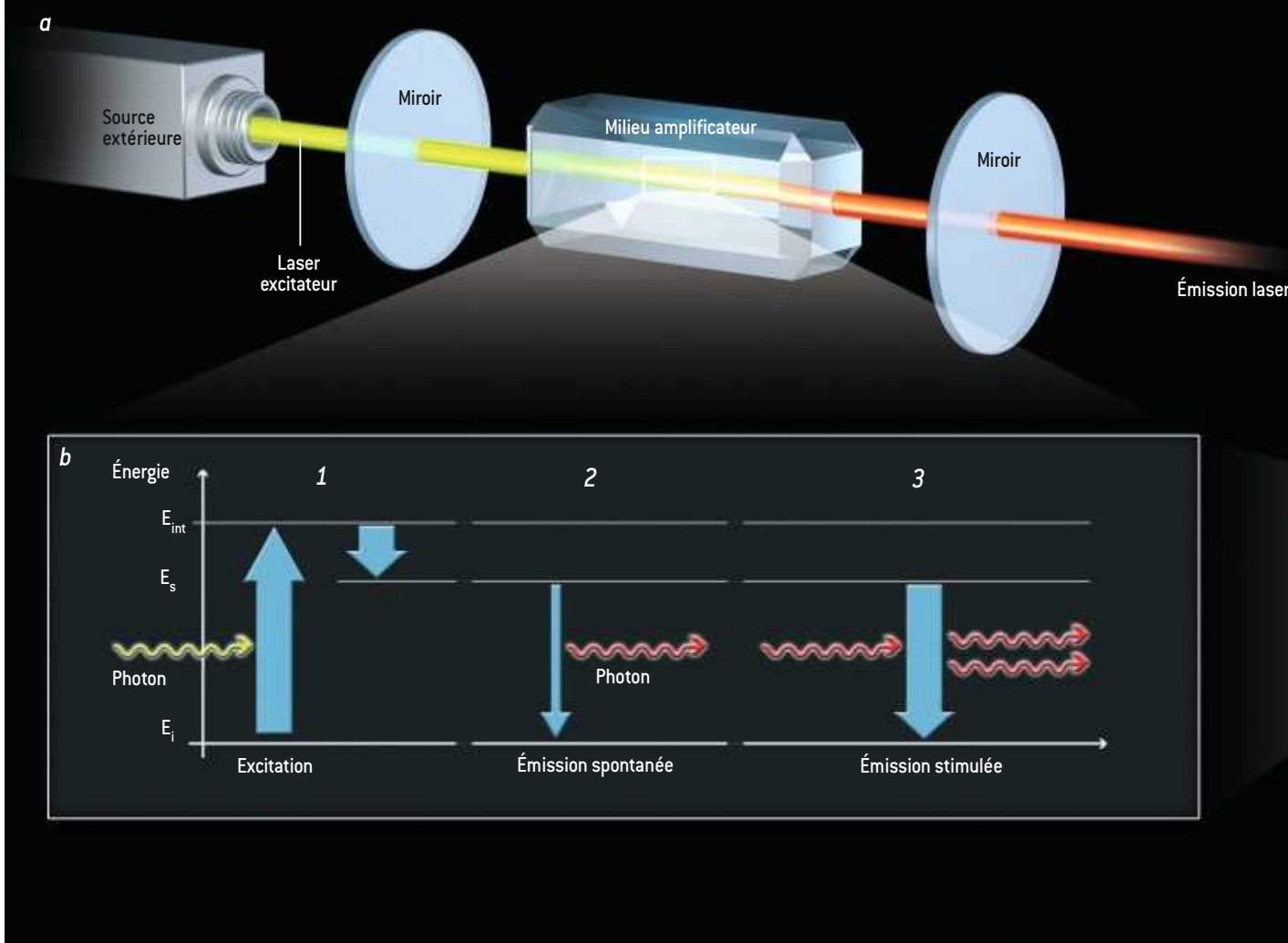




Bruno Bourgeois

Émission spontanée, émission stimulée

Le cœur du laser est constitué d'un ensemble d'atomes sous forme solide, liquide ou gazeuse qui constitue le milieu actif. Ces atomes sont généralement identiques et, parmi tous leurs états énergétiques possibles, une paire d'états i et s , d'énergies respectives E_i et E_s , se révèle plus favorable que les autres pour l'émission laser. Une fois excités, c'est-à-dire portés dans l'état d'énergie supérieure, les atomes amplifient, par le processus d'émission stimulée, les photons qui les traversent (voir la figure 2).

