

le laser, une autre lumière

quelques éléments de compréhension et aperçus sur diverses applications

extraits de la conférence en Sorbonne «le laser : une autre lumière»

donnée par M. Alain ASPECT,

sous-directeur de laboratoire au Collège de France.

Pour comprendre ce qu'est le laser

Le laser est une autre lumière. Je voudrais commencer par deux chiffres. Une lampe à incandescence à halogène délivre 500 watts de lumière. Un laser à argon ionisé coûte 400.000 F et délivre 20 watts. Cela est surprenant : d'un côté, 20 centimes du watt, et de l'autre côté nettement plus. Pourquoi les physiciens dépensent-ils de telles sommes pour acheter des engins si chers qui donnent si peu de puissance ? Précisément parce que la lumière émise par les lasers est une lumière d'une autre nature. J'essaierai de vous donner une idée de cette différence, et de vous expliquer pourquoi elle est si importante pour les physiciens.

A. ASPECT

Les 500 watts émis par notre lampe à incandescence sont répartis uniformément dans l'espace et sont dilués dans le temps : l'émission a lieu de façon continue. Si on éteint la lampe et qu'on la rallume, cela n'augmentera en rien l'éclairement obtenu pendant les phases d'éclairage. De même cette lumière est extrêmement diluée dans ce que l'on appelle le spectre des longueurs d'onde. Tout le monde sait que si l'on envoie de la lumière blanche sur un prisme, cette lumière est décomposée, la lumière blanche étant formée d'un spectre ayant toutes les couleurs. On peut dire que la densité énergétique correspondant à chaque couleur est extrêmement faible. Donc ces 500 watts sont énormément dilués. Le point clé que je vais m'efforcer de vous montrer, c'est qu'il n'existe aucun moyen pour concentrer la lumière émise par cette lampe.

Au contraire la lumière émise par un laser, ces 20 watts, peut être concentrée. D'abord dans l'espace. On peut obtenir un gain au moins égal à 10^6 . (J'ai décidé que tout le monde savait que 10^6 voulait dire 1 suivi de six zéros, c'est-à-dire 1 million). Cette lumière laser on peut éventuellement la concentrer dans le temps ; dans ce cas là si la même énergie est délivrée pendant un temps extrêmement bref et la puissance de crête au moment du maximum est très forte. Enfin cette énergie est très concentrée dans le spectre. Chacun sait que la lumière émise par un laser est monochromatique (une seule couleur).

La raison pour laquelle la lumière laser peut être concentrée est qu'elle est une source cohérente, alors que la lumière ordinaire est incohérente. **La concentration est autorisée par la cohérence.**

Ici il convient de faire un rappel d'optique classique.

Considérons le filament de tungstène de la lampe à incandescence qui a une surface de 1 cm^2 , et qui émet 500 watts. On dira que l'émittance est de 500 w/cm^2 . Si je prends un filament deux fois plus grand, je pourrais émettre 1000 watts, mais le filament aura une surface de 2 cm^2 : j'aurai toujours une émittance de 500 w/cm^2 . Ils sont émis dans tout l'espace. La question est : est-il possible de concentrer ces 500 watts sur une surface nettement plus petite ? Si on pouvait le faire, on pourrait atteindre des régimes intéressants pour la physique. On pourrait avoir des densités d'énergie (qu'on appelle l'éclairement) beaucoup plus grandes. La réponse de l'optique classique est formelle : il est impossible d'obtenir un éclairement supérieur à l'émittance initiale de

la lampe. Autrement dit : vous ne pourrez pas concentrer ces 500 watts sur une surface inférieure à 1 cm^2 et ceci est une limitation fondamentale. Je ne peux vous le démontrer, je vais essayer de l'illustrer.

Vous avez deux solutions pour essayer de concentrer la lumière de votre source. La première est de mettre une lentille près de la source (solution d'un projecteur de théâtre) : une lampe, une grosse lentille, et on braque le projecteur sur l'acteur. Que se passe-t-il ? Vous avez à distance une image agrandie. Vous n'avez pas utilisé la totalité de vos 500 watts, et votre image étant agrandie, ces 500 watts sont dilués sur une surface plus grande. Résultat : l'éclairement obtenu sur l'image est nettement inférieur à l'émittance initiale. Pour un projecteur de théâtre à 10 mètres, vous n'obtiendrez plus que $0,1 \text{ watt par cm}^2$. L'éclairement n'a manifestement pas augmenté.

