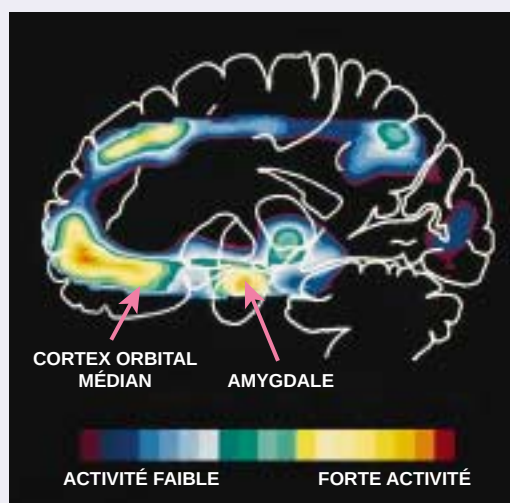


D'autres techniques d'imagerie analysent le fonctionnement du cerveau, révélant par exemple les zones actives lorsqu'une personne se repose ou accomplit une tâche particulière. Ainsi, la tomographie par émission de positons a montré que l'activité de plusieurs aires limbiques et corticales diffère chez les personnes gravement dépressives et chez les personnes saines. De surcroît, chez une même personne passant rapidement d'un état dépressif à un état maniaque, l'image cérébrale obtenue par tomographie par émission de positons change. Ces travaux ont révélé certaines zones cérébrales particulièrement importantes : les personnes chez qui une région du système limbique (le noyau amygdalien de l'hémisphère gauche) est particulièrement active risqueraient davantage de devenir dépressives.

Quand l'imagerie fonctionnelle indiquera aussi les concentrations en neuromédiateurs, on pourra les comparer dans les différentes aires cérébrales d'une même personne ou encore d'une personne à l'autre. Des laboratoires ont mis au point des marqueurs qui se lient au transporteur de la sérotonine (qui «pompe» la sérotonine de la fente synaptique vers l'intérieur du neurone présynaptique) et à l'un des types de récepteurs de la sérotonine ; grâce à ces marqueurs, les neurobiologistes devraient localiser précisément les aires cérébrales où, chez les personnes dépressives, la concentration en sérotonine est anormalement basse, et identifier les sites d'action des antidépresseurs dans le cerveau.

On commence tout juste à utiliser les outils de l'imagerie pour étudier les causes de la dépression et les meilleures façons de la traiter. Grâce aux progrès de cette méthode, les troubles de l'humeur devraient livrer leurs secrets.

UNE AUGMENTATION DE L'ACTIVITÉ dans certaines régions du cortex pré-frontal et dans le noyau amygdalien de l'hémisphère gauche de patients dépressifs a été révélée par tomographie par émission de positons. Une hyperactivation du noyau amygdalien serait peut-être le signe d'une vulnérabilité accrue à la dépression.



Wayne C. Drevets, University of Pittsburgh Medical Center

soit rare, soit aléatoirement rare ou abondante. La dernière situation rendait les mères si anxieuses qu'elles négligeaient leurs jeunes. Comme le prévoit notre modèle, les jeunes étaient peu actifs, évitaient les interactions avec d'autres singes et se figeaient dès qu'ils rencontraient une situation nouvelle. Devenus adultes, la concentration en CRF était anormalement élevée dans leur liquide céphalo-rachidien.

Les données obtenues sur le rat et sur le singe soulèvent plusieurs questions de santé publique. En 1995, en France, près de 65 000 enfants ont été déclarés comme ayant été maltraités ou négligés. Si l'on extrapole à l'homme les résultats obtenus chez l'animal, la maltraitance ou la négligence modifieraient irréversiblement le cerveau en développement, de sorte qu'à l'âge adulte la production de CRF et la sensibilité à cette hormone augmentent : les risques de dépression seraient majorés.