Dans ce processus, un photon d'énergie $E_s - E_i$ incident qui frappe un atome excité dans l'état s provoque ou « stimule » la désexcitation de cet atome dans l'état i ; cet atome émet un photon identique au photon incident. On obtient ainsi deux photons ayant la même direc-

tion et la même énergie $E_s - E_i$ (ou même longueur d'onde). Ceux-ci à leur tour pourront provoquer la désexcitation d'autres atomes excités dans l'état s , créant ainsi en cascade un faisceau de photons identiques.

Pourquoi a-t-on de l'émission spontanée dans le cas des sources incohérentes et de l'émission stimulée dans le cas des lasers, alors qu'initialement, on se trouve dans les deux cas en présence d'une population d'atomes excités ? La réponse est que les deux processus d'émission spontanée et stimulée sont toujours à l'œuvre, mais avec des poids différents selon les situations. L'émission stimulée entre deux niveaux s et i domine lorsque le nombre d'atomes excités dans l'état s est supérieur au nombre d'atomes dans l'état i , situation désignée sous le nom d'inversion

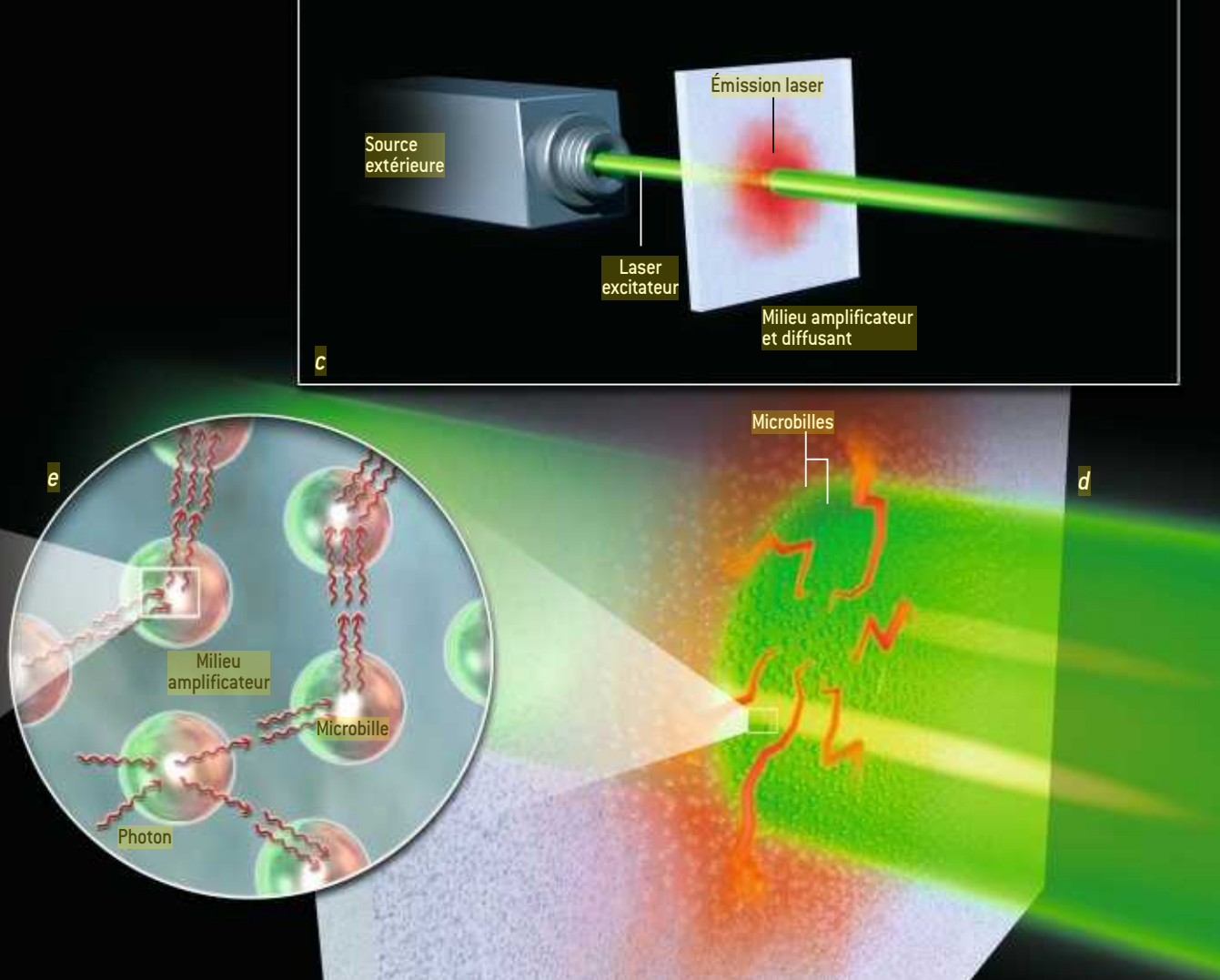
de population. Le mécanisme d'excitation des sources ordinaires est souvent d'origine thermique et ne peut conduire à une inversion de population.