La deuxième solution est de mettre une lentille de courte distance focale loin de la source. On a alors une image très petite de la source, avec une bonne concentration de l'énergie. C'est ce que fait l'enfant qui concentre la lumière du soleil avec une loupe pour enflammer un morceau de papier. Ici, l'éclairement obtenu est nettement plus élevé, mais on peut montrer qu'au mieux il atteindra la valeur de l'émittance de la source.

Voilà une illustration du fait que, quelle que soit l'optique que vous utilisez, il est impossible d'avoir un éclairement supérieur à l'émittance initiale.

Avec un faisceau laser cela se passe différemment. Les 20 watts sont émis dans un faisceau collimaté. On peut évaluer la divergence due à un phénomène physique fondamental : la diffraction. Lorsqu'on fait le calcul, on trouve par exemple que pour un faisceau d'1 mm de diamètre on obtient une divergence de $0,5 \times 10^{-3}$ radians, de l'ordre d'une minute d'angle. Ce faisceau laser produit à 10 mètres une tache pas plus grosse que 5 mm. Donc, vos 20 watts, qui avaient l'air ridiculement faibles au départ, sont répartis sur une petite tache ce qui donne un éclairement de 80 watts/cm^2 à 10 mètres. Vous pouvez même faire une meilleure collimation, en mettant votre laser au bout d'un télescope fonctionnant à l'envers : le faisceau sortant du télescope est très bien collimaté. On l'a fait, et braqué le télescope vers la Lune : la divergence est si faible que la tache du faisceau laser, à l'arrivée sur la Lune, a un diamètre qui ne dépasse pas 150 mètres ! Quand vous calculez l'éclairement que cela représente, il est équivalent à celui des nuits de pleine Lune. Un

A. ASPECT

faisceau de 20 watts braqué depuis la Terre vers la Lune avec un télescope permet d'y lire le journal ! Ceci est tout à fait remarquable.

On peut faire plus extraordinaire. Au lieu d'éclairer un objet très lointain, on peut au contraire concentrer à très courte distance. Au lieu du télescope, on peut utiliser un microscope. Là, vous obtenez une tache, limitée par la diffraction, dont la dimension typique est de l'ordre de la longueur d'onde de la lumière, plus petite qu'un micron (un millième de millimètre). A ce moment là vos 20 watts sont vraiment très concentrés, et quand vous calculez l'éclairement, vous trouvez une valeur considérable : $2 \cdot 10^9 \text{ W/cm}^2$ (2 milliards de watts par cm^2). Cet éclairement formidable permet d'obtenir des échauffements intenses et localisés. Ceci donne lieu à toute une série d'applications médicales et industrielles. Bernard Decomps vous parlera des applications médicales. Les applications industrielles, c'est par exemple la découpe des tissus pour l'industrie du prêt-à-porter, découpe plus rapide qu'avec des ciseaux.

Du point de vue du physicien, un éclairement extrêmement fort veut dire que l'on a des champs électriques élevés avec lesquels on accède à des phénomènes physiques inconnus auparavant : optique non linéaire, ionisation multiphotonique...

Enfin, l'application certainement la plus répandue au monde à l'heure actuelle: la possibilité de concentrer sur 1 micron^2 les quelques milliwatts d'une diode laser, ce qui va permettre de décoder l'information enregistrée sous forme de petits points de dimension de l'ordre du micron. J'ai parlé du lecteur de disques compacts.

Dans mon introduction j'ai prononcé le mot : source cohérente ou incohérente. C'est ce concept de cohérence qui est à la base de l'impossibilité de concentrer la lumière d'une source ordinaire, contrairement à la source laser.

Quand on dit qu'une source ordinaire est incohérente, cela veut dire que cette source contient en réalité des atomes, chaque atome émettant de la lumière parce qu'il a été excité. Une source est incohérente parce que chaque atome émet pour son propre compte, indépendamment du voisin. L'éclairement est la somme des éclairissements émis par chacun des atomes de la source. Si vous voulez augmenter votre éclairement, vous mettez de nouveaux atomes à côté des précédents, et vous ajoutez les éclairissements obtenus, technique qui manque de finesse.

