

PHYSIQUE QUANTIQUE



Pr Serge Haroche

Vie et mort d'un photon : une autre manière de voir

Le photon, grain élémentaire de lumière, particule omniprésente et véhicule universel de l'information n'est en général observable que lorsqu'il disparaît. Ainsi la rétine absorbe la lumière et la transforme en un courant électrique qui stimule le nerf optique. Un phénomène analogue se produit sur la surface sensible des photodétecteurs usuels. L'information portée par les photons est détruite au fur et à mesure qu'elle est enregistrée. On peut voir un objet macroscopique aussi souvent qu'on le veut, mais ce sont à chaque fois de nouveaux photons qui véhiculent son image vers l'œil.

Mourir en délivrant un message n'est cependant pas une fatalité. La théorie quantique qui décrit la nature au niveau microscopique postule qu'il est possible de compter les photons sans les absorber, en réalisant une détection non destructive (dite quantum non-demolition ou QND en anglais). Des mesures QND d'intensité lumineuse ont été réalisées sur des faisceaux laser contenant de grands nombres de photons, mais il n'avait jamais été possible à ce jour d'atteindre une sensibilité suffisante pour observer de façon non destructive et répétitive des grains uniques de lumière.

En exploitant une méthode QND dont nous avons posé le principe dès 1990, nous avons pu récemment observer des centaines de fois un photon piégé dans une boîte. Après un intervalle de temps perceptible qui peut atteindre une demi-seconde, le grain de lumière finit par disparaître, de façon imprévisible et soudaine. Nous avons suivi ainsi en direct l'histoire de la vie et de la mort de photons individuels. Cette expérience, dont nous venons de publier les résultats dans *Nature*⁽¹⁾, a nécessité de réunir deux conditions non réalisables à l'époque de notre proposition initiale, qui ont demandé de nombreuses années d'efforts et de développements progressifs. Il a fallu piéger du rayonnement dans une boîte pendant un temps de l'ordre d'un dixième de seconde pour avoir le loisir de l'observer à plusieurs reprises. Nous avons dû par ailleurs développer un nouveau type de détecteur atomique capable d'enregistrer l'empreinte d'un seul photon sans en absorber l'énergie.



© D.R.

La boîte à photon

L'une des clés de cette expérience est une boîte à photons micro-onde⁽²⁾ (longueur d'onde 6 mm), une cavité formée de deux miroirs se faisant face à 2,7 cm de distance, entre lesquels le photon rebondit plus d'un milliard de fois avant de s'annihiler (voir photo). Une telle réflectivité, des milliers de fois plus grande que celle des meilleurs miroirs optiques, requiert des parois supraconductrices, refroidies à une température inférieure à un degré absolu, dont la surface est polie à quelques nanomètres près. Dans cette cavité, un photon parcourt en moyenne entre les miroirs un trajet égal à la circonférence terrestre avant de disparaître. L'apparition d'un photon dans la boîte est due au rayonnement de ses parois. Leurs atomes, même à une température très basse, sont soumis à une agitation thermique résiduelle qui provoque de temps en temps l'émission d'un quantum de lumière. Les lois de ce rayonnement du corps noir ont été découvertes par Planck et Einstein au début du siècle dernier, marquant le véritable point de départ de la révolution quantique.

La longévité de nos photons n'a, en soi, rien d'exceptionnel. En liberté dans le vide, un photon est éternel. La lumière qui nous provient des confins de l'Univers après avoir voyagé des milliards d'années en témoigne. La difficulté est de conserver longtemps un photon piégé. Il faut alors le faire interagir avec un milieu matériel, les parois réfléchissantes de nos miroirs, ou encore le milieu transparent d'une fibre optique. Dans ces conditions, le photon, facilement absorbé, se révèle très fragile. Les photons captifs de notre boîte supraconductrice établissent un record de longévité pour de la lumière piégée dans un volume dont la dimension est petite à l'échelle d'un laboratoire.

Pour observer nos photons, nous envoyons un à un à travers la cavité des atomes de rubidium préparés dans un état très excité, appelé état de Rydberg. Un des électrons atomiques est porté par excitation laser sur une orbite de très grande dimension, de rayon plus de mille fois plus grand que celui des orbites électroniques de l'atome dans son état fondamental. Cet atome excité se comporte comme une antenne très sensible au

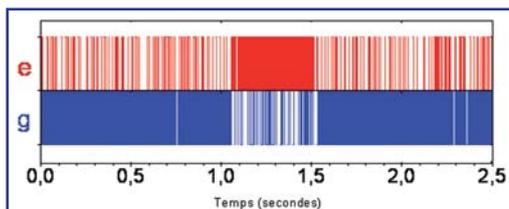


fig. 1 : Naissance et mort d'un photon observées par les variations soudaines au cours du temps du signal atomique: les barres verticales représentent un atome détecté dans e (trait rouge) ou dans g (trait bleu). Dans cette figure de format réduit par rapport à la publication originale les barres sont séparées par une distance inférieure à leur épaisseur, donnant l'impression d'un signal continu, bleu pour le vide et rouge pour un photon. Les barres rouges sur fond bleu et bleues sous fond rouge sont dues à des erreurs de mesure.

