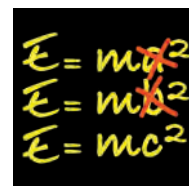


Une brève histoire de la physique des lasers


$$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ E &= mc^2 \\ E &= mc^2 \end{aligned}$$

En mai 1960, à Malibu en Californie, T. Maiman fait jaillir le premier faisceau de lumière cohérente. Cette découverte s'inscrit au sein d'un patient développement des idées et des technologies concernant l'interaction entre la matière et le rayonnement, fait de ricochets de découvertes et de fertilisations croisées entre domaines différents. Cet article trace à grands traits l'histoire de ce cheminement, avant et après cette date historique.

Le laser, dont on a fêté en 2010 le cinquantenaire avec un faste mérité, est fabriqué chaque année à des millions d'exemplaires en raison de ses multiples applications. Cette source de lumière révolutionnaire est cependant née, non pas d'avancées technologiques visant à l'amélioration des sources existantes, mais de la recherche fondamentale : le laser est l'aboutissement d'un long processus conceptuel portant sur les caractéristiques microscopiques de l'interaction matière-rayonnement. Après sa découverte, grâce à la recherche appliquée et industrielle, il passe en quelques décennies du statut d'objet rétif et capricieux de laboratoire à celui d'appareil commercial « presse-bouton » aux performances constamment améliorées. Il rend possible des expériences qui étaient inimaginables avant son invention et permet ainsi d'ouvrir de nouveaux champs d'investigation sur la nature et les propriétés ultimes de la lumière et de son interaction avec la matière. Le laser est ainsi à l'origine d'un extraordinaire renouveau de branches entières de la physique, attesté par le fait que, depuis 1960, pas moins de 17 physiciens ont reçu le prix Nobel pour leurs travaux fondamentaux concernant le laser, ou rendus possibles par le laser.

Cet article a pour but de retracer à grands traits les différentes étapes de ce cheminement, avant et après l'invention du laser en 1960, sans prétention à l'exhaustivité. On verra en particulier que les physiciens sont graduellement passés de l'*Electronique Quantique*, où les propriétés quantiques de la matière sont primordiales, à l'*Optique Quantique*, où les aspects quantiques de la lumière jouent un rôle prédominant.

Les premières approches phénoménologiques

Quelle est la nature de la lumière ? Comment la produire efficacement ? Ces questions agitent les esprits

depuis des milliers d'années, mais il faut attendre la fin du XIX^e siècle pour commencer à avoir des éléments de réponse quantitatifs. On sait en 1864 grâce à J.C. Maxwell que la lumière est une onde électromagnétique et, en 1897 grâce à J.J. Thomson, que la matière contient des charges ponctuelles, les électrons. Les spectroscopistes ont observé que les corps simples émettent et absorbent la lumière à des longueurs d'onde bien déterminées. A partir de ces éléments, H.A. Lorentz élabore une première approche théorique, connue des étudiants sous le nom de *modèle de l'électron élastiquement lié*. Malgré son caractère phénoménologique et purement classique, elle permet de comprendre un grand nombre de caractéristiques de l'interaction matière-rayonnement, notamment l'indice de réfraction des corps transparents et l'émission de lumière par rayonnement des électrons mis en mouvement forcé par une onde incidente. Par contre, ce modèle ne peut conduire à l'idée du laser, car il prédit que lorsqu'une onde traverse un milieu matériel, il y a toujours absorption de cette onde, et jamais amplification.

On sait depuis longtemps que les corps chauffés produisent de la lumière, mais la répartition spectrale du rayonnement, mesurée avec soin par les expérimentateurs de la fin du XIX^e siècle, ne trouve pas d'explication dans le cadre « classique » ouvert par Maxwell et Lorentz. Il revient à M. Planck, à l'orée du XX^e siècle, de faire une hypothèse *a priori* totalement saugrenue, mais qui permet de « sauver les apparences », c'est-à-dire de retrouver les résultats expérimentaux : les échanges élémentaires d'énergie entre la lumière et la matière ne peuvent se produire que par « sauts » d'amplitude $h\nu$.

A. Einstein montre en 1905 que l'entropie du rayonnement thermique, calculée à partir de la formule trouvée par Planck, est similaire à celle d'un gaz de particules indépendantes. Il en déduit que la lumière elle-même doit être faite de « quanta », qui seront appelés en 1926 « photons » par G. Lewis. Il est conscient que cette hypothèse corpusculaire

Article proposé par :

Claude Fabre, fabre@spectro.jussieu.fr

Laboratoire Kastler Brossel, UMR 8552, CNRS / UPMC / ENS Paris / Collège de France, Paris

pour la lumière pose plus de problèmes qu'elle n'en résout, parce qu'elle apparaît difficilement compatible avec les multiples preuves de son caractère ondulatoire (diffraction, interférences...) accumulées tout au long du XIX^e siècle.

