



	HÉLIUM-NÉON	NÉODYME	MICROCAVITÉ SEMICONDUCTRICE	UN ATOME
DISTANCE ENTRE LES MIROIRS	20 À 100 CENTIMÈTRES	5 À 15 CENTIMÈTRES	2 À 5 MICROMÈTRES	1 MILLIMÈTRE
NOMBRE D'ATOMES	10^{16} ATOMES DE NÉON	10^{19} IONS NÉODYME	10^6 PAIRES ÉLECTRON-TROU	1 ATOME DE BARYUM
PUISSANCE (WATTS)	0,001	1,0	0,0001	0,000000000001

Mark Garber

2. CES QUATRE LASERS ont des caractéristiques différentes, mais tous produisent des faisceaux de lumière monochromatiques. Le laser hélium-néon est celui qui équipe les lecteur de codes à barres de supermarché. Les lasers YAG au néodyme, plus puissants, sont utilisés en chirurgie. Les lasers à microcavité semi-

conductrice sont en cours de mise au point ; les physiciens prévoient de les utiliser dans des ordinateurs optiques. Le laser à un seul atome est avant tout un outil expérimental, mais on imagine de l'utiliser pour le traitement d'informations à faible bruit et pour de la spectroscopie de précision.

les miroirs, la lumière est continuellement amplifiée par le milieu laser. Une partie sort du laser par un des miroirs, qui n'est pas parfaitement réfléchissant : c'est le faisceau laser.

Un laser ne fonctionne que si son gain, c'est-à-dire l'amplification de la lumière lors de sa traversée du milieu actif, compense les pertes dues aux imperfections des miroirs ou à d'autres effets perturbateurs. Dans les lasers classiques, le gain n'est supérieur aux pertes que si le milieu actif contient un très grand nombre d'atomes ou de molécules. Par exemple, un laser à l'hélium-néon de puissance égale à un milliwatt contient plusieurs millions de milliards d'atomes de néon et dix fois plus d'atomes d'hélium ; l'émission de lumière se stabilise quand un milliard de photons environ circule entre les miroirs.

Comment réduire le nombre d'atomes actifs d'un laser ? Par exemple, en améliorant la réflectivité des miroirs : les photons sont alors stockés plus longtemps dans la cavité, et ils interagissent davantage avec le milieu actif, qui peut alors être moins important. Dans certains cas, on augmente le gain du laser en réduisant le nombre d'atomes inactifs, qui gênent le fonctionnement du laser par leurs collisions avec les atomes excités (ils provoquent alors une désexcitation anticipée). Cependant, même dans les lasers classiques les plus efficaces, il y a plus de 100 000 atomes actifs par photon présent dans la cavité.

Des atomes dans des cavités

Notre laser à un seul atome fonctionne grâce à un effet différent de celui qui est à l'œuvre dans les lasers classiques : l'oscillation de Rabi. Étudiée par les spécialistes de l'électrodynamique quantique en cavité (voir *Électrodynamique quantique en cavité*, par S. Haroche et J.-M. Raimond, *Pour La Science*, juin 1993), les oscillations de Rabi sont des échanges périodiques d'énergie entre des atomes et un champ électromagnétique. Le phénomène a été découvert vers 1930 par le physicien américain Isidor Rabi (1898-1988). Ce dernier avait émis des ondes radio vers des atomes et observé que l'énergie de ces derniers augmentait quand l'énergie des photons radio était égale à la différence d'énergie entre l'état fondamental et l'état excité des atomes ; jusque là, rien que de très normal. Puis le phénomène s'inversait : irradiés par les mêmes ondes radio, les atomes réemettaient leur énergie et revenaient à l'état fondamental. Ils recaptaient alors de l'énergie du champ radio, et le cycle recommençait à une fréquence aujourd'hui nommée fréquence d'oscillation de Rabi.

Rabi ne pouvait observer les comportements individuels des atomes et des photons, car les photons radio ont une énergie très faible : même une onde radio de faible puissance en contient une quantité considérable, de sorte que les échanges entre les atomes

et les photons sont excessivement nombreux ; les effets des interactions se moyennent et on ne peut pas analyser la nature quantique des échanges.

Vers 1960, Edwin Jaynes, de l'Université de Washington, et Frederic Cummings, du Laboratoire de recherches de la Société Ford, ont étudié théoriquement comment un atome à deux niveaux d'énergie interagit avec une onde composée d'un petit nombre de photons. Ils ont calculé que la fréquence des oscillations de Rabi est quantifiée : un atome à deux niveaux d'énergie émet et absorbe des photons à des fréquences particulières, qui dépendent de l'intensité du champ électromagnétique.