Dans cette hypothèse, il serait intéressant de disposer de méthodes pour évaluer l'activité des neurones producteurs de CRF ou le nombre des récepteurs spécifiques de cette hormone ; les médecins dépisteraient alors les personnes qui ont été maltraitées et qui risquent de devenir dépressives. De surcroît, ils vérifieront si les antidépresseurs ou une psychothérapie préviennent la

dépression chez les enfants prédisposés. Ils détermineront également si les adultes dépressifs, maltraités dans l'enfance, doivent prendre des antidépresseurs toute leur vie, ou bien si certains traitements normalisent l'activité des neurones producteurs de CRF.

Le modèle stress-diathèse ne s'applique pas à tous les cas de dépression ; tous les patients dépressifs n'ont pas été des enfants maltraités. Toutefois, les personnes dont certains parents plus ou moins éloignés sont dépressifs et qui ont eu une enfance traumatisante sont particulièrement sensibles à la dépression. Les personnes qui n'ont pas de prédisposition génétique pour la dépression (il n'y a pas d'autres cas de dépression dans la famille) seraient relativement protégées contre une dépression grave, même si elles ont eu une enfance difficile ou un traumatisme notable après l'enfance. Inversement, certaines personnes génétiquement prédisposées deviennent dépressives, même si elles n'ont subi aucun traumatisme durant leur enfance, ni ultérieurement.

Grâce aux progrès réalisés par les neurobiologistes, les pharmacologues explorent de nouvelles pistes pour de nouveaux médicaments antidépresseurs. Plusieurs laboratoires pharmaceutiques recherchent des antagonistes des récepteurs de l'hormone CRF et des activateurs de certains récepteurs de la sérotonine ; ces dernières substances devraient être de puissants antidépresseurs (ils ne stimuleraient pas les récepteurs de la sérotonine portés par les neurones qui n'interviennent pas dans la dépression).

D'autres traitements plus efficaces et dépourvus d'effets secondaires, fondés sur une meilleure compréhension de la biologie des troubles de l'humeur, verront le jour.

Charles NEMEROFF dirige le département de psychiatrie et des sciences du comportement à la Faculté de médecine d'Emory.

Biology of Depressive Disorders, parties A et B, sous la direction de J. John Mann et David J. Kupfer, Plenum Press, 1993.

Michael J. OWENS et Charles B. NEMEROFF, *The Role of Serotonin in the Pathophysiology of Depression : Focus on the Serotonin Transporter*, in *Clinical Chemis-*

try, vol. 40, n° 2, pp. 288-295, février 1994.

K.I. NATHAN, D.L. MUSSELMAN, A.F. SCHATZBERG et C.B. NEMEROFF, *Biology of Mood Disorders*, in *Textbook of Psychopharmacology*, sous la direction de A.F. Schatzberg et C.B. Nemeroff, APA Press, Washington, D.C., 1995.

C.B. NEMEROFF, *The Corticotropin-Releasing Factor (CRF) Hypothesis of Depression : New Finding and New Directions*, in *Molecular Psychiatry*, vol. 1, n° 4, pp. 336-342, septembre 1996.

Les lasers à un seul atome

MICHAËL FIELD • KYUNGWON AN

Ce nouveau type de laser maîtrise l'énergie des atomes et révèle comment la lumière interagit avec la matière.

Inventé il y a 40 ans, le laser est aujourd'hui partout : dans les conférences, il sert de pointeur, en remplacement des baguettes de bois ; aux caisses des supermarchés, il lit les codes à barres placés sur les articles ; dans les lecteurs de disques compacts, il procure aux mélomanes un son purifié ; dans l'industrie du bâtiment, il supprime le fil à plomb... Si les applications sont variées, le principe est invariable : un nombre considérable d'atomes ou de molécules, excités dans une cavité, émettent simultanément des photons (les «grains» de lumière) identiques.

À partir de combien d'atomes obtient-on l'effet laser ? Nous avons récemment mis au point un laser qui fonctionne avec un seul atome. Cet appareil ne peut lire de codes à barres ni décoder des disques compacts, car sa puissance (environ un milliardième de watt) est plusieurs millions de fois inférieure à celle des lasers classiques. Toutefois il s'est révélé utile pour des expériences de physique variées. Sa lumière a notamment des propriétés qui ne s'expliquent que par la mécanique quantique, laquelle décrit les interactions aux échelles atomiques et subatomiques.

