il y aura une autre phase.



On sait, au moins depuis Fresnel, que l'on peut représenter une oscillation sinusoïdale par un vecteur (dans un espace abstrait) dont la direction représente la phase du champ. Sur le schéma vous voyez les deux champs représentés dans un espace abstrait par deux flèches se dirigeant l'une vers le haut l'autre vers le bas.

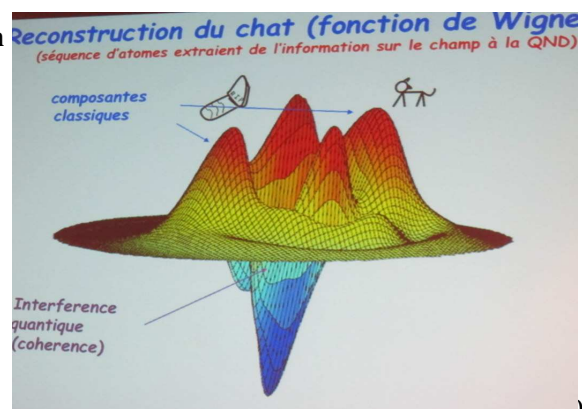
La situation quantique est telle que si l'atome traverse avec une superposition des deux états le **champ va avoir à la fois les deux phases.**

On commence par préparer un petit champ cohérent dans la cavité puis on envoie un atome. L'atome est porté dans une superposition d'états par une première impulsion avant d'entrer dans la cavité. Il traverse la cavité et il pousse la phase du champ dans les deux directions à la fois. Vous voyez qu'à cet instant on a une situation type chat de Schrödinger. On a un atome qui est intriqué avec un champ qui peut contenir beaucoup de photons. Actuellement on sait faire des expériences où il y a des centaines de photons qui sont, à la fois, portés dans un champ qui porte une phase ET l'autre.

Si à cet instant-là vous mesurez l'état de l'atome, vous allez forcer le champ à choisir une des deux phases. L'astuce consiste à faire traverser l'atome dans la deuxième zone R_2 dans laquelle on remélange les deux états. Ce qui fait que lorsqu'on mesure l'atome à la fin, le champ est projeté dans une superposition des deux phases. Mais il faut aussi être capable de mesurer le champ, par des expériences que je n'ai pas le temps de décrire.

On envoie ensuite une séquence d'atomes qui extrait l'information sur le champ par une méthode de tomographie. C'est-à-dire que l'on déplace le champ en injectant des champs cohérents d'amplitudes diverses. On mesure la distribution des photons de ses champs déplacés et finalement on obtient une fonction dans l'espace abstrait que l'on appelle fonction de Wigner qui représente toute l'information que l'on a sur le champ quantique ainsi constitué.

Sur le schéma vous voyez qu'il y a deux pics gaussiens qui représentent le chat vivant et le chat mort- si vous imaginez que c'est un chat- et entre les deux des franges d'interférences qui représentent la cohérence quantique. Le fait que l'on n'a pas pris un « chat vivant ou mort » mais une superposition



cohérente des deux champs. On peut mesurer ce genre de système et on peut même faire un film de la décohérence en prenant des images successives de cette fonction linéaire. On voit qu'au cours du temps, très rapidement, les franges d'interférences disparaissent, cela veut dire que le chat est vivant ou mort.

Vous allez me poser la question pourquoi voit-on deux pics ? S'il est vivant ou mort on ne devrait voir que l'un ou l'autre ? En fait ce sont des expériences qui sont faites en répétant un grand nombre de fois la situation et on ne peut accéder qu'à un ensemble statistique de résultats de mesures. Cette expérience montre simplement que dans 50 % des cas le chat est vivant et que dans 50 % des cas le chat est mort.

A quoi peut servir ce genre d'expérience ?

Les expériences du genre « chat de Schrödinger » sont extrêmement fragiles. Les franges d'interférences disparaissent très vite, c'est le revers de la médaille car, comme je vous le disais tout à l'heure, fragilité implique sensibilité. Et donc ces « chats de Schrödinger » peuvent permettre de mesurer des choses avec une précision très grande, c'est ce qu'on appelle la métrologie quantique. Nous avons fait une expérience du même genre non pas sur le « chat de Schrödinger » du champ mais avec des « chats de Schrödinger » de l'atome.

Un atome de Rydberg de grand moment angulaire possède un très grand nombre d'états. On peut donc façonner le système dans une superposition d'états intéressants. En fait, on peut considérer qu'un atome de Rydberg est représenté par un grand moment angulaire que l'on peut à l'aide de tests micro-ondes faire pointer dans une direction arbitraire de l'espace ou même dans deux directions simultanées.

Une autre représentation, linéaire cette fois-ci, dans un atome de Rydberg montre le moment angulaire qui pointe soit dans une direction soit dans l'autre avec des franges d'interférences très fines entre les deux. Ces franges sont extrêmement sensibles au champ électrique. En fait c'est comme si on avait une aiguille de mesure qui pointait dans deux directions à la fois et qui mesure de deux façons différentes la même quantité, avec une interférence quantique qui augmente considérablement la précision avec laquelle on est capable de mesurer cette quantité. Vous voyez ici le système de franges, qui rappelle les franges de tout à l'heure, qui sont décalées très légèrement par une petite variation du champ électrique.

En fait, avec ce dispositif on pourrait mesurer le champ d'un seul électron à une distance de l'ordre d'une fraction de millimètre. En un temps aussi court qu'une microseconde. On pourrait appliquer ces systèmes comme des électromètres ultra-sensibles pour des expériences de physique mésoscopiques. Par exemple le champ d'électron dans un piège, sur un fil de carbone par exemple.

Pour conclure

J'ai parlé de l'ordinateur quantique. Il serait dans un état d'un « chat de Schrödinger » mais gigantesque. On aurait un système qui fonctionnerait avec des millions de bits quantiques dans des superpositions d'états très complexes, suivant plusieurs chemins de calcul en parallèle mais évidemment l'obstacle principal c'est la décohérence.

Les études actuelles essayent de contrôler des systèmes de plus en plus grands pour savoir si on pourra un jour arriver à des dispositifs intéressants. Je doute fort que les ordinateurs quantiques soient possibles. Par contre les expériences de simulation quantique dont je vous ai parlé tout à l'heure, qui consistent à imiter ce qui se passe dans la physique des solides, elles, sont extrêmement prometteuses. Néanmoins je voudrais conclure en disant que j'étais plus pessimiste que certains puisque les idées d'électrodynamique en cavité sont généralisées actuellement à l'électrodynamique des circuits où on remplace les atomes de Rydberg réels par des atomes artificiels qui sont constitués de petits circuits

supraconducteurs, qui sont couplés entre eux dans des conditions qui sont très voisines de celles précédemment décrites.

Transcription et compte rendu de Christian larcher, les titres des paragraphes sont de mon initiative.