

vient d'émettre, puis réémettre rapidement un photon, qu'il réabsorbe, et ainsi de suite. De telles oscillations sont dites « induites par les fluctuations électromagnétiques du vide », car elles ont lieu quand la cavité ne contient initialement pas de champ électromagnétique. Si la cavité contient un ou plusieurs photons avant que l'atome excité y pénètre, ce dernier subira en outre des oscillations de Rabi, de sorte qu'il émettra et absorbera des photons à un rythme encore supérieur.

Cet effet a été observé en laboratoire en 1984, à l'Institut Max Planck de Garching : Herbert Walther l'utilisa pour construire un « micromaser ». Dans cet appareil, des atomes de Rydberg (des atomes fortement excités, où les électrons sont très éloignés du noyau) pénètrent un à un dans une cavité métallique aux parois fortement réfléchissantes (on utilise des matériaux supraconducteurs, pour les pertes à la réflexion sont très faibles). Comme dans un laser, la cavité a des dimensions déterminées par la longueur d'onde des photons micro-ondes émis par les atomes de Rydberg lorsqu'ils se désexcitent. H. Walther observa que les atomes émettent bien plus rapidement des photons que dans le vide, conformément à la théorie de E. Jaynes et de F. Cummings. En outre, les photons s'accumulent dans le résonateur si l'on augmente la réflectivité des parois.

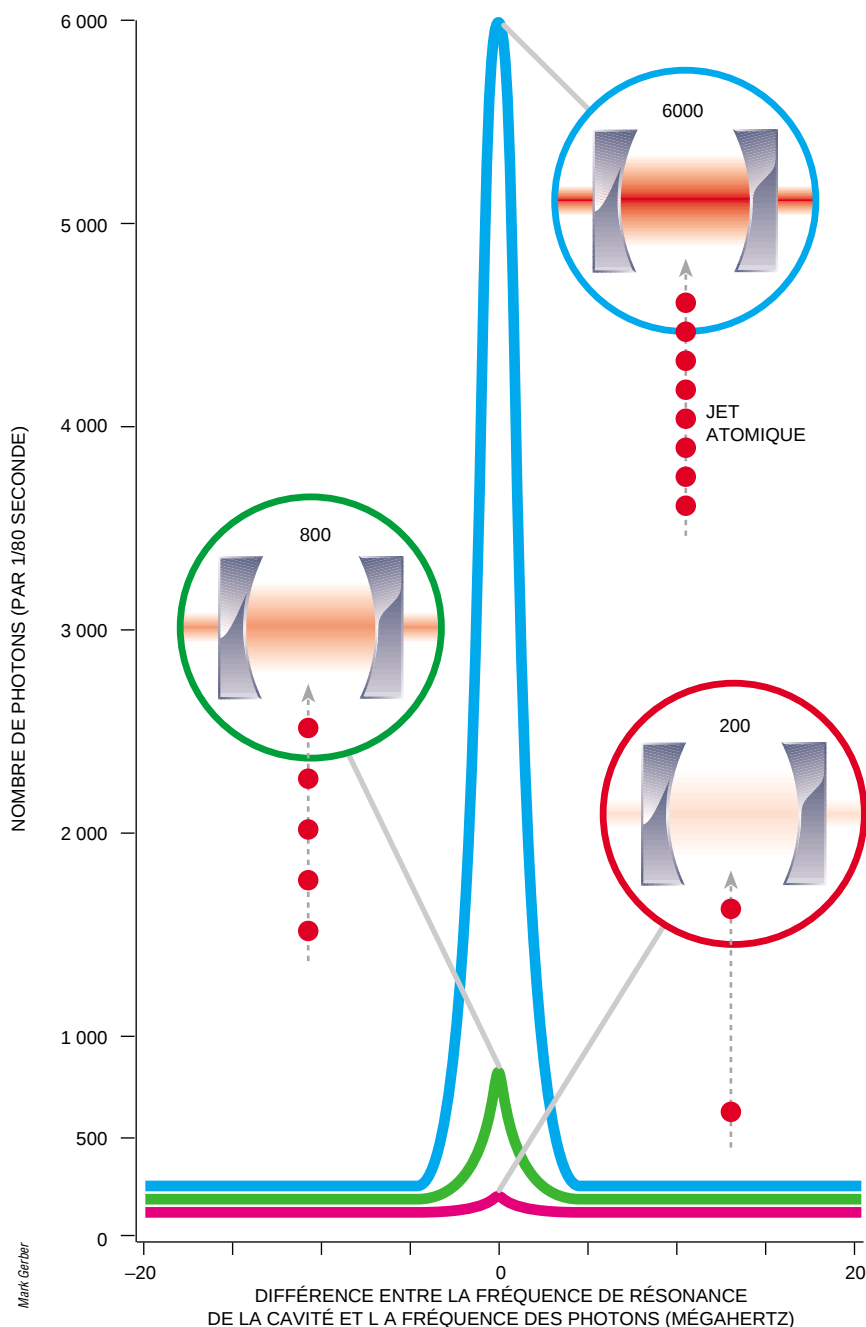
Un micromaser optique

Le laser à un seul atome est une version optique du micromaser : des atomes excités ayant deux niveaux d'énergie pénètrent un à un dans un minuscule résonateur et émettent des photons infrarouges dont la longueur d'onde est juste inférieure à celle de la lumière rouge. Un premier photon est émis dans la cavité vide en raison du phénomène des oscillations dues aux fluctuations électromagnétiques du vide ; puis l'oscillation de Rabi assure une amplification. Plus le nombre de photons augmente dans la cavité, plus la probabilité qu'un atome traversant la cavité émette un autre photon augmente. Ce renforcement est analogue à l'émission stimulée des lasers classiques.

Comment passer du micromaser, qui émet des micro-ondes, au laser à un seul atome ? Nous devons tout d'abord fabriquer un résonateur optique capable de stocker un photon avant qu'il ne soit absorbé par l'un des miroirs ou émis

hors de la cavité. La « supercavité » que nous avons utilisée est délimitée par deux miroirs très précisément alignés et de très grande réflectivité. Vers 1960, les ingénieurs de la NASA qui travaillaient à un système de propulsion d'engin spatial par éjection d'ions observèrent que l'on obtenait des parois très réfléchissantes en déposant une mince couche d'ions sur un substrat. Entre 1970 et 1980, ils utilisèrent ces faisceaux d'ions pour recouvrir les miroirs des gyroscopes à laser.

En utilisant ces techniques de dépôt sur des surfaces de petite taille (quelques millimètres carrés), nous avons obtenu des parois de cavité très réfléchissantes : dans notre laser à un seul atome, les miroirs, espacés de un millimètre, ont une réflectivité de 99,997 pour cent (dans un laser classique, la réflectivité des miroirs est de 99 pour cent environ ; les miroirs domestiques ont une réflectivité de 90 pour cent) ; les photons y font quelque 250 000 allers et retours avant d'être absorbés ou de s'échapper.

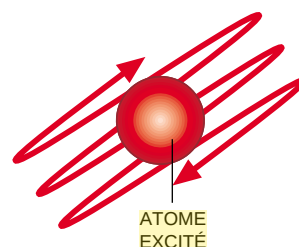


3. L'INTENSITÉ DU FAISCEAU d'un laser à un seul atome augmente brusquement lorsque les atomes de baryum sont nombreux dans la cavité. D'autre part, le faisceau n'est intense que si la cavité est accordée : sa longueur doit être un multiple de la longueur d'onde des photons émis.



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 milliardième 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).