Dans la source laser cette addition est plus astucieuse. Les atomes émetteurs

sont cohérents, c'est-à-dire synchronisés. Si je considère un atome, chacun émet une onde que l'on peut considérer comme sphérique, émise dans toutes les directions de l'espace, mais toutes les ondes émises par tous les atomes sont synchronisées, on dit qu'elles sont cohérentes. Si je prends en compte les additions de toutes les ondes cohérentes, j'ai un phénomène du type interférence ; il existe une direction où toutes ces ondes sont en phase et leur effet vient se renforcer considérablement, alors que dans d'autres directions de l'espace ces diverses ondes n'arrivent pas en phase. Pour ceux qui se souviennent d'avoir entendu parler d'interférence il y a des endroits où l'on obtient des franges brillantes (là où les vibrations s'ajoutent) et d'autres endroits où l'on obtient des franges sombres (là où les vibrations se neutralisent). **Dans une source laser, les vibrations s'ajoutent de façon cohérente et efficace dans une direction de l'espace, et elles se neutralisent dans pratiquement toutes les autres.**

Je peux préciser cela de la façon suivante : supposons deux atomes émetteurs synchronisés. Il existe des directions où l'on a les franges brillantes c'est-à-dire d'éclairement plus fort, et des franges sombres. L'une de ces directions se trouve sur la médiatrice du segment qui joint les deux atomes émetteurs. Si je change la distance des deux atomes, le lobe central ne change pas, par contre la position des autres lobes change. Si je mets beaucoup d'atomes le seul lobe renforcé est le lobe central. On arrive à l'expression suivante : l'éclairement dans la direction favorisée n'est pas égal à n fois l'éclairement d'un seul atome mais à n^2 , n étant le nombre d'atomes. C'est le miracle de l'addition cohérente. Autrement dit si j'ai mille atomes j'ai un éclairement mille fois plus grand dans l'addition incohérente, et un million de fois plus grand dans l'addition cohérente. Sur l'axe, le faisceau laser va avoir un éclairement fantastiquement plus grand. Hors de l'axe, l'éclairement est nul. On a donc un faisceau très collimaté, ce qui est une autre qualité liée à la cohérence.

Je vais essayer de vous parler maintenant du fonctionnement du laser. Le fonctionnement du laser ne peut être bien compris que si l'on comprend les mécanismes d'émission et d'absorption de la lumière par la matière.

L'émission

Il faut que j'introduise quelques notions. D'abord, celle d'émission spontanée. On sait qu'un atome possède des niveaux d'énergie. L'un est plus bas que tous les autres, on l'appelle le niveau fondamental, et puis il y a les niveaux excités. Si, au moyen d'un processus quelconque, je porte l'atome dans un niveau excité, il peut

A. ASPECT

se désexciter en émettant une onde dont la fréquence est donnée par la relation de Bohr : $\nu_0 = \Delta E/h$. Il y a donc émission d'une onde à une fréquence qui est bien déterminée, mais le point essentiel est que cette onde est émise dans une direction quelconque, avec une phase quelconque, et une polarisation quelconque. Dans une source ordinaire il n'y a que de l'émission spontanée, et les divers atomes ne coopèrent pas : l'émission est incohérente. Il existe un deuxième mécanisme d'émission, qui est moins intuitif, et qui avait été prévu par Einstein dès 1908 : l'émission stimulée. Reprenons notre atome dans son état excité, en faisant quelque chose en plus : nous envoyons sur cet atome une onde incidente avec une fréquence voisine de la fréquence ν_0 . Dans ces conditions, l'atome a de fortes chances d'émettre, par émission stimulée, une onde qui a des propriétés directement liées aux propriétés de l'onde incidente : la fréquence sera égale à la fréquence ν_0 de l'onde incidente, la direction sera la même que celle de l'onde incidente, la phase sera la même, ainsi que la polarisation.

Supposons maintenant qu'au lieu d'avoir un seul atome en état excité, j'aie n atomes dans l'état excité, soumis à la même onde incidente. Comme chacun des atomes va émettre une nouvelle onde qui est parfaitement synchronisée à l'onde incidente tous les atomes vont émettre en synchronisme : l'émission est cohérente. Ceci est bien sûr la clé du laser puisque comme je vous l'ai expliqué c'est cette synchronisation entre les émissions qui donne la très grande directivité.

L'absorption.

Il faut encore que je vous parle du mécanisme d'absorption, troisième mécanisme d'interaction entre la lumière et la matière. L'absorption est exactement l'inverse de l'émission stimulée. L'atome étant dans son état fondamental, on l'éclaire avec une onde incidente de fréquence voisine de la fréquence de Bohr. L'atome a une forte chance d'être excité, et s'il est excité il faut bien qu'il prenne l'énergie quelque part : il la prélève à l'onde incidente qui est donc atténuée. C'est le mécanisme d'absorption.