En 1913, N. Bohr fait l'hypothèse que les niveaux d'énergie des atomes sont quantifiés, et que l'on passe d'un niveau atomique à un autre par absorption ou émission de photons individuels. Son approche, en totale contradiction avec la physique classique, est acceptée par la communauté car ses prédictions concernant l'hydrogène sont en remarquable accord avec les données expérimentales. En 1917, Einstein précise et approfondit cette approche nouvelle de l'interaction matière rayonnement en introduisant un caractère probabiliste pour les processus d'absorption et d'émission de lumière par les atomes. Il introduit un processus d'« émission spontanée » de lumière par un atome non éclairé et mis dans un niveau excité, et un processus de *changement d'état par immersion dans un rayonnement* (Einstrahlung) qui peut se faire aussi bien vers un niveau atomique d'énergie supérieure que vers un niveau d'énergie inférieure. Dans ce dernier cas, le rayonnement récupère l'énergie cédée par l'atome, avec une probabilité d'autant plus grande que le rayonnement présent est intense. Grâce à ce modèle, Einstein retrouve très simplement la formule de Planck donnant la distribution spectrale du rayonnement à l'équilibre thermodynamique.

On sait que ce processus d'augmentation de l'énergie du rayonnement par désexcitation d'atomes introduit par Einstein, appelé *émission stimulée* en 1924 par J. Van Vleck, est à la base du fonctionnement du laser. La question se pose alors de savoir pourquoi il a fallu attendre encore plus de trente ans avant que les physiciens n'inventent des sources de lumière (le maser, puis le laser) basées sur cet effet physique. La découverte en sciences est l'aboutissement d'un long processus de mûrissement des concepts et des questionnements. Dans l'article de 1917, Einstein s'intéressait essentiellement au rayonnement thermique et aux échanges de quantité de mouvement dans ces différents processus, pas à la production de lumière par la matière. Mais le concept essentiel qui manquait à Einstein et à ses contemporains était celui de *cohérence*, une propriété non pas corpusculaire, mais ondulatoire de la lumière : l'émission stimulée était vue comme l'ajout de photons à des photons déjà présents, pas comme l'amplification d'une onde lumineuse monochromatique avec conservation de sa phase. C'est ce changement de paradigme qui a pris du temps. Une fois celui-ci effectué, les esprits étaient mûrs, les bases théoriques présentes et, comme c'est souvent le cas pour les grandes inventions, l'idée du maser a éclo dans le cerveau de différentes personnes, en l'occurrence ici quasi-simultanément aux USA et en URSS.

L'apport de la mécanique quantique

De Lorentz à Einstein, tous les modèles décrits jusqu'ici sont des modèles *ad hoc*, dont les hypothèses souvent hardies ne sont justifiées que par la capacité du

modèle à reproduire quantitativement un grand nombre de résultats expérimentaux à partir d'un nombre minimal de grandeurs numériques initiales (les fréquences de transition, les probabilités des processus...). La situation change radicalement dans les années 1924-1926, avec l'avènement de la mécanique quantique. Il s'agit d'une théorie cohérente, qui permet des développements dits *ab initio*, c'est-à-dire basés sur un nombre extrêmement restreint d'hypothèses et de grandeurs physiques, en l'occurrence la nature de l'interaction (l'hamiltonien du système), et la valeur de quelques grandeurs fondamentales.

La mécanique quantique, initialement bâtie pour décrire les propriétés de la matière, est rapidement appliquée à l'interaction matière rayonnement. La première approche utilisée consiste à appliquer les lois de la mécanique quantique au système formé d'un atome quantifié mis en présence d'une onde électromagnétique classique. Elle ne fait donc pas appel à la notion de photons. Cette approche, enseignée dans tous les cours de base de mécanique quantique, est habituellement appelée *théorie semi-classique*, mais on pourrait aussi bien la qualifier de *théorie semi-quantique*. Elle permet de calculer les probabilités de transition entre niveaux atomiques sous l'effet de la lumière, ainsi que les caractéristiques précises de l'effet photo-électrique et des phénomènes d'absorption et d'émission stimulée. Elle montre en particulier que ce dernier phénomène existe non seulement pour le rayonnement thermique, par nature incohérent car s'étendant sur une très large gamme spectrale, mais aussi pour une onde électromagnétique incidente monochromatique. Un ensemble d'atomes excités constitue donc un amplificateur cohérent d'ondes lumineuses.