E. Jaynes et F. Cumming prédisaient qu'on pourrait forcer l'atome excité à émettre un photon en le plaçant dans une petite cavité résonante, c'est-à-dire dont la taille est un multiple de la longueur d'onde du photon : une cavité aux parois réfléchissantes est comme une corde de guitare, car, les extrémités étant fixes, la corde qui vibre fait un nombre entier de ventres de vibration ; de même, seuls les photons dont la longueur d'onde sont un sous-multiple de la taille de la cavité s'y accumulent. E. Jaynes et F. Cummings avaient calculé que, quand des photons émis par l'atome excité s'accumulent ainsi, un « couplage » quantique déclenche une émission de photons bien plus rapidement que si l'atome est isolé dans l'espace ; dans la cavité, l'atome peut absorber le photon qu'il

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 dés excitent. 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.

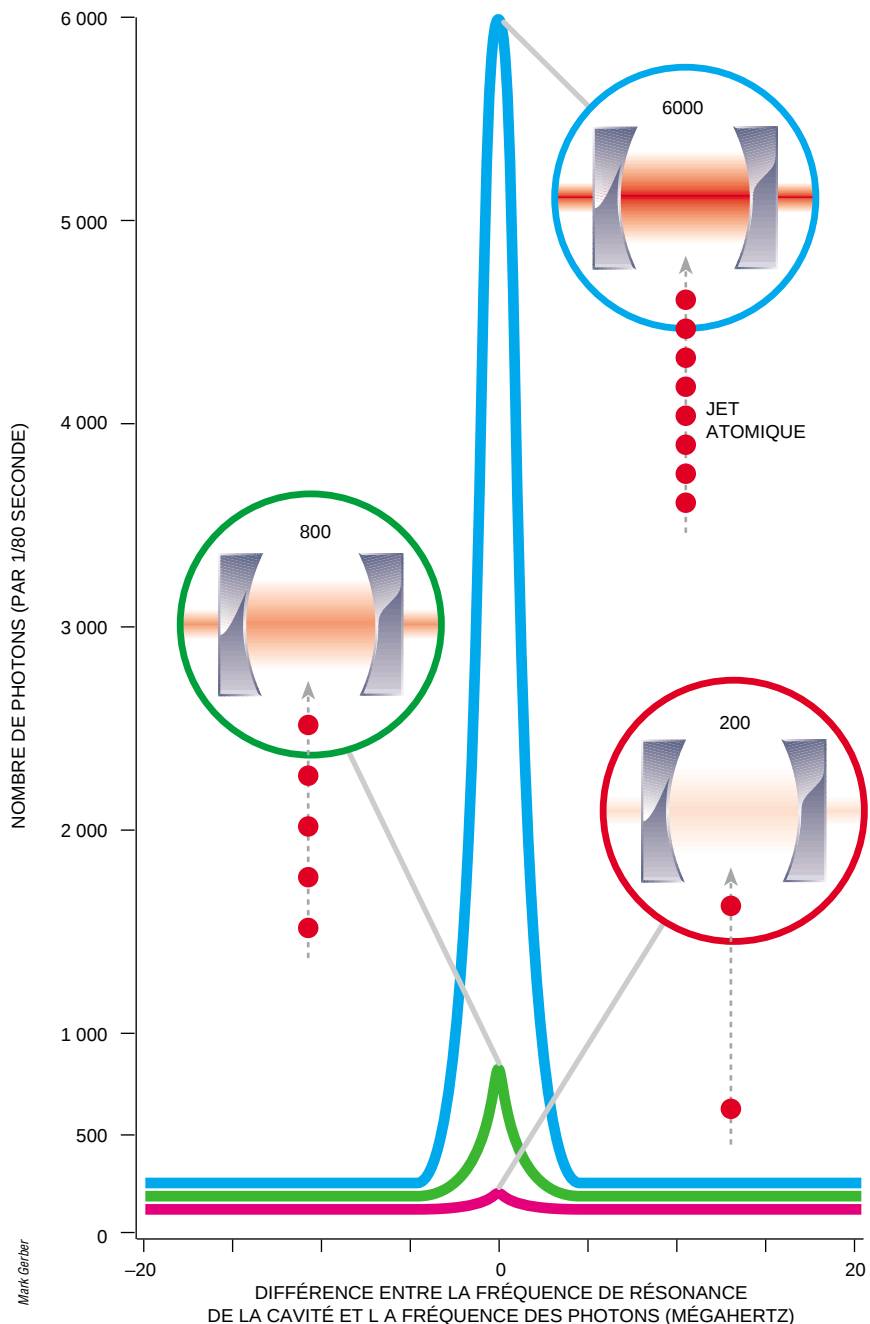
Un micromaser optique

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.