Dans les lasers, on utilise un mécanisme d'excitation optique, électrique ou chimique qui porte les atomes dans l'état d'énergie supérieur E_s . Le milieu ainsi excité amplifie toute onde dont la fréquence correspond à l'énergie de photon $E_s - E_i$. Il peut être décrit par une courbe d'amplification (courbe de gain) en forme de cloche centrée sur cette fréquence, dont la largeur est liée à l'incertitude avec laquelle est définie l'énergie du photon émis. Le rapport de la largeur de la courbe et de la valeur de la fréquence varie de $1/10^6$ à $1/100$ selon les matériaux, ce qui fait d'un tel milieu un amplificateur à bande étroite.

l'encadré page 68). Lorsqu'un atome se désexcite, il émet un grain de lumière ou photon. Le milieu actif amplifie de façon cohérente les photons émis spontanément par les atomes : un tel photon arrivant sur un atome excité provoque – « stimule » – la désexcitation de cet atome, qui émet un photon identique au photon incident. On obtient ainsi deux photons ayant la même direction, la même longueur d'onde et la même phase. Ceux-ci à leur tour pourront provoquer la désexcitation d'autres atomes excités, créant en cascade un faisceau de photons identiques.

Ce phénomène d'émission stimulée diffère du processus à l'œuvre dans les sources de lumière ordinaires. Dans ces dernières, les atomes se désexcitent spontanément et indépendamment les uns des autres en émettant chacun un photon de direction et de longueur d'onde arbitraires. La lumière totale émise est alors la superposition de chacune de ces impulsions individuelles aléatoires, c'est-à-dire incohérente.

Mais le milieu actif ne fait pas un laser à lui tout seul. Sans la cavité optique qui l'entoure, il n'est qu'un simple amplificateur de photons. Habituellement formée



de deux miroirs parallèles, la cavité laser qui contient ce milieu est essentielle, car elle confine la lumière et favorise l'amplification du faisceau.

La cavité : un élément essentiel

C'est aussi la cavité qui confère au faisceau laser ses principales caractéristiques : sa longueur d'onde précise et sa directivité. Comme dans un résonateur acoustique (une cloche, un tuyau d'orgue ou une corde vibrante, voir l'encadré page 70), les fréquences de résonance de la cavité optique sont des multiples d'une fréquence fondamentale inversement proportionnelle à la longueur de la cavité, c'est-à-dire à la distance entre les deux miroirs.

Le rôle du milieu actif est de fournir le gain nécessaire à l'excitation de ces résonances – ou modes vibratoires du champ lumineux – en amplifiant suffisamment l'émission de photons dont la longueur d'onde correspond aux fréquences de résonance de la cavité. Une seule ou plusieurs de ces résonances pourront donner lieu à l'oscillation laser. Si une seule

d'entre elles est excitée, l'émission laser – dite alors monochromatique – présentera une très grande pureté spectrale correspondant à la fréquence de cette résonance. Même si plusieurs résonances sont simultanément excitées, cette pureté spectrale restera meilleure que celle des sources thermiques. La propriété associée à cette pureté spectrale est la *cohérence temporelle* : la fréquence d'oscillation de l'onde est tellement pure que le faisceau peut interférer avec lui-même sur de très longues distances, c'est-à-dire produire une alternance de franges brillantes et sombres bien définies.