P.A.M. Dirac, P. Jordan et W. Pauli appliquent dès 1928 le formalisme quantique au champ électromagnétique lui-même, donnant ainsi naissance à l'*Electrodynamique Quantique* (EDQ). Ils montrent que l'énergie du champ libre est quantifiée, et que les états quantiques du champ d'énergie donnée possèdent un caractère corpusculaire. L'EDQ donne ainsi des bases théoriques solides à la notion de photon. Les processus d'absorption, d'émission stimulée, de diffusion... y trouvent une description simple en termes de photons détruits ou créés, avec des probabilités dont les valeurs s'avèrent identiques à celles calculées par l'approche semi-classique.

A partir des années 30, les physiciens ont ainsi à leur disposition, comme au XVII^e siècle avec les travaux d'Huygens et de Newton, deux descriptions possibles de la lumière pour rendre compte des mêmes phénomènes : la théorie semi-classique, ondulatoire, permettant grâce à des calculs simples de faire des prédictions expérimentales dans un très grand nombre de situations, et l'EDQ, corpusculaire, plus complexe à utiliser, car elle implique la manipulation de quantités divergentes. Un seul phénomène, mais important, ne trouve d'explication quantitative que dans le cadre de l'EDQ : l'émission spontanée de lumière par un atome excité dans le vide.

Un détour par l'électronique

Pendant la même période, on assiste au développement rapide et spectaculaire d'un autre domaine de la physique, celui de l'*électronique* : la manipulation de faisceaux d'électrons dans des tubes à vide permet de mettre au point des dispositifs extrêmement utiles comme des amplificateurs de courant électrique. On s'aperçoit qu'en bouclant un amplificateur large bande sur lui-même (en connectant une partie de la sortie sur l'entrée), on le transforme en un oscillateur extrêmement monochromatique. Ce domaine est incontestablement poussé par les applications, en radiodiffusion, puis en détection radar, où l'on a besoin d'oscillateurs de fréquence de plus en plus élevées : le klystron et le magnétron sont mis au point à la fin des années 30. Ce domaine connaît un extraordinaire développement pendant la deuxième guerre mondiale, car de nombreux physiciens et ingénieurs sont embauchés dans les différents pays belligérants pour développer des systèmes radar de plus en plus performants. Toutes les sources mises au point dans ce cadre fonctionnent avec des faisceaux d'électrons soumis à différents champs électriques ou magnétiques, et la « mise en paquet » de ces électrons est à la base du processus d'amplification de l'onde. On se rend compte en particulier qu'il est avantageux d'utiliser des *cavités résonnantes* à la fréquence de l'onde émise pour assurer de la manière la plus efficace possible le processus de rétroaction nécessaire à la production d'une onde cohérente.

L'âge d'or de l'électronique quantique

1945 : les physiciens retournent à la vie civile. Les sources et les détecteurs radiofréquence qu'ils ont mis au point sont disponibles en grande quantité pour le plus grand profit de la recherche fondamentale : la spectroscopie « hertzienne » des molécules et des atomes, la radio-astronomie et les recherches sur la résonance magnétique connaissent un rapide développement. Au début des années 50, C. Townes aux USA, N. Basov et A. Prokhorov en URSS, cherchent à créer de nouvelles sources micro-onde en remplaçant l'amplification par faisceau d'électrons par l'amplification par émission stimulée dans des molécules. Pour réaliser leur oscillateur micro-onde « quantique », ils ont l'idée d'introduire des molécules excitées dans une cavité micro-onde résonnante pour la fréquence de transition de la molécule. Le fait que pratiquement la même idée surgisse simultanément en des lieux très éloignés n'est pas si étonnant, car ces physiciens travaillaient dans des laboratoires (Columbia à New York, Lebedev à Moscou) intéressés par les mêmes questions et avaient des cursus parallèles de recherches sur les ondes radiofréquence et en spectroscopie moléculaire. Les travaux expérimentaux de Townes avançaient vite malgré le scepticisme de beaucoup, dont celui de N. Bohr, qui était



Figure 1 – Les chercheurs américains et soviétiques à l'origine du maser, puis du laser, se rencontrent pour la première fois en 1959 aux USA à la première conférence d'Electronique Quantique. De gauche à droite : J. Gordon, N. Basov, H. Zeiger, A. Prokhorov, C.H. Townes. Crédit : Lawrence Berkeley National Laboratory, courtesy E. Segre Visual Archives.

peu familier des avancées de l'électronique et n'arrivait pas à admettre que la cohérence de phase de l'oscillateur puisse subsister sur une durée plus longue que la durée de vie du niveau excité. En 1954, le premier MASER fonctionne à l'Université Columbia de New York.