Aussi des physiciens testent les prévisions de la mécanique quantique en analysant les performances de notre laser dans différentes conditions expérimentales.

La lumière dans une cavité

Avant d'examiner le fonctionnement des lasers à un atome, considérons celui des lasers classiques. Ces appareils sont composés de deux parties essentielles : d'une part, deux miroirs se faisant face constituent une cavité où la lumière fait de nombreux allers et retours avant de s'échapper sous forme de faisceau laser ; d'autre part, de la matière sous forme gazeuse, liquide ou solide, entre

les deux miroirs, engendre et amplifie la lumière.

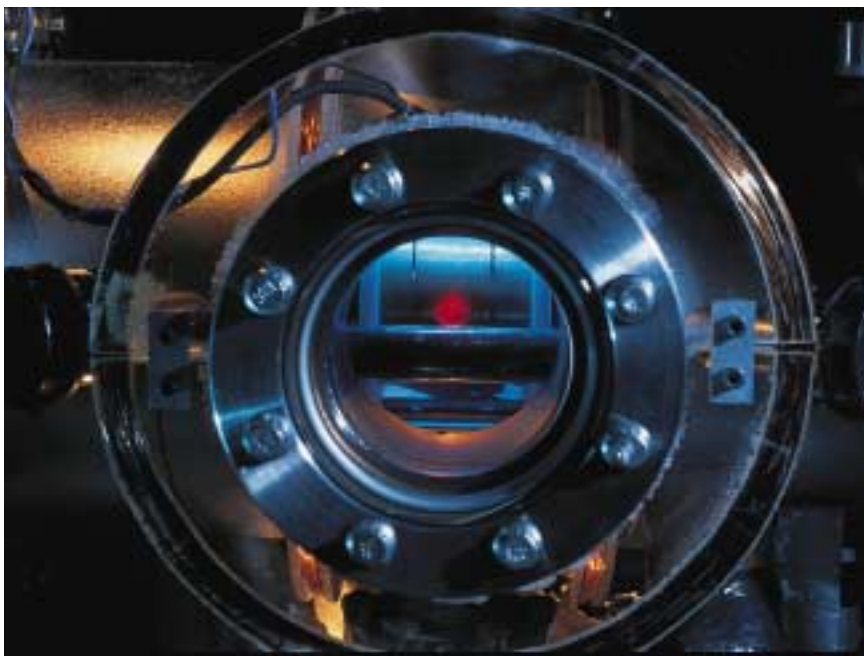
Dans les lasers à l'hélium-néon, qui émettent une lumière rouge, ce milieu est un gaz. Dans les lasers à colorant, ce milieu est une solution contenant des molécules colorantes, et la couleur du laser est réglable. Dans les lasers au néodyme, des ions néodyme sont inclus dans un grenat (un silicate cristallin) d'yttrium et d'aluminium, et le faisceau est infrarouge.

