

LES

LASERS

B.A. BA EN LASERS

QU'EST-CE QUE LA LUMIERE

LES physiciens grecs croyaient que la lumière était émise par l'œil et que les objets étaient « scrutés » à l'aide de ces rayons lumineux, de la même manière que le bâton d'un aveugle scrute les obstacles : cette conception a prévalu jusqu'à la fin du Moyen Age.

On sait aujourd'hui que la lumière est un transfert d'énergie, d'une source vers les objets. Sur la nature du transfert, deux théories totalement différentes, furent développées presque simultanément : la théorie corpusculaire de Newton, et la théorie ondulatoire de Huygens.

ONDES CONTRE PARTICULES

Isaac Newton, en 1704, décrivait la lumière comme un faisceau de particules microscopiques : l'une des raisons qui justifiaient son argument est le fait que la lumière se propage en ligne droite. Néanmoins, il reconnaissait alors, pour expliquer certains phénomènes optiques, la nécessité d'associer à ces particules matérielles des caractéristiques appartenant aux ondes.

La théorie de Newton exigeait que la vitesse de la lumière soit plus forte dans les substances solides et liquides que dans l'air, ce qui s'est avéré faux, environ 150 ans plus tard, lorsqu'on sut mesurer directement ces vitesses. Cependant, l'autorité de Newton était telle que personne ne put, alors, mettre en doute ses écrits.

La nature électromagnétique de la lumière a, depuis, été confirmée de différentes façons : nous ne mentionnerons que le déplacement des raies spectrales par effet Zeemann, ou effet Stark, la rotation du plan de polarisation par effet Faraday, et la double réfraction électrique connue sous le nom de phénomène de Kerr.

A la même époque, Christiaan Huygens publiait son « Traité de la lumière » : la lumière ne doit pas être regardée comme un mouvement de petites particules, mais comme une propagation d'ondes, analogue à la propagation des ondes sonores dans les gaz et les liquides. Or, la lumière se propage dans le vide, alors que les sons ne peuvent pas y être propagés : Huygens fut obligé de postuler l'existence d'un support spécial pour ses ondes : l'éther, qui devait être présent partout, dans le vide aussi bien qu'entre les particules de matière.

Aussi bien dans l'esprit d'Huygens que dans celui de Fresnel qui, au XIX^e siècle entraîna, par ses brillantes expériences, l'adhésion générale des scientifiques à la théorie ondulatoire de la lumière telle qu'elle avait été décrite par Huygens, la propagation de la lumière était une propagation d'énergie mécanique.

Une idée complètement différente fut développée par James Clerk Maxwell : celui-ci émit en 1867 l'hypothèse que la lumière était une onde électromagnétique. C'est de l'énergie électromagnétique et non mécanique que propage la lumière.

La lumière est maintenant considérée comme la propagation d'un vecteur électrique, associé à un vecteur magnétique.

DES PARTICULES, QUAND MEME...

La théorie particulaire de la lumière allait cependant reprendre de l'intérêt avec l'apparition de la théorie quantique.

Chaque gaz, liquide et solide est constitué de mailles microscopiques, plus ou moins ordonnées. Cette architecture microscopique est à base de molécules, reliées les unes aux autres par des forces intermoléculaires. Les molécules sont elles-mêmes constituées d'atomes, comprenant un noyau autour duquel gravitent les électrons. Chaque élément chimique (hélium, hydrogène, azote, plomb, etc.) ne contient qu'une seule espèce d'atome, et un élément diffère d'un autre élément par l'architecture de son atome « caractéristique ».

Par exemple, l'atome d'hydrogène possède un seul électron, et celui d'hélium en possède deux ; le carbone dispose de 6 électrons autour de son noyau, le fer en a 10, l'aluminium 13 et l'uranium... 92 !

La masse au repos d'un électron est égale à $9,1083 \times 10^{-31}$ kg ; sa charge électrique est égale à $1,6021 \times 10^{-19}$ Coulomb.

Le physicien Niels Henrik David Bohr émit, voici environ 60 ans, une hypothèse révolutionnaire en physique : les électrons qui tournent autour du noyau comme les

planètes autour du soleil, forment une architecture pour laquelle les lois de la physique classique ne peuvent pas être appliquées. En effet, si l'analogie avec le système solaire était justifiée et si, donc, les particules de l'atome décrivaient des orbites comme les planètes, en tenant compte de l'accélération qui résulte de ce mouvement influencé par les forces électrostatiques, il devrait y avoir émission de rayonnement électromagnétique ; l'énergie cinétique des électrons décroîtrait donc constamment, et ceux-ci tomberaient sur le noyau : l'atome serait instable, et il émettrait sans cesse un rayonnement, dont la fréquence devrait changer constamment, selon la seconde loi de Kepler.

Tout ceci est absolument faux : l'atome est très stable dans les conditions normales et ses dimensions sont constantes.