Pour réaliser l'inversion de population indispensable à l'émission stimulée, Townes, Basov et Prokhorov ont l'idée d'utiliser une séparation spatiale des molécules excitées de type Stern-Gerlach, dispositif efficace mais peu pratique. D'autres physiciens montrent qu'on peut manipuler beaucoup plus simplement les populations des différents niveaux grâce à un éclairage judicieux des atomes ou molécules par un rayonnement incident excitateur. En 1949, A. Kastler et J. Brossel mettent au point le « pompage optique », basé sur l'utilisation de lumière polarisée circulairement pour peupler de manière sélective certains sous-niveaux Zeeman des atomes. E. Purcell et R. Pound, dans leurs recherches sur la résonance magnétique nucléaire, montrent en 1951 que le rayonnement radiofréquence permet de créer des échantillons de « températures négatives », c'est-à-dire présentant une inversion de population. En 1954, N. Bloembergen, ainsi que Basov et Prokhorov ont l'idée du *maser à trois niveaux* qui permet, en illuminant de manière appropriée un solide comme un cristal de Rubis, de réaliser une inversion de population entre certains de ses niveaux. Ce type de maser, réalisé pour la première fois en 1957 aux laboratoires Bell, est un dispositif « tout-solide » d'utilisation beaucoup plus aisée que les masers initiaux. Il sera en particulier très utilisé comme amplificateur à très faible bruit.

Le mariage des méthodes de l'électronique et des propriétés quantiques de la matière a ainsi donné naissance à un nouveau domaine : l'*électronique quantique*, qui connaît un extraordinaire développement dont nous n'avons esquissé que quelques étapes. Beaucoup de chercheurs se posent en particulier la question d'étendre le domaine spectral de ces nouvelles sources vers les petites longueurs

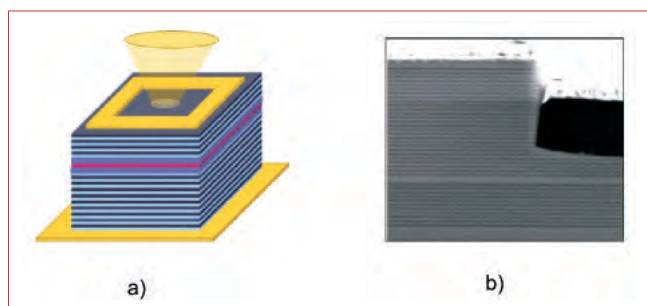


Figure 2 – Laser VCSEL : a) schéma simplifié. La région occupée par le milieu amplificateur est en rouge, les miroirs en bleu et les couches métalliques permettant d'apporter le courant nécessaire pour créer l'inversion de population en jaune. Le cône inversé jaune figure le faisceau lumineux émis. b) photo d'une coupe du VCSEL. La hauteur totale du dispositif est de 3 micromètres.

d'onde, c'est-à-dire de réaliser un *maser optique*. En 1957 C. Townes et A. Schawlow aux laboratoires Bell, G. Gould à Columbia, et A. Prokhorov au Lebedev, ont l'idée d'utiliser pour la rétro-action une cavité résonnante ouverte de type Fabry-Perot, car une cavité résonnant sur son mode fondamental – comme celle utilisée dans un maser – doit avoir, dans le domaine optique, une taille inférieure au micromètre, inaccessible aux techniques de l'époque. Il faudra attendre le développement des nanotechnologies pour réaliser de telles cavités, qui sont utilisées maintenant dans les lasers à semi-conducteur de type VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser).

La publication de l'article théorique de Townes et Schawlow déclenche alors une « course au laser », à laquelle participent de nombreux laboratoires. Elle est gagnée par un outsider, T. Maiman, qui a l'idée de réaliser une source impulsionnelle et non pas continue, pour laquelle les conditions d'oscillation ne sont réalisées qu'en régime transitoire. Le laser à Rubis qu'il met au point est un dispositif étonnamment simple de construction et d'emploi. Dans les années suivantes, un très grand nombre de lasers, continus ou pulsés, sont mis au point en très peu de temps, grâce aux données et au savoir-faire accumulés patiemment pendant des décennies par les spectroscopistes. Ces lasers sont ensuite graduellement améliorés en performances, en rendement et en facilité d'emploi.

Le laser : un outil pour les applications et pour la recherche fondamentale

L'histoire que nous venons de tracer à grands traits montre que la recherche d'applications n'a pas joué un rôle très important dans la mise au point du laser, même si tous les physiciens qui ont contribué à ce processus devaient certainement avoir en tête qu'une source aussi

révolutionnaire était riche d'applications possibles. G. Gould, l'inventeur du mot « LASER », a été le seul à mettre en avant dès le début le rayon laser comme un concentré d'énergie lumineuse et à faire miroiter la possibilité de multiples applications, en particulier militaires. Il obtint un financement auprès de l'armée américaine dès 1959. La conséquence fut plutôt négative : sa recherche fut classifiée, et l'absence d'interaction avec la communauté des physiciens ralentit sérieusement la progression de ses investigations.