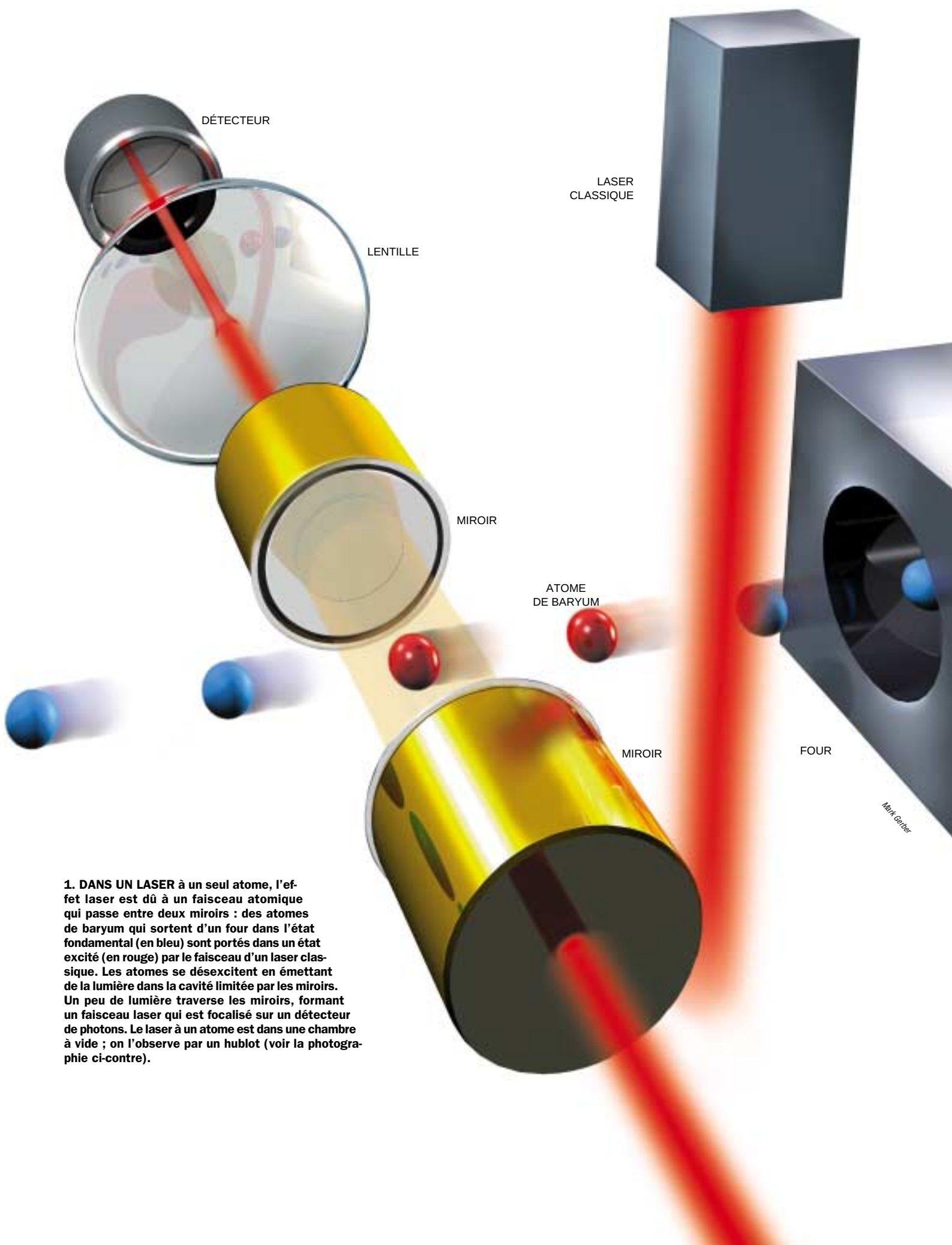
La matière qui est dans la cavité de ces lasers est composée de nombreuses molécules ou atomes, mais une faible proportion de ces molécules ou atomes émet la lumière laser. Dans de nombreux types de lasers, les atomes actifs ont deux états principaux, caractérisés par des énergies différentes. Sans stimulation particulière, les atomes du milieu actif sont moins nombreux dans l'état excité que dans l'état fondamental, d'énergie inférieure. Pour obtenir l'effet laser, on inverse les proportions d'atomes excités et

d'atomes dans l'état fondamental (dans les lasers classiques, cette «inversion de population» s'obtient à l'aide d'une source d'énergie, tel un flash).