Bilan

Essayons de faire le bilan entre l'absorption et l'émission stimulée : si les atomes sont dans l'état fondamental, il y a absorption ; s'ils sont dans l'état excité,

il y a émission stimulée. Si j'ai un milieu avec un certain nombre d'atomes dans l'état fondamental et les autres dans l'état excité, on doit faire le bilan : s'il y a davantage d'atomes dans l'état excité, l'émission stimulée sera prédominante, et il y aura amplification de l'onde. La lumière émise, résultant de l'addition cohérente des émissions atomiques élémentaires, est la lumière laser : *light amplification by stimulated emission of radiations*, c'est-à-dire *amplification de lumière par émission stimulée*

(....)

Applications diverses du laser

A partir de la concentration dans le spectre.

De nombreuses applications sont liées au caractère monochromatique de la lumière laser : (la fréquence est très bien déterminée).

En **spectroscopie**, le fait de disposer du laser permet de faire des analyses à distance. Vous envoyez un faisceau laser dans l'atmosphère, et à plusieurs kilomètres de distance vous pouvez analyser l'atmosphère, voir s'il y a des polluants, mesurer la couche d'ozone. Pour ce fameux trou d'ozone, que font les scientifiques à l'heure actuelle ? Ils installent leurs lasers aux pôles, et ils auscultent la couche d'ozone. Il y a quelques années on lançait un ballon tous les deux mois et on mesurait lors de l'ascension. Avec les lasers, on suit cela en continu, 24h/24.

On peut faire des **mesures de distances** très précises. On ne fait plus de triangulation : les géomètres utilisent les lasers.

On peut aussi faire des **mesures de vitesse** précises grâce à l'effet Doppler. Lorsqu'une particule en mouvement est éclairée par un laser, l'onde qui revient n'a pas tout à fait la même fréquence : en la mesurant, on détermine la vitesse.

On peut encore **mesurer des rotations** absolues, par rapport aux étoiles. Cela sert à mesurer la rotation de la Terre. Depuis Copernic et Galilée on sait que la Terre tourne. En fait, elle ne tourne pas d'une façon parfaitement régulière et les

A. ASPECT

géophysiciens veulent connaître les moindres irrégularités de cette rotation : les lasers permettent cette mesure.

Ils sont aussi utilisés pour la navigation des avions : jusqu'à récemment, les longs courriers étaient équipés de centrales à inertie, avec des gyroscopes mécaniques. Ces appareils sont désormais remplacés par des gyromètres à laser, beaucoup plus fiables.

Enfin les horloges du futur : j'ai déjà parlé d'horloges qui auraient des précisions de 10^{-18} . Les horloges actuelles à césium ont des précisions de 10^{-13} . Nous pouvons à évaluer un ordre de grandeur correspondant à cette précision : une horloge atomique à césium qui aurait été mise en marche à l'époque de Cro-Magnon n'aurait pas une erreur supérieure à une seconde ! Une telle précision est-elle utile ? France Télécom est en train de s'équiper en horloges atomiques à césium, car pour le nouveau réseau de télécommunications digitales on a besoin de synchroniser parfaitement les divers centraux téléphoniques aux six coins de la France. Les premiers physiciens atomistes à faire des horloges à césium (sous l'impulsion d'Alfred Kastler) ne se doutaient certainement pas qu'il y aurait des applications si rapides de cette nature.

A partir de la concentration dans le temps.

J'ai parlé du fait que la lumière laser est concentrée dans l'espace, et dans le spectre. Il existe en fait une dernière possibilité qui est celle de concentration dans le temps.

Un milieu laser comporte des atomes mis en inversion de population. Au lieu de laisser ces atomes émettre cette énergie sous forme d'un rayonnement laser continu, on peut empêcher ces atomes d'émettre pendant un certain temps, de sorte à accumuler cette énergie que l'on va libérer d'un seul coup. Toute l'énergie emmagasinée, au lieu d'être délivrée de façon continue, va l'être en une seule impulsion géante. La puissance de crête, qui est l'énergie divisée par le temps, va être beaucoup plus grande. Ainsi avec un simple laser à rubis, vous pouvez délivrer 10 joules. 10 joules c'est une énergie ridicule : vous pouvez échauffer 1 gramme d'eau de 2 degrés. Mais avec 10 joules d'énergie que vous arrivez à délivrer en 10 nanosecondes, vous avez une puissance de crête de 10^9 watts, un milliard de watts, 1000

mégawatts. C'est la puissance d'une grosse centrale électrique. Bien-sûr, une centrale cela marche 24/24h et 365 jours par an, alors que le laser ne marche que pendant une nanoseconde. Mais cette puissance de crête fabuleuse permet de réaliser, pendant une durée très courte, des situations exceptionnelles. Comme exemple extrême, je citerai le laser Nova -le plus gros laser existant aux U.S.A- qui délivre 10^5 joules en une nanoseconde, soit une puissance de 10^{14} watts.