Nous ne détaillerons pas ici les multiples applications industrielles du laser qui ont été progressivement développées et ont connu le succès que l'on sait. L'industrie n'a pas seule tiré profit de ce nouvel outil. La recherche fondamentale, qui avait été à l'origine de l'invention du laser, a bénéficié par un juste retour des choses des possibilités nouvelles ouvertes par les extraordinaires propriétés de la lumière laser : celle-ci fournit une énergie qui peut être focalisée sur une zone micrométrique, concentrée temporellement dans des impulsions de quelques femtosecondes, propagée sous la forme d'un faisceau parallèle sur des centaines de milliers de kilomètres, concentrée spectralement en un faisceau extrêmement monochromatique, de largeur spectrale relative meilleure que 10^{-12} . Bien souvent, les physiciens ont dû développer par eux-mêmes des sources laser qui répondent à leurs besoins précis de recherche. Certains de ces objets de laboratoire ont été développés industriellement et commercialisés par la suite. Mais souvent aussi, de nouvelles recherches fondamentales ont été rendues possibles par la mise sur le marché par les industriels de sources laser simples

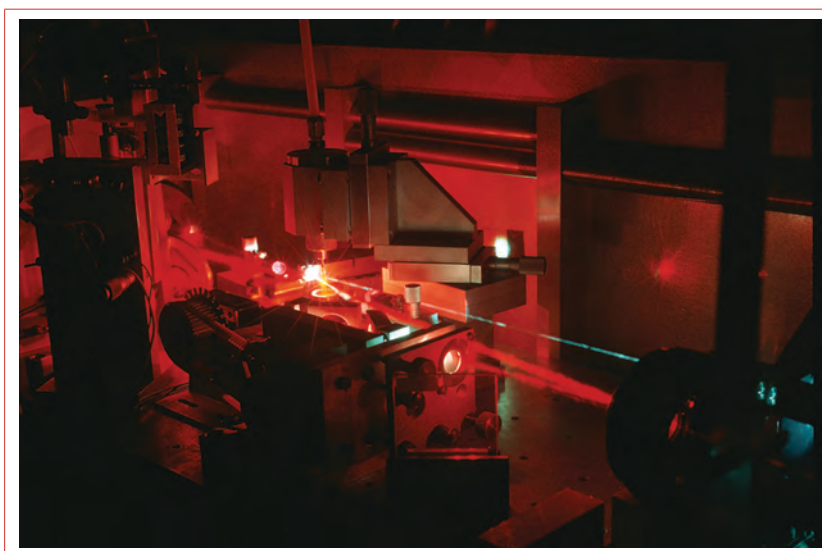


Figure 3 – Laser à colorant : Le faisceau bleu à droite, issu d'un laser dit « de pompage » (non visible sur la photo), est focalisé sur un jet vertical de colorant liquide (point blanc intense) et produit l'inversion de population dans les molécules de ce colorant. Le faisceau rouge est celui du laser à colorant à l'intérieur de la cavité laser dont on voit des miroirs au premier plan. Le faisceau de sortie, beaucoup moins intense que le faisceau intracavité, est visible à droite de ce miroir. Ce type de laser, fabriqué et utilisé dans les laboratoires de recherche, puis fabriqué commercialement, présente l'intérêt de produire une lumière très monochromatique accordable sur un large domaine de longueurs d'onde. Il a régné sur la spectroscopie de précision dans les années 80, avant d'être supplanté par le laser « Saphir-Titane », utilisant un cristal dopé au lieu d'un colorant liquide comme milieu amplificateur. © CNRS photothèque / Delhaye Claude.

d'utilisation et dont les performances ne pouvaient être atteintes par des lasers fabriqués au laboratoire. On a là un exemple de la dynamique complexe et à double sens des relations entre recherche fondamentale, recherche appliquée et développement industriel et commercial.

La spectroscopie a été un des premiers domaines de recherche qui a beaucoup progressé grâce au laser, surtout à partir de la fin des années 60, lorsque des lasers de longueur d'onde ajustable et de largeur spectrale de plus en plus fine ont été mis au point. Des gains impressionnants dans la précision des mesures spectroscopiques ont été réalisés : on peut donner ici comme exemple la spectroscopie de l'atome d'hydrogène, si importante pour tester avec la plus grande précision possible les fondements de la physique quantique. Les précisions relatives sont passées en quarante ans de 10^{-8} à 10^{-14} , et la fréquence de la transition 1s-2s de l'hydrogène est de loin la quantité physique la mieux déterminée expérimentalement de nos jours. Ces progrès dans la spectroscopie ont stimulé des avancées importantes dans la compréhension toujours plus détaillée de la structure de la matière, au niveau atomique, moléculaire ou solide.