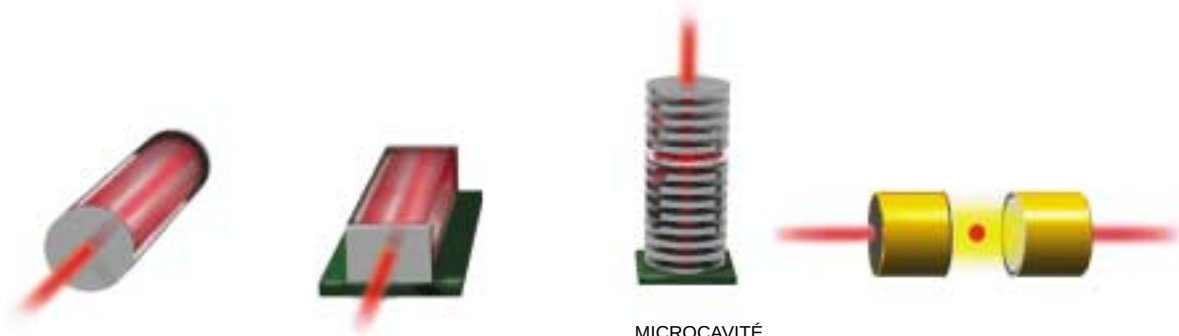
Les atomes excités ne le restent pas indéfiniment : ils reprennent spontanément leur énergie inférieure, en émettant de la lumière ; c'est le phénomène d'émission spontanée. Une faible proportion de cette lumière (quelques millièmes) atteint un des miroirs, et se réfléchit vers le milieu actif.

Quand cette lumière réfléchie atteint des atomes qui ne se sont pas désexcités, elle leur fait émettre des photons ayant la même longueur d'onde, la même direction et la même phase que la lumière réfléchie. Cette «émission stimulée» est responsable de la plupart des propriétés remarquables de la lumière laser. La lumière ainsi amplifiée atteint le second miroir, se réfléchit, suscite à nouveau la désexcitation des atomes actifs, et ainsi de suite. Lors de ses allers et retours entre





1. DANS UN LASER à un seul atome, l'effet laser est dû à un faisceau atomique qui passe entre deux miroirs : des atomes de baryum qui sortent d'un four dans l'état fondamental (en bleu) sont portés dans un état excité (en rouge) par le faisceau d'un laser classique. Les atomes se dés excitent en émettant de la lumière dans la cavité limitée par les miroirs. Un peu de lumière traverse les miroirs, formant un faisceau laser qui est focalisé sur un détecteur de photons. Le laser à un atome est dans une chambre à vide ; on l'observe par un hublot (voir la photographie ci-contre).



	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 prédisent 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 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.

