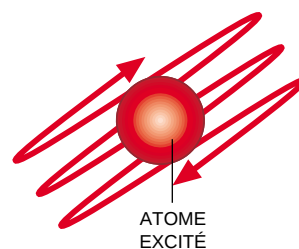




4. LES OSCILLATIONS DE RABI, découvertes par le physicien américain Isidor Rabi (à gauche) vers 1930, induisent les émissions de photons dans le laser à un seul atome. Un atome isolé qui a été excité revient à son état fondamental en émettant spontanément un photon dans une direction quelconque (a). Dans une cavité dont la taille est un multiple de la longueur d'onde de ce photon, un atome excité émet un photon plus rapidement et en direction des miroirs qui délimitent la cavité (b). Ce phénomène est nommé oscillation due aux fluctuations électromagnétiques du vide. Quand un photon a été ainsi émis, un autre atome excité qui entre alors dans la cavité subit des oscillations de Rabi. Il émet un photon identique au photon déjà présent, dans la même direction que celui-ci, mais plus rapidement (c).

a
ÉMISSION SPONTANÉE



Lors des premiers tests du système, nous ne parvenions pas à maintenir la taille de la cavité à une valeur accordée à la fréquence des photons émis par les atomes, quand ils reviennent à leur état d'énergie inférieur : quand les miroirs bougeaient, la résonance était perdue, les oscillations de Rabi n'avaient plus lieu et les atomes situés dans la cavité n'émettaient pas de photons. Pour conserver la résonance, nous avons eu l'idée d'ajuster automatiquement la distance entre les deux miroirs à l'aide d'un transducteur piézo-électrique (un cristal qui transforme une tension électrique en une force mécanique) activé par le faisceau du laser : une diminution d'intensité commande un déplacement d'un miroir, ce qui corrige les variations de taille de la cavité, à un dixième de nanomètre près.

Le choix du laser

Quels atomes faire passer dans le résonateur ? Nous savions qu'ils devraient avoir deux niveaux d'énergie appropriés et une faible probabilité d'émission spontanée, car cette émission perturberait l'interaction des atomes et de la cavité. Nous avons choisi d'utiliser des atomes de baryum, qui émettent des photons de longueur d'onde égale à 791 nanomètres lorsqu'ils passent de leur état excité à leur état fondamental.

Nous préparons ces atomes en évaporant du baryum métallique dans un four et en canalisant la vapeur produite dans l'espace situé entre les miroirs. Le four produit un faisceau étroit d'atomes de baryum qui se déplacent à la vitesse moyenne de 360 mètres par seconde. En raison de la petite taille du résonateur et du

faible débit d'atomes, il n'y a jamais plus d'un atome de baryum à la fois à l'intérieur du résonateur.

Juste avant d'entrer dans la cavité, les atomes de baryum traversent un faisceau de lumière émis par un laser classique ; ce faisceau excite les atomes dans leur état d'énergie supérieure. Dans le vide, sans interaction, ces atomes se désexciteraient en trois milliardièmes de seconde, en émettant un photon de longueur d'onde égale à 791 nanomètres, mais la cavité, précisément accordée sur cette longueur d'onde, stimule quelques atomes de baryum et provoque leur émission durant les 200 milliardièmes de seconde qu'ils séjournent entre les miroirs.

Lorsque le premier atome pénètre dans le résonateur vide, une oscillation due aux fluctuations électromagnétiques du vide se produit dans un quart des cas : l'atome émet alors un photon. Une fois ce premier photon émis, le champ électromagnétique créé dans le résonateur interagit avec le deuxième atome, quand il pénètre ensuite dans la cavité : la probabilité que cet atome émette un photon devient égale à 43 pour cent. Plus les photons sont nombreux dans la cavité, plus la probabilité d'émission des atomes augmente. Tous ces photons ont la même direction et la même phase, toutes deux définies par la géométrie de la cavité. Au total, la cavité libère un faible faisceau laser perpendiculaire à la trajectoire des atomes.