Au lieu de se préoccuper de la puissance crête, on peut aussi profiter de la brièveté des impulsions. On fait des mesures de distance avec un procédé voisin du procédé radar : le LIDAR, c'est-à-dire le RADAR où lumière. On envoie une impulsion qui est réfléchiée et on mesure le temps d'aller et retour : on a ainsi une très bonne mesure de distance. C'est comme cela que l'on mesure la distance terre-lune à quelques centimètres près. Au moment de la mission Apollo, des réflecteurs ont été déposés sur notre satellite. On a donc la possibilité d'envoyer une impulsion laser vers la lune, et de détecter son reflet. On peut aussi mesurer la dérive des continents ! On se place de part et d'autre d'une faille, et on mesure la distance. Cela bouge d'1 cm par an, et c'est détectable !

On assiste actuellement à une course vers les très courtes impulsions laser. On a mis au point ce que l'on appelle le laser femtoseconde (10^{-15} seconde). L'impulsion laser la plus courte du monde a une durée de $6 \cdot 10^{-15}$ seconde. Cela ne vous dit sûrement pas grand chose : ce que je peux dire pour situer cette dimension c'est qu'en un temps aussi bref, la lumière ne parcourt que 1 micron. A quoi cela sert-il ? A ce à quoi la lumière a toujours servi : à observer les phénomènes très rapides. A la fin du 19ème siècle, quand les physiciens voulaient étudier les phénomènes acoustiques trop rapides pour être suivis à l'oeil, que faisaient-ils ? Ils envoyaient des éclairs au moyen de miroirs tournants ou d'obturateurs, grâce à quoi ils figeaient le mouvement : c'est la stroboscopie. Si vous avez la chance de voir les photographies de Marey, vous constaterez qu'ainsi il a pu voir comment se décompose le galop d'un cheval, comme s'effectue la course d'un athlète. La lumière a donc toujours servi à figer et donc à observer les phénomènes trop rapides pour être observés à l'oeil nu. A l'heure actuelle, on peut observer de nombreux phénomènes rapides avec des appareils électroniques. Néanmoins, quand vous arrivez dans la gamme des 10^{-10} seconde, l'électronique ne suit plus. En revanche, les impulsions lumineuses très brèves permettent de figer les phénomènes.

Vous comprendrez sans peine que si vous combinez la possibilité de concentrer

A. ASPECT

l'énergie lumineuse dans le temps et dans l'espace, vous arrivez à des densités d'énergie absolument exceptionnelles, vous créez des plasmas très chauds. Ceci est surtout utilisé pour essayer de réaliser la **fusion thermo nucléaire** dont on pense qu'elle pourrait être une source d'énergie pour le 21ème siècle. De nombreuses recherches, aux U.S.A et en France, tentent d'obtenir cette fusion en focalisant les faisceaux de très gros lasers en impulsions, pour que la température soit suffisamment élevée et que les réactions thermo-nucléaires analogues à celles du soleil puissent s'amorcer.

Enfin, une autre application est sérieusement envisagée : il est possible que des faisceaux laser puissent permettre de réaliser des accélérateurs de particules, alors qu'on sait que les accélérateurs actuels, qui permettent de comprendre la **structure de la matière**, sont arrivés à leur terme. Le dernier en construction au CERN développe un périmètre de 20 km. Aux U.S.A, on va en construire un de 80 km de diamètre, mais au-delà ce sera l'impasse. La course au gigantisme s'arrêtera là. Au-delà, il faudra trouver de nouveaux principes. Et bien un nouveau principe à l'étude, c'est de faire «surfer» des particules sur une impulsion laser. Mais ceci est une autre affaire !

Le laser : un outil né de la recherche fondamentale.

Pour conclure je voudrais insister sur un point : le laser est un outil formidable créé de toutes pièces par la recherche fondamentale. En ce sens on peut le rapprocher du transistor : aucun bricoleur de génie n'aurait pu réaliser par hasard, dans son garage un transistor. Pour le laser il en va de même : on ne pouvait l'inventer par hasard. Il fallait avoir parfaitement compris l'interaction matière-lumière. Cette compréhension permet de mieux utiliser l'énergie, et de faire que quelques watts de lumière laser sont plus utiles que des kilowatts de lumière ordinaire. Devant le tableau de toutes ces applications, on évoque avec ironie la phrase de A. Schawlow, l'un des inventeurs du laser, qui disait vers 1970 : «*le laser est une solution à la recherche de problèmes*».

Alain ASPECT
Sous-directeur de laboratoire au Collège de France