La direction du faisceau laser est quant à elle fixée par l'axe des miroirs. La propriété qui se traduit par cette directivité du faisceau est la *cohérence spatiale* du laser ; elle aussi dépend de résonances provoquées par la géométrie de la cavité, mais cette fois dans les plans perpendiculaires à l'axe de la cavité et non le long de cet axe (voir l'encadré page 70).

L'effet laser est un phénomène à seuil. Pour que l'émission laser s'établisse, le gain du milieu amplificateur doit être supérieur aux pertes dans la cavité. Ces pertes peuvent être liées à l'extraction du faisceau

2. COMPARAISON d'un laser classique (a) et d'un laser aléatoire (c). Dans les deux cas, une source extérieure (ici un laser, en vert) excite les atomes d'un milieu actif, les faisant passer d'un état d'énergie E_i à un état d'énergie E_s (via un état intermédiaire E_{int} , b1). En se désexcitant spontanément (b2) ou non (b3), un atome émet un photon, qui peut rencontrer un autre atome excité et provoquer sa désexcitation. Cet atome émet alors un photon identique au photon incident (b3), qui pourra à son tour stimuler l'émission d'autres photons. Pour optimiser ce processus d'amplification, il faut allonger au maximum le parcours des photons dans le milieu amplificateur. Dans un laser classique, deux miroirs jouent ce rôle en obligeant les photons à effectuer des allers-retours (a). Dans un laser aléatoire, le rôle est tenu par un milieu diffusant, ici des microbilles immergées dans le milieu actif (c). Diffusés par les microbilles, les photons restent plus longtemps dans le milieu actif, qui les amplifie avant qu'ils ne s'échappent (d, e). L'émission laser (en rouge) n'est alors pas directionnelle, mais dépend de la géométrie de l'échantillon.

LES MODES VIBRATOIRES D'UNE CAVITÉ

La cavité laser formée par les deux miroirs parallèles est l'analogue optique d'une cavité acoustique telle qu'une corde vibrante fixée à ses deux extrémités. On sait que la mise en mouvement d'une telle corde se traduit par une superposition de modes de vibration. Qu'est-ce qu'un mode de vibration ? C'est une résonance naturelle de la corde. Si on excite celle-ci par une source monochromatique (de fréquence unique), la corde vibre à la fréquence de la source avec une amplitude qui dépend de la fréquence. Pour certaines valeurs de cette dernière, la réponse de la corde est particulièrement forte, avec une amplitude de vibration considérable par rapport à l'amplitude moyenne observée pour une fréquence quelconque.

La corde vibre préférentiellement à ces fréquences de résonance plutôt qu'à une fréquence quelconque. Il en est de même pour une cavité laser, où l'amplitude du champ lumineux joue l'équivalent de l'amplitude de vibration de la corde. Dans le cas de la corde, les fréquences de résonance sont des multiples d'une fréquence fondamentale qui est inversement proportionnelle à la longueur de la corde (a). Il en est de même pour les fréquences de résonance de la cavité laser, qui sont des multiples d'une fréquence fondamentale inversement proportionnelle à la longueur de

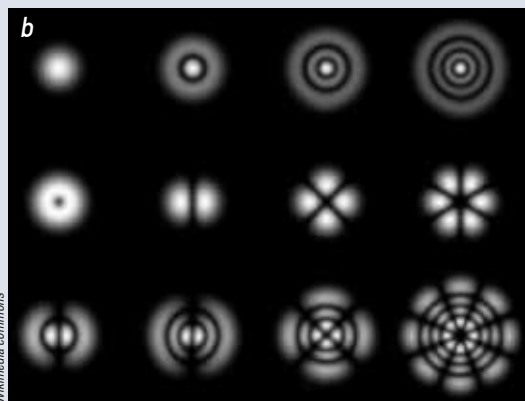
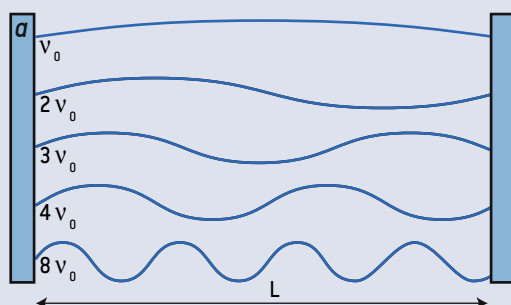
la cavité, soit à la distance entre les deux miroirs.