Le résonateur est si efficace que les photons restent dans la cavité pendant un millionième de seconde : c'est considérable à l'échelle atomique. Nous estimons le nombre de photons stockés en mesurant la quantité de lumière laser transmise par les miroirs de la cavité (nous utilisons un détecteur

capable de compter 40 pour cent des photons qui l'atteignent).

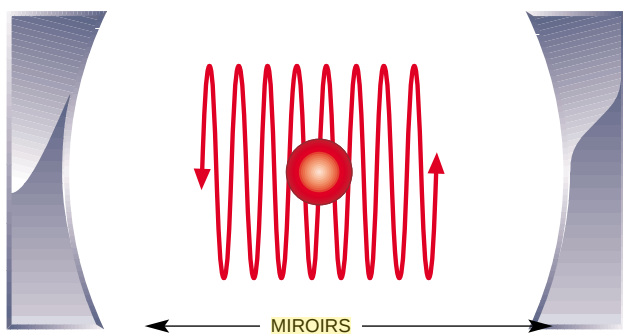
Dans notre expérience, les photons s'accumulent jusqu'à ce que les pertes par absorption et par transmission, à travers les miroirs, soient égales aux émissions par les atomes de baryum. Nous faisons varier le débit d'atomes en modifiant la température du four où le baryum est évaporé.

Lorsque le nombre moyen d'atomes dans la cavité est égal à 0,1, c'est-à-dire lorsque la cavité est occupée par un atome de baryum pendant 10 pour cent du temps, les photons s'accumulent peu dans la cavité : la plupart des photons émis quittent la cavité avant qu'un nouvel atome de baryum y pénètre. En revanche, quand nous portons le nombre moyen d'atomes dans la cavité à 0,4, l'émission lumineuse est de un million de photons par seconde, ce qui maintient en permanence un photon dans le résonateur ; or, nous l'avons vu, la présence d'un photon dans la cavité augmente la probabilité d'émission d'un photon supplémentaire. Lorsque nous portons le nombre moyen d'atomes à 0,7, la puissance du laser est multipliée par sept.

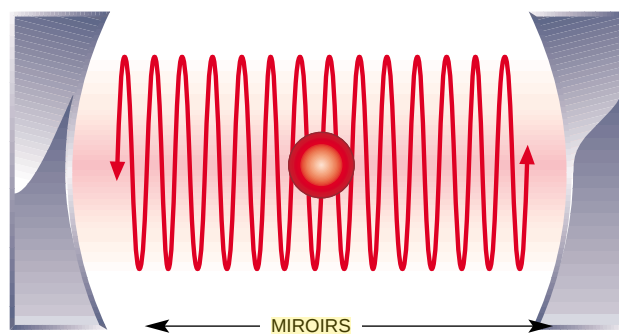
Les lasers du futur

En théorie, le laser à un seul atome est remarquablement efficace : quand les photons se sont accumulés dans le résonateur, la probabilité que les atomes de baryum émettent un autre photon pourrait théoriquement atteindre 100 pour cent. Dans notre prototype, cette probabilité atteint 50 pour cent : la moitié de l'énergie absorbée par les atomes de baryum est transformée en lumière laser (les lasers classiques ont une efficacité comprise entre 1 et 30 pour cent seulement).

b
OSCILLATION DUE AU VIDE



c
OSCILLATION DE RABI



Toutefois notre laser nous intéresse surtout parce qu'il permet l'étude des interactions de la matière et de la lumière. La création du faisceau laser résulte d'un phénomène quantique à partir duquel les physiciens testent les prévisions de la mécanique quantique. Notre premier laser à un atome convenait mal, pour de telles expériences, parce que les interactions atomiques dans le résonateur n'étaient pas uniformes : le champ électromagnétique dans la cavité formait une onde stationnaire entre les miroirs, avec une amplitude qui augmentait et diminuait de façon sinusoïdale comme les vibrations d'une corde de guitare. De ce fait, les interactions des atomes et de la cavité dépendaient du trajet suivi par les atomes : ceux qui passaient dans les régions de forte amplitude émettaient plus de photons que ceux qui passaient dans les régions de faible amplitude, et qui interagissaient peu avec le champ électromagnétique.

