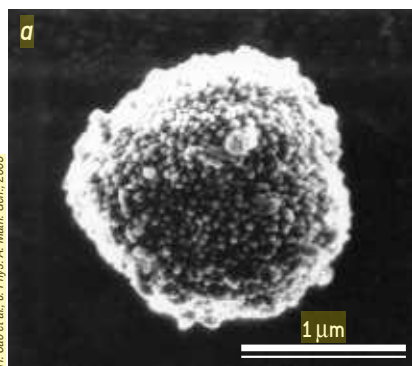


croît plus vite que la surface. Il existe donc une taille critique au-delà de laquelle chaque photon parvient à en engendrer un autre avant de s'échapper du milieu. Cela déclenche une réaction en chaîne qui crée un nombre croissant de photons.

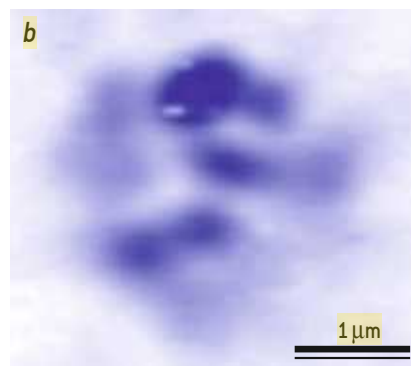
Les premières démonstrations expérimentales ont été réalisées dans des poudres de cristaux et dans des suspensions d'oxyde de titane (principal composant de la peinture blanche) ou dans une solution de colorant organique à fort gain. À chaque fois, la signature était la même : au-dessus d'un seuil d'excitation bien défini, on observait un rétrécissement spectral de l'émission lumineuse. En quelque sorte, le spectre d'émission du milieu actif se resserrait autour d'une fréquence, autrement dit d'une couleur particulière. Cependant, l'émission ne présentait pas les raies spectrales fines d'un laser conventionnel. L'effet observé semblait plutôt s'apparenter au phénomène d'amplification d'émission spontanée, observé par exemple lors de l'amorçage des lasers classiques, lorsque les résonances de la cavité n'ont pas encore été excitées : un photon spontanément émis par le milieu actif est amplifié par ce milieu, préférentiellement à la fréquence où le gain du milieu est maximal. Les observations expérimentales furent d'ailleurs qualifiées d'effet laser « avec rétroaction non résonante ». Et pour cause, en l'absence de cavité, les notions de résonance le long de l'axe ou perpendiculairement à celui-ci n'avaient *a priori* pas lieu d'être.

L'observation, en 1999, de raies laser étroites comparables à celles d'un laser classique dans des poudres d'oxyde de zinc excitées optiquement fut donc une surprise (voir la figure 3). Elle remettait en cause la compréhension acquise jusqu'alors : l'apparition de raies étroites signifiait que des résonances du système avaient été excitées. Mais de quelles résonances s'agissait-il en l'absence de cavité ? Les toutes premières interprétations s'orientèrent vers l'existence de résonances localisées, à l'intérieur du système désordonné. Pourquoi localisées ? Tout simplement parce qu'en étant localisées loin des bords, les résonances n'entraîneraient que de faibles fuites de lumière vers l'extérieur – suffisamment faibles pour que les résonances jouent un rôle similaire aux modes vibratoires d'une cavité classique à deux miroirs.

Comment, cependant, de telles résonances peuvent-elles apparaître dans ces systèmes diffusifs ouverts ? En fait, un tel



H. Cao et al., J. Phys. A: Math. Gen., 2005



cas existe : il s'agit des systèmes diffusifs dans le régime de localisation d'Anderson. En 1958, l'Américain Philip Anderson a prédit qu'en présence de désordre spatial, la conduction électronique d'un métal pouvait s'annuler et le rendre isolant, ce qui lui a valu le prix Nobel en 1977.

Ce phénomène très général s'applique à tout type d'onde, en particulier la lumière : dans les systèmes très diffusants, la lumière est piégée dans une région finie de l'espace et ne se propage plus. Une telle région est caractérisée par sa taille, appelée longueur de localisation. Cette longueur diminue lorsque le système devient de plus en plus diffusant, par exemple lorsque l'on utilise des particules d'indice de réfraction de plus en plus élevé. Si la longueur de localisation est supérieure à la taille du système étudié, la lumière s'échappe par les bords du système avant de pouvoir être piégée par le désordre. Mais si la longueur de localisation est inférieure à la taille du système, la lumière ne peut plus s'échapper du système. Il existe alors, dans ce régime, des résonances similaires à celles d'une cavité à deux miroirs, mais de structures spatiales très différentes (voir la figure 8).