Les physiciens ont très vite tiré avantage du très fort éclairage d'un faisceau laser : celui-ci peut en effet induire des effets non-linéaires dans la matière, qui étaient hors d'atteinte avec les sources optiques plus anciennes comme le rayonnement thermique ou les tubes à décharge. De nombreux nouveaux phénomènes optiques fascinants, comme les processus multiphotoniques ou les miroirs à conjugaison de phase, ont été découverts, ouvrant une branche nouvelle de la physique, appelée optique non-linéaire et couronnée en 1981 par le prix Nobel attribué à N. Bloembergen.

Parallèlement au développement des lasers de plus en plus monochromatiques, on a assisté au développement de lasers aux impulsions de plus en plus courtes, qui tous deux n'ont été possibles que grâce à une impressionnante accumulation, sur des décennies, de savoirs-faire et d'astuces expérimentales. Des impulsions dans le domaine de la femtoseconde, puis plus récemment de l'attoseconde, ont pu être produites. Elles sont maintenant utilisées pour étudier et orienter la dynamique ultra-rapide de différents processus physiques au niveau des atomes, des molécules ou de la matière condensée. La production d'impulsions toujours plus brèves s'accompagne de la génération de puissances instantanées toujours plus grandes, c'est-à-dire de champs électriques lumineux très intenses qui bouleversent complètement la dynamique de la matière pendant son illumination.

D'une manière plus générale, l'irradiation de la matière par un certain nombre de faisceaux lasers que l'on peut ajuster très précisément en fréquence, durée et intensité permet de contrôler avec une extrême précision les processus microscopiques qui s'y produisent, et de manière ultime l'état quantique précis dans lequel se trouve la matière. On peut par exemple créer de la sorte des ensembles atomiques séparés spatialement, mais

cependant « quantiquement intriqués », c'est-à-dire descriptibles uniquement par un état quantique global, donc non local. Cette interaction matière-lumière parfaitement maîtrisée permet de modifier non seulement la matière, mais aussi la lumière. Par exemple, en irradiant certains milieux matériels par un champ laser convenablement ajusté en fréquence, on peut faire en sorte qu'une impulsion lumineuse s'y propage à une vitesse extrêmement faible, de l'ordre de quelques dizaines de mètres par seconde !

Comme Einstein l'avait prédit dès 1917, l'illumination d'un atome conduit à des échanges d'énergie mais aussi d'impulsion entre lumière et matière. Un faisceau laser induit donc des forces radiatives sur la matière, qui peuvent être ajustées à volonté en contrôlant précisément les caractéristiques de l'irradiation. On peut ainsi porter la matière illuminée à des millions de degrés, ou au contraire ralentir, piéger et refroidir jusqu'au nanoKelvin des ensembles d'atomes ou de molécules. Ce domaine de recherche a été extrêmement fructueux dans les dernières décennies, et a conduit par exemple à la production de gaz quantiques dégénérés comme les condensats de Bose-Einstein d'atomes dilués.

La dualité onde-corpuscule de la lumière et le développement de l'optique quantique

Revenons pour finir à la question de la nature corpusculaire et/ou ondulatoire de la lumière que nous avons évoquée au début de cet article. La lumière produite par un laser est un archétype de *dualité onde-corpuscule* : c'est un phénomène « corpusculaire » de par sa naissance, liée à l'émission stimulée de photons, un photon étant émis chaque fois qu'un atome se désexcite ; mais par sa très grande cohérence, c'est aussi l'incarnation idéale de l'onde lumineuse, avec laquelle il est très facile de réaliser des expériences d'interférence ou de diffraction. De fait la description en termes quantiques de la lumière laser a fait l'objet d'un long débat, auquel R. Glauber a apporté des contributions décisives, qui lui ont valu le prix Nobel 2005.

Les progrès incessants, conceptuels et expérimentaux, des connaissances sur les ondes électromagnétiques ont permis de faire avancer le débat sur la nature exacte de la lumière. Celui-ci rebondit en effet dans les années 50 avec la découverte de l'*effet Hanbury-Brown et Twiss*. Ces deux radio-astronomes ont l'idée de s'intéresser aux *propriétés statistiques du rayonnement électromagnétique*, et de mesurer les corrélations entre les fluctuations de l'intensité du rayonnement mesurées en deux points différents. Un calcul semi-classique, naturel pour des ondes radios, manifestement « ondulatoires », montre qu'il y a un pic dans la fonction de corrélation autour de l'écart de temps nul, pic dûment observé sur les ondes émanant des radio-sources astronomiques et dont le contraste permet de déduire le diamètre angulaire de la zone d'émission.