Nous avons résolu ce problème en inclinant le faisceau d'atomes par rapport à l'axe de la cavité. De ce fait, la vitesse relative des photons qui proviennent des deux miroirs est différente ; nous réglons la cavité de sorte qu'une seule des ondes soit accordée. Les atomes traversent alors tous des régions de même amplitude, et ils ont la même probabilité d'émission.

Dans notre premier laser à un atome, les atomes de baryum éjectés par le four n'avaient pas tous la même vitesse. Or ceux qui traversaient rapidement la cavité interagissaient moins avec le champ électromagnétique, de sorte que la probabilité d'émission de photons était inférieure. Nous avons donc modifié le système d'excitation des atomes de baryum : avec deux lasers classiques, nous parve-

nons à ne placer dans l'état d'énergie supérieur que les atomes de vitesse déterminée.

Nous cherchons maintenant à analyser le spectre d'émission du laser à un seul atome. Les premières expériences ont montré comment un atome placé dans une cavité résonante interagit avec la lumière issue d'un laser classique. Lorsque la cavité est vide, l'intensité de lumière qui la traverse augmente brusquement quand la fréquence du laser est voisine de la fréquence de résonance de la cavité. Autrement dit, la «courbe d'accord» de la cavité comporte un pic unique. En revanche, quand un atome est dans la cavité, l'intensité de la lumière du laser croît brusquement, à deux fréquences respectivement inférieure et supérieure à la fréquence de résonance. La courbe d'accord de la cavité possède alors deux modes.

Le spectre d'émission du laser à un seul atome est également une courbe à deux pics lorsque le débit d'atomes est faible et que tous les photons ont quitté le résonateur avant qu'un autre atome ne rentre. Lorsque le débit d'atomes est notable et que les photons emplissent en permanence le résonateur, le spectre d'émission évolue vers la courbe à un seul pic caractéristique du laser. Pourquoi cette évolution ? La théorie reste à faire.

Nous avons aussi prévu d'utiliser ce dispositif pour étudier les «états piégés», un phénomène quantique qui se produit quand un atome pénètre dans la cavité et subit une ou plusieurs oscillations de Rabi. Lors d'une oscillation complète, l'atome émet un photon dans la cavité, puis absorbe un photon provenant du champ et quitte le résonateur dans un état excité. Le nombre de photons n'augmente pas, car les atomes entrent et sortent de la

cavité dans le même état. Dans nos premières expériences, nous n'avons pas observé d'oscillations complètes, parce que les atomes de baryum se déplaçaient trop rapidement : ils n'effectuaient qu'un sixième d'oscillation dans la cavité. Nous ne pourrions étudier les états piégés que si nous ralentissons les atomes.

Ces études présentent aussi un autre avantage, pratique celui-là : la faible incertitude sur l'amplitude du champ des états piégés permettra peut-être d'utiliser le laser à un seul atome fonctionnant dans ce mode pour des traitements de l'information précis ou pour la spectroscopie de précision. Et si l'on parvient à construire des lasers à un atome sur des matériaux semiconducteurs, on pourra les intégrer dans des ordinateurs optiques, beaucoup plus rapides que les ordinateurs actuels.

Michael S. FELD est professeur de physique à l'Institut de technologie du Massachusetts et directeur du Centre de spectroscopie George Harrison. Kyungwom AN est professeur de l'Institut coréen des sciences et des techniques de Taejon.

Serge HAROCHE et Daniel KLEPPNER, *Cavity Quantum Electrodynamics*, in *Physics Today*, Vol. 42, n° 1, pp. 24-30, janvier 1989.

G. RAITHEL et al., *The micromaser : A Proving Ground for Quantum Physics*, in *Cavity Quantum Electrodynamics*, sous la direction de Paul R. Berman, Academic Press, 1994.

Kyungwom AN, Ramachandra R. Dasari Michael S. FELD, *The Microlaser : A Fundamental Quantum Generator of light*, in *Atomic and Quantum Optics : High-Precision Measurements*, SPIE Proceedings Series, Vol. 2799, pp. 14-21, 1996.