Des modes vibratoires sans cavité

La présence de telles résonances dans les systèmes diffusifs à gain pourrait expliquer l'apparition d'un spectre de raies étroites correspondant à l'excitation laser de ces modes. Un tel régime reste cependant difficile à atteindre en optique, car il exige des milieux très diffusants. L'analyse des échantillons utilisés dans les expériences de Hui Cao et dans d'autres expériences similaires a en outre montré que l'on se trouvait loin du régime de localisation d'Anderson. L'excitation de résonances localisées n'était donc pas à l'origine des raies laser observées. Face à cette énigme,

3. UN MICROLASER ALÉATOIRE constitué d'un agrégat d'environ 20 000 nanoparticules d'oxyde de zinc, observé en microscopie électronique (a). L'excitation optique des nanoparticules conduit à l'émission laser de l'agrégat dans l'ultraviolet (b).

✓ BIBLIOGRAPHIE

Ad Lagendijk et al., *Fifty years of Anderson localization*, *Physics Today*, vol. 62, pp. 24-29, 2009.

Hakan Türeci et al., *Strong interactions in multimode random lasers*, *Science*, vol. 320, pp. 643-646, 2008.

Randal Polson et Valy Vardeny, *Random lasing in human tissues*, *Applied Physics Letters*, vol. 85, pp. 1289-1291, 2004.

Hui Cao, *Lasing in random media*, *Waves in Random Media*, vol. 13, pp. R1-R39, 2003.

Hui Cao et al., *Random laser action in semiconductor powder*, *Physical Review Letters*, vol. 82, pp. 2278-2281, 1999.

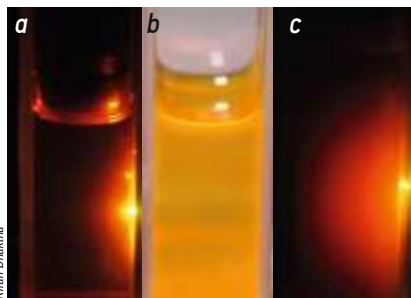
différentes hypothèses ont été avancées, comme l'existence de résonances accidentellement localisées, même loin du régime d'Anderson, ou encore l'amplification, le long de chemins de diffusion anormalement longs, de certains photons « chanceux ».

Aujourd'hui, l'origine de ces raies laser semble comprise pour une bonne part à la suite de travaux numériques et théoriques récents. On s'est d'abord aperçu que même loin du régime de localisation d'Anderson, les systèmes diffusifs ouverts, et donc très fuyants, possédaient des résonances. Malgré leur très mauvaise qualité liée à leurs fortes pertes vers l'extérieur, ces résonances peuvent être excitées en présence de gain : ici, l'histoire se répète, il suffit que le gain devienne supérieur aux pertes pour que l'on observe l'oscillation laser, qui se traduit par la présence de raies étroites dans le spectre d'émission. Cela évidemment au prix d'une excitation externe très intense. Cependant, les modes vibratoires excités sont très différents des modes bien connus des cavités ou des résonances localisées (voir la figure 8c).

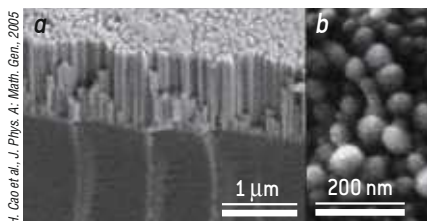
Une théorie englobant tous les lasers

Dans un laser traditionnel, il est admis que les modes laser sont simplement les modes de la cavité excités par le gain. Cette hypothèse est à la base de la compréhension théorique du laser jusqu'à aujourd'hui. Elle repose sur la condition que les pertes de la cavité sont faibles, ce qui est raisonnable dans de nombreux cas. Mais cette condition ne tient plus dans le cas des lasers aléatoires. Tout récemment, Douglas Stone, Hakan Türeci et leurs collaborateurs à l'Université de Yale ont proposé une théorie qui, contrairement à la théorie standard, ne s'appuie pas *a priori* sur les modes d'une cavité : au lieu de considérer les modes d'une cavité comme une des données du problème, ils ont supposé qu'il existait des modes vibratoires, mais inconnus, à déterminer de toutes pièces avec pour seules données les caractéristiques du système diffusant à gain.