En 1956, les deux chercheurs passent des ondes radio à la lumière visible et montrent qu'on observe le même pic sur la corrélation entre signaux de comptage de photons produits par une source thermique. Cela veut dire que dans la lumière produite par ces sources, les photons ont tendance à se regrouper, à se mettre en paquets, ce qui est contraire à l'intuition, l'idée première d'une source lumineuse étant qu'elle produit des photons au hasard et de manière non corrélée. Cette expérience provoqua une importante controverse, certains invoquant le principe d'incertitude pour refuser un tel effet de *groupement de photons*. Il fallut une analyse quantique précise, faite au début des années 60, du processus de photodétection et de l'état de la lumière produit par différentes sources lumineuses, pour obtenir une explication quantique cohérente du phénomène. Une fois encore, un phénomène optique, portant maintenant sur la statistique du rayonnement, avait une double explication, dans le cadre de la théorie semi-classique et dans celui de l'électrodynamique quantique, c'est-à-dire en termes ondulatoires et en termes corpusculaires.

L'analyse théorique montrait en particulier que le phénomène de groupement de photons se produisait pour le rayonnement thermique, mais pas pour la lumière d'un laser très au dessus de son seuil d'oscillation, dans laquelle les photons sont effectivement répartis de manière totalement aléatoire, donc selon une loi de Poisson. Ces prédictions furent confirmées par plusieurs expériences effectuées à partir de 1965. L'évolution de la statistique des photons au voisinage du seuil de l'oscillation laser y fut étudiée en détail et trouvée conforme aux modèles théoriques du fonctionnement du laser, aussi bien semi-classiques que purement quantiques.

L'histoire ne s'arrête pas là : on se rendit rapidement compte qu'un faisceau lumineux, dans lequel les photons sont séparés temporellement les uns des autres, présentait un phénomène dit de *dégroupement*, c'est-à-dire qu'il était caractérisé par un *creux* au lieu d'un pic dans la fonction de corrélation d'intensité pour un écart de temps nul, et que *la théorie semi-classique ne pouvait pas rendre compte de ce phénomène*. La première expérience mettant en évidence un tel effet de dégroupement fut réalisée en 1977 à Rochester par P. Mandel et ses collaborateurs, et l'effet fut alors observé sur la lumière produite par l'émission spontanée d'atomes de sodium isolés excités par laser. En effet, il faut un temps non nul pour qu'un atome qui vient d'émettre un premier photon – et qui se trouve donc dans son état fondamental – soit ré-excité et émette un nouveau photon. Un atome isolé continuellement soumis à un laser excitateur résonnant est donc une source de photons bien séparés temporellement les uns des autres, c'est-à-dire dégroupés. Cette expérience mémorable constitua le premier exemple de production

de lumière « non-classique », c'est-à-dire de lumière dont les effets ne peuvent pas être compris à la fois en termes ondulatoires et corpusculaires, et pour laquelle on a absolument besoin de l'attirail complet de l'électrodynamique quantique. Depuis cette époque, bien d'autres effets purement quantiques ont été mis en évidence sur la lumière, dont l'étude est maintenant regroupée sous le nom d'*optique quantique*. Ces effets se manifestent essentiellement sur les propriétés statistiques des grandeurs caractérisant la lumière, en particulier sur les corrélations entre différentes quantités fluctuantes, comme dans l'expérience d'Hanbury-Brown et Twiss. Pour produire de la lumière non-classique, on a besoin des lasers qui seuls permettent une interaction parfaitement maîtrisée entre la matière et la lumière, et souvent aussi d'émetteurs quantiques individuels. Les effets multiphotoniques d'optique non linéaire induits par des lasers que nous avons évoqués précédemment sont aussi bien souvent nécessaires pour produire de tels états.

Le laser lui-même fait l'objet de recherches fondamentales concernant son fonctionnement et les caractéristiques de la lumière qu'il émet. H. Haken montre en 1975 que certains lasers peuvent avoir un comportement chaotique. Dans les années 80, on montre qu'un laser peut émettre un état non-classique de la lumière si, pour réaliser l'inversion de population, on utilise un processus suffisamment régulé. Dans un tel laser, qualifié de « laser sub-Poissonien », les photons contenus dans le faisceau sont eux-mêmes répartis de manière plus régulière que dans un faisceau laser habituel. Cet effet a été mis en évidence expérimentalement en 1990 par Y. Yamamoto sur un laser à semi-conducteur dont le