Cette fréquence fondamentale est aussi la différence des fréquences de deux résonances voisines. Plus la cavité est longue, plus cette différence est faible. Pour une cavité de longueur un mètre (laser à gaz), cette différence vaut 150 mégahertz, alors que pour une cavité de l'ordre de 100 micromètres (laser à semi-conducteur), elle est 10 000 fois plus élevée. Généralement, la différence des fréquences de deux résonances voisines est plus faible que la largeur du spectre de photons émis par le milieu amplificateur du laser. Plusieurs résonances peuvent ainsi être favorisées dans la cavité, ce qui conduit à un laser à plusieurs modes.

Ces résonances le long de la cavité sont nommées modes longitudinaux. Si l'analogie avec la corde vibrante permet de comprendre leur structure, elle ne peut décrire les variations transverses du champ, celles qui se produisent dans toute section perpendiculaire

à l'axe de la cavité. Liées à la section finie de la cavité, ces variations se traduisent par des modes transverses, caractérisés par leur profil spatial dans une telle section (b). Parmi ceux-ci, le premier (*en haut à gauche*) est celui dont les pertes par diffraction sur les bords des miroirs sont les plus faibles. Ce mode est en général caractérisé par un haut degré de corrélation de l'amplitude et de la phase des ondes dans une section transverse du faisceau. Désignée sous le nom de cohérence spatiale, cette propriété se traduit par la directivité du faisceau laser.

Le meilleur faisceau possible sera donc celui qui n'excitera qu'un unique mode longitudinal, et ce dans le premier mode transverse, ce qui lui assurera respectivement cohérence temporelle et cohérence spatiale. Soulignons que c'est la cavité qui confère au faisceau laser ses propriétés. Le rôle du milieu atomique n'est que de fournir le gain nécessaire à l'excitation des modes de cavité.



Comme les modes de vibration d'une corde de longueur L , les modes longitudinaux d'une onde lumineuse dans une cavité de longueur L sont des vibrations à des fréquences multiples d'une fréquence fondamentale ν_0 inversement proportionnelle à L (a). Les modes transverses d'une onde lumineuse dans une cavité (b) sont liés à la section finie de la cavité.

hors de la cavité (un des miroirs n'est pas parfaitement réfléchissant pour laisser sortir le faisceau laser), à la diffraction due à la taille finie des miroirs, à l'absorption ou à la diffusion sur des particules ou des obstacles présents dans la cavité. Cela se traduit par l'existence d'un seuil d'excitation à partir duquel l'émission laser se déclenche. Dans de nombreux lasers, le gain du milieu amplificateur est faible. Pour minimiser les pertes, on utilise des miroirs de sortie à fort pouvoir réfléchissant, de telle sorte qu'une très faible fraction du faisceau soit extraite de la cavité.

Ces considérations soulignent une préoccupation permanente des fabricants de lasers : pour améliorer les performances d'un laser, il faut la meilleure cavité possible en termes de minimisation des pertes. En particulier, toute impureté ou particule diffusante présente dans le milieu actif est nuisible au fonctionnement du laser.

La découverte du laser aléatoire

Si le rôle de la cavité dans un laser classique est si essentiel, comment un effet laser a-t-il pu être obtenu en l'absence de miroirs ? C'est pourtant bien ce qu'ont observé la physicienne Hui Cao et son groupe à l'Université Northwestern, à Chicago, en 1999, avec une poudre d'oxyde de zinc (voir la figure 3). D'autres équipes ont suivi avec divers systèmes actifs constitués de particules diffusantes.

Émise dès la fin des années 1960 par le physicien russe Vladilen Letokhov, l'idée d'un laser sans miroirs, fondé sur l'amplification de la lumière diffuse, est née dans le contexte des masers interstellaires. Des faisceaux micro-ondes intenses sont émis et amplifiés par les nuages de gaz qui entourent les étoiles en fin de vie. La diffusion possible des micro-ondes dans ces gaz, de même que celle des photons dans les poudres, allonge le chemin parcouru dans le milieu amplificateur, un peu comme le fait la cavité d'un laser classique. Ici, cependant, le milieu est complètement ouvert et la lumière finit par s'échapper librement par les bords.

Par diffusion, les photons explorent tout le volume du milieu actif et la probabilité d'engendrer un nouveau photon par émission stimulée croît donc avec le volume. En revanche, les pertes sont proportionnelles à la surface qui entoure ce volume. Lorsque la taille du système augmente, le volume