(Reproduction avec la permission de Macmillan Publishers Ltd : *Nature*, S.Gleyzes et al, 2007.)

rayonnement micro-onde. Une méthode élémentaire de photodétection consiste à utiliser l'absorption résonnante de lumière portant l'atome du niveau de Rydberg initial (que nous appelons g) vers un autre niveau e encore plus excité. En mesurant l'énergie finale de l'atome on voit ainsi le photon, mais il est absorbé, donc détruit. Une nouvelle mesure nous dit alors, avec certitude, que la cavité est vide.

Pour réaliser une mesure QND, le photon doit laisser sur l'atome une empreinte plus subtile. Pour cela, nous rendons différentes les fréquences du photon et celle de la transition atomique entre les états e et g . En ajustant la distance des miroirs, nous désaccordons légèrement le photon et l'atome. La conservation de l'énergie interdit alors à l'atome d'absorber la lumière. En revanche, un photon modifie légèrement la fréquence de la transition atomique. Cet effet de déplacement lumineux est bien connu en physique atomique, lorsqu'il est induit par des champs intenses. Dans la situation qui nous intéresse ici, le champ d'un photon unique déplace d'une quantité détectable la fréquence de rotation de l'électron de Rydberg autour du noyau atomique.

Ce déplacement est mesuré par une méthode de spectroscopie atomique très sensible, à l'aide de champs micro-onde auxiliaires. On applique à l'atome deux impulsions, l'une avant qu'il traverse la cavité, l'autre après qu'il en est sorti. Ces impulsions sont réglées en fréquence et en durée pour faire passer l'atome de g à e si sa fréquence a été déplacée par un photon. Si par contre la cavité est vide, les impulsions ne peuvent induire la transition et l'atome reste dans l'état g . L'énergie absorbée par l'atome dans le premier cas est empruntée au champ auxiliaire et non à celui de la cavité : le photon est encore là après avoir été vu, prêt à être remesuré avec un autre atome.

Cette méthode d'impulsions séparées dans le temps, inventée par le physicien Norman Ramsey, est utilisée dans toutes les horloges atomiques. La transition entre deux états d'un atome de césium ou de rubidium induite par une double impulsion

engendre un signal permettant d'asservir la micro-onde à la fréquence atomique et de réaliser un étalon de fréquence très précis. Dans notre expérience, chaque atome de Rydberg est comme une petite horloge dont le battement est légèrement retardé par le champ d'un photon. La perturbation subie par cette horloge est mesurée par le signal atomique (atome détecté dans g ou e suivant qu'il y a eu ou non retard induit par un photon).

Sur la figure 1, on voit une séquence de deux secondes et demie pendant laquelle 2500 atomes sont détectés soit dans e (barre rouge) soit dans g (barre bleue). Pendant la première seconde, les atomes, majoritairement détectés en g , signalent que la cavité est vide (quelques atomes trouvés dans e sont dus aux imperfections de la méthode de mesure). Soudainement, la situation s'inverse avec une détection majoritaire des atomes en e . Un photon du rayonnement thermique est apparu entre les miroirs. Dans cette séquence particulière, il y reste presque une demi-seconde, plus de trois fois le temps de vie moyen des photons dans la cavité, avant de disparaître aussi brusquement qu'il était venu, laissant finalement la cavité vide. L'apparition ou la disparition soudaines de la lumière sont des phénomènes de sauts quantiques aléatoires, survenant à des instants imprévisibles, dont seules les probabilités sont calculables. En détectant ces sauts pendant plusieurs heures, nous avons directement vérifié toutes les propriétés statistiques du rayonnement thermique.

Au-delà de l'illustration d'un processus quantique fondamental, cette nouvelle manière non-destructive de voir ouvre des perspectives fascinantes. Pour la première fois, une information portée par un photon peut être partagée par un grand nombre d'atomes interagissant un à un avec lui. Il est possible de réaliser une situation où la cavité est dans une superposition de deux états, à la fois vide et contenant un photon. Il suffira d'y faire passer un premier atome résonnant, en réglant le temps d'interaction pour que la probabilité qu'il émette soit de 50%. Les atomes traversant ensuite la cavité seront désaccordés pour réaliser la mesure QND. Ils se trouveront alors finalement dans une superposition où ils seront à la fois tous dans e et tous dans g , leur état manifestant une ambiguïté quantique analogue à celle du fameux chat de Schrödinger qui, sous l'effet de l'interaction avec un atome unique, se retrouve à la fois vivant et mort. L'étude de ces états nous permettra d'avancer dans notre compréhension de la frontière floue qui sépare les mondes quantique et classique. ■

Références :

1. S. Gleyzes, S. Kuhr, C. Guerlin, J. Bernu, S. Deléglise, U. Busk Hoff, M. Brune, J.-M. Raimond and S. Haroche, « Quantum Jumps of light recording the birth and death of a photon in a cavity », *Nature*, **446**, 297 (2007).
2. S. Kuhr, S. Gleyzes, C. Guerlin, J. Bernu, U. Busk Hoff, S. Deléglise, S. Osnaghi, M. Brune, J.-M. Raimond, S. Haroche, E. Jacques, P. Bosland et B. Visentin, « Ultrahigh finesse Fabry-Pérot superconducting resonator », *Applied Physics Letters*, **90**, 164101 (2007).