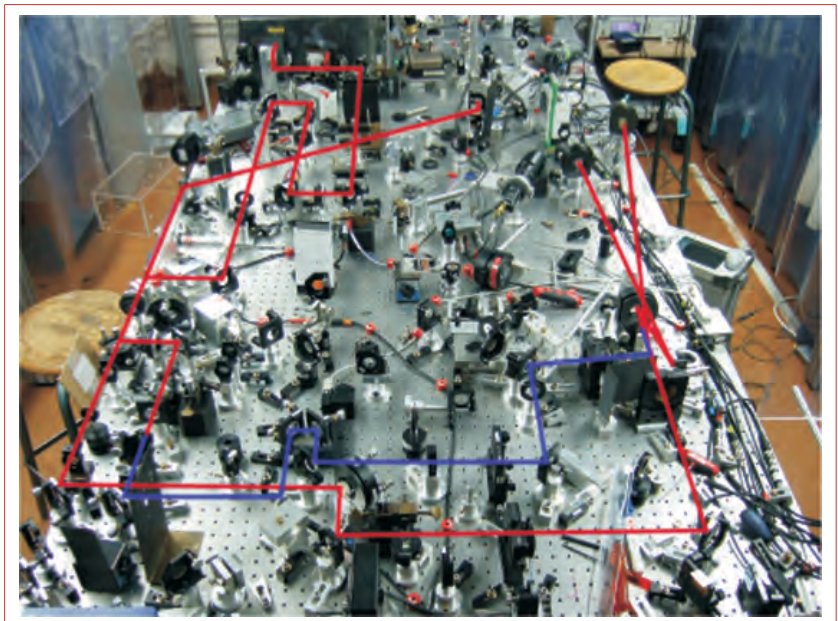


Figure 4 – Photographie d'une expérience d'optique quantique de réduction des fluctuations quantiques d'impulsions lumineuses femtoseconde, dans le but de synchroniser des horloges atomiques distantes de manière ultra-précise. Elle utilise un laser commercial (coin supérieur gauche) générateur d'impulsions ultracourtes infrarouges (non visibles, matérialisées par les traits rouges). Ces impulsions produisent différents effets d'optique non linéaire comme le doublage de fréquence ou l'interaction paramétrique dans des cristaux (aux points où faisceaux bleu et rouge sont en contact au premier plan), qui permettent de manipuler les fluctuations quantiques de la lumière (cliché LKB).

courant d'injection présentait de faibles fluctuations d'intensité. Enfin un domaine de recherche très actif, appelé *l'électrodynamique quantique en cavité*, s'intéresse aux propriétés du *laser ultime*, formé d'un atome unique inséré dans une cavité de très grande finesse. Dans un tel système, il n'est pas possible de factoriser l'état quantique décrivant le système en une partie atomique et une partie champ électromagnétique, qui forment un tout indémêlable et totalement corrélé, dont les propriétés sont exploitées dans des expériences spectaculaires. Par exemple, en mesurant l'état de l'atome lorsqu'il est sorti de la cavité, on peut en déduire l'état quantique des photons présents dans la cavité sans les perturber, et ainsi observer en direct les « sauts quantiques » successifs effectués par l'état du champ électromagnétique.

Dans les années récentes, on a assisté à un développement impressionnant de l'optique quantique. Une voie très étudiée est celle de la production d'états de la lumière de plus en plus « quantiques », dont les propriétés s'éloignent toujours plus de ce que prédit la physique classique. La production d'*états intriqués* de la lumière, et la mise en évidence par R. Fry, A. Aspect et A. Zeilinger d'une violation de l'inégalité de Bell, preuve de la non-localité de l'état créé, a constitué une étape importante dans cette évolution. Des méthodes toujours plus efficaces de production de photons isolés sont sans cesse mises au point. Des états aussi exotiques que les « chatons de Schrödinger », superpositions linéaires d'états quantiques très différents, sont actuellement activement étudiés. La perspective d'utiliser les états quantiques ainsi produits dans un hypothétique futur « ordinateur quantique » a été un facteur de développement rapide du domaine. Dans toutes ces expériences, les lasers sont à l'œuvre et utilisés au mieux de leurs extraordinaires possibilités.

Conclusion

Cette brève et très incomplète histoire de la physique des lasers, ou plutôt de la physique autour des lasers, atteste de l'impact extraordinaire qu'a eu l'invention du laser sur les progrès de la physique, même dans ses aspects les plus fondamentaux. Elle illustre les rapports complexes et mutuellement fructueux qu'entretient une discipline scientifique fondamentale avec les progrès technologiques. Elle montre que les percées décisives se produisent à partir d'un terreau patiemment accumulé par des chercheurs animés de leur seule curiosité scientifique, ainsi que l'importance de l'interdisciplinarité pour faire émerger les concepts innovants. En retour la technologie nouvelle issue de ces avancées permet aux chercheurs d'aller plus vite et plus loin dans le développement de la connaissance.

POUR EN SAVOIR PLUS

- M. Bertolotti, « Masers and Lasers : a historical approach », Adam Hilger (1983).
- J. Hecht, « Laser pioneers », *Academic Press* (1985).
- J. Hecht, « Beam: the race to make the laser », *Oxford University Press* (2005).
- C. Cohen-Tannoudji, « Interaction matière-rayonnement : bilan et perspectives », Cours du Collège de France, <http://www.phys.ens.fr/cours/college-de-france/2003-2004>.
- G. Grynberg, A. Aspect, C. Fabre, « Introduction to Quantum Optics », *Cambridge University Press* (2010).