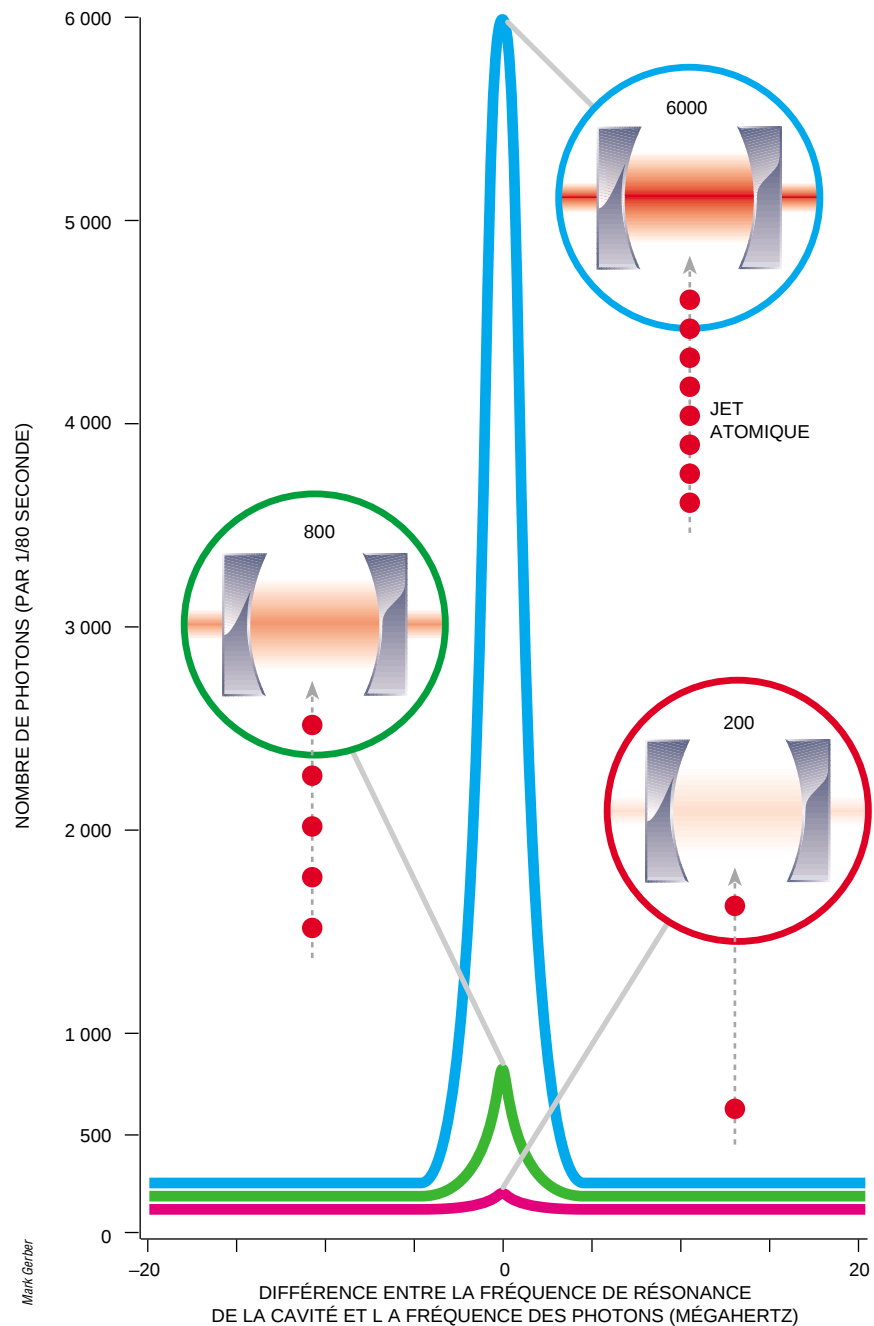
Un micromaser optique

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.

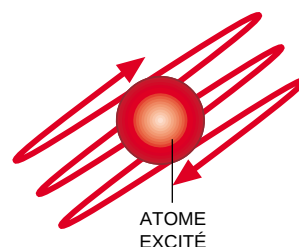


3. L'INTENSITÉ DU FAISCEAU d'un laser à un seul atome augmente brusquement lorsque les atomes de baryum sont nombreux dans la cavité. D'autre part, le faisceau n'est intense que si la cavité est accordée : sa longueur doit être un multiple de la longueur d'onde des photons émis.



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).

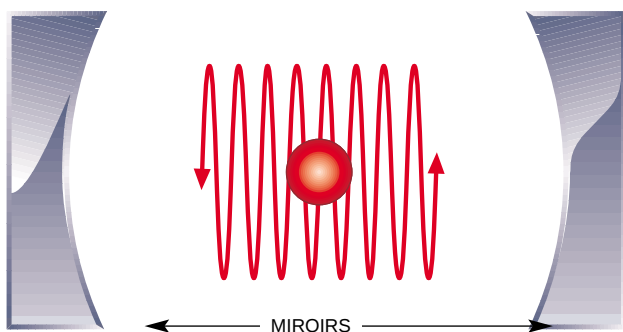
Dans notre expérience, les photons s'accumulent jusqu'à ce que les pertes par absorption et par transmission, à travers les miroirs, soient égales aux émissions par les atomes de baryum. Nous faisons varier le débit d'atomes en modifiant la température du four où le baryum est évaporé.

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.

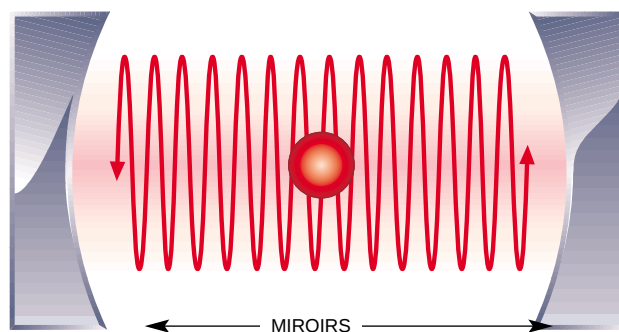
Les lasers du futur

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).

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.