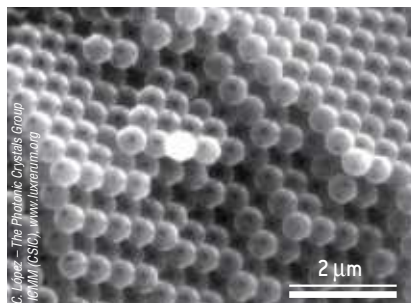
Cette approche leur a permis de proposer une nouvelle description, plus générale, des modes vibratoires laser, qui englobe le cas conventionnel des lasers à cavité, mais s'étend aussi aux nouvelles sources laser fortement ouvertes telles que les micro-disques (voir la figure 8a), les lasers distribués (où un réseau est gravé dans la région active pour forcer l'émission à une longueur



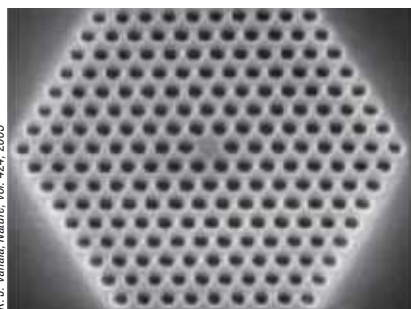
4. LASER ALÉATOIRE À COLORANT : le milieu aléatoire est une suspension de nanoparticules d'oxyde de titane dans un colorant [b]. Un faisceau laser vert excite le colorant qui réémet dans le rouge [c]. Sans les nanoparticules [a], il n'y a pas d'émission laser.



5. LASERS ALÉATOIRES À SEMI-CONDUCTEURS : des nanopiliers d'oxyde de zinc sur un substrat de saphir [a] ou une poudre de nanocristaux d'oxyde de zinc [b] servent à la fois de milieu actif grâce à leurs propriétés électriques, et de milieu diffusant par leur géométrie.



6. LASER ALÉATOIRE dans une structure d'opale : un réseau interconnecté de sphères d'air entourées de coquilles de silicium joue le rôle du milieu diffusant. Ce réseau est infiltré par un colorant – le milieu actif.



7. LASER À CRISTAL PHOTONIQUE : une membrane semi-conductrice percée périodiquement est excitée par le dessus. L'effet laser est attendu dans le plan de la membrane. Ce laser devient un laser aléatoire quand on introduit un désordre sur la position des trous ou sur leur forme.

d'onde particulière, déterminée par le pas du réseau) ou les lasers aléatoires ...

Qu'en est-il des propriétés de l'émission laser en l'absence de cavité ? Un laser aléatoire conserve une bonne cohérence temporelle, mais perd sa directivité. En effet, l'émission ne se fait plus selon une direction bien définie, mais dans toutes les directions de manière aléatoire. Cette perte de directivité provient de la structure complexe des modes laser et de leur couplage avec l'extérieur (voir la figure 1). En revanche, la cohérence temporelle est conservée : si un seul mode vibratoire est excité, la lumière sera à peu près aussi monochromatique que celle d'un laser classique.

En pratique, un laser aléatoire a énormément de modes, car leur nombre augmente avec le volume (contrairement à un laser conventionnel, dont le nombre de modes est plus faible, car il augmente comme la longueur de la cavité). Il est donc difficile de n'exciter qu'un seul mode, sauf dans des structures de taille micrométrique. Le laser aléatoire présente ainsi une cohérence temporelle moyenne, à l'instar des lasers traditionnels multimodes.

Une propriété originale du laser aléatoire est que l'émission dépend de la localisation spatiale de l'excitation externe. Dans la majorité des systèmes étudiés jusqu'à maintenant, l'excitation est optique : on illumine l'échantillon au moyen d'un faisceau laser externe suffisamment intense. Il suffit de déplacer légèrement ce faisceau sur l'échantillon pour que d'autres résonances soient excitées et que le spectre de l'émission laser change en conséquence.

Une autre propriété distingue la lumière laser de celle émise par une source classique : la statistique des photons, qui mesure leur tendance à être émis plus ou moins régulièrement dans le temps. Les photons d'une source classique ont tendance à être émis groupés en « paquets », alors que l'émission des photons laser est plus régulière. En conséquence, l'intensité lumineuse d'une source classique est beaucoup plus fluctuante que celle d'un laser. Pour en avoir le cœur net, plusieurs groupes ont mesuré la statistique des photons émis par un laser aléatoire et ont ainsi vérifié que le laser aléatoire se comporte comme un laser classique.

Même si les lasers aléatoires ont un avantage sur les lasers conventionnels, car ils sont beaucoup plus faciles à réaliser et donc moins chers, il est encore trop tôt pour identifier le rôle qu'ils vont jouer dans notre vie de tous les jours. Cependant, on a vu