Bohr émit donc l'hypothèse qu'un système atomique possède une série discrète d'états énergétiques : les états stationnaires. Chacun de ces états est, selon Bohr, extrêmement stable. Le passage de l'un de ses états à un autre état stationnaire s'accompagne d'émission ou d'absorption de rayonnement électromagnétique : absorption d'énergie électromagnétique si le second état est plus énergétique que le premier ; émission d'énergie électromagnétique si ce second état est moins énergétique que le premier.

La fréquence F de ce rayonnement est liée au saut d'énergie

$E_2 - E_1$ entre les deux états par une relation simple :

$$E_2 - E_1 = h \cdot f$$

La constante de proportionnalité entre fréquence et saut d'énergie est une constante universelle dite constante de Planck. Elle a pour valeur :

$$h = 6,6252 \times 10^{-34} \text{ joule/seconde}$$

Bohr précise en outre que le saut $E_2 - E_1$ ne peut prendre que certaines valeurs parfaitement définies : une seule suite discrète de fréquences peut être émise ou absorbée par un système atomique donné.

FRANCK ET HERTZ VERIFIENT LE POSTULAT DE BOHR

Le postulat des états stationnaires fut vérifié expérimentalement par Hertz et Franck qui utilisèrent un montage analogue à celui de la figure 1. Une enceinte contient de la vapeur de mercure à très faible pression ; une cathode K émet, dans cette enceinte, des électrons, qui se dirigent vers une anode A. L'anode a la forme d'une boîte cylindrique percée d'un trou sur une face, et dont la surface est grillagée ; elle est entourée d'un anneau cylindrique B.

L'application d'une différence de potentiel V entre A et K oblige les électrons à pénétrer dans l'électrode A. Si V est inférieur à 4,66 V, les collisions entre électrons et atomes de mercure sont élastiques ; comme la masse de l'atome de mercure est beaucoup plus forte que celle d'un électron, tout se passe comme lorsqu'une balle de caoutchouc rebondit sur le sol : la collision entre un atome et un électron a donc pour conséquence de dévier simplement la trajectoire de l'électron, quasiment sans échange d'énergie. Les électrons, finalement, terminent leur trajectoire sur l'anode, ou traversent le grillage formé par la surface de l'anode pour tomber sur l'électrode annulaire B. Un galvanomètre G permet de mesurer le courant qui passe par B.

Si la tension V est supérieure à 4,66 V, l'énergie cinétique des électrons est suffisamment forte pour rendre les collisions inélastiques : c'est la balle de fusil qui vient s'écraser contre la cible, et la cible s'échauffe lors de l'impact. Ici, une partie de l'énergie des électrons est transférée aux atomes de mercure, en les excitant.

Dans la terminologie des états stationnaires, on dit qu'une tension V inférieure à 4,66 V laisse le mercure à son niveau énergétique le plus bas : c'est l'état fondamental. Si V est supérieur à 4,66 V, les atomes de mercure peuvent être portés à l'état stationnaire de niveau énergétique supérieur à l'état fondamental : c'est le premier état excité.

Un accroissement ultérieur de la tension fait apparaître de nouveaux

types de collisions. Pour le mercure, les nouveaux états excités se trouvent à 4,86 V, 5,45 V, puis 6,69 V...

Ces divers états excités sont représentés (Fig. 2) dans un diagramme « des niveaux d'énergie », par des lignes horizontales dont la distance verticale à la ligne de l'état fondamental est proportionnelle à l'énergie de chaque état. Cette énergie s'exprime en « électron-volt » (abrégé : eV) : 1 eV est l'énergie d'un électron traversant la barrière de potentiel correspondante. Son équivalence avec l'unité légale est :

$$1 \text{ électron-volt} = 1,6021 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Chaque atome a un diagramme des niveaux d'énergie qui lui est propre.

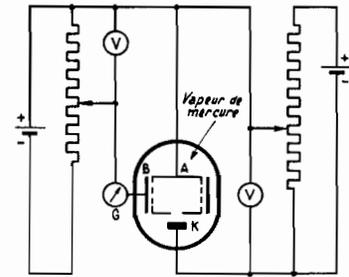


Fig. 1

Dans un diagramme d'énergie, la transition d'un état stationnaire à un autre état stationnaire est représentée au moyen de flèches. L'écart entre deux niveaux d'énergie est proportionnelle à la fréquence du signal électromagnétique absorbé et émis par l'atome : si par exemple le passage du niveau fondamental au premier état excité (4,66 eV) pouvait être obtenu par absorption d'une radiation de fréquence f, l'écart d'énergie entre les deux niveaux :

$$4,66 \times 1,6021 \times 10^{-19} \text{ (Joule)}$$

$$\text{serait égal au produit de cette fréquence } f \text{ par la constante de Planck :}$$

$$h = 6,6252 \times 10^{-34} \text{ (Joule/seconde)}$$

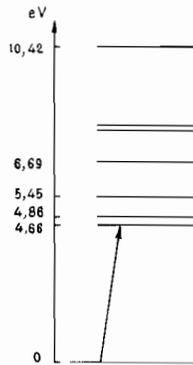


Fig. 2

D'où l'expression de la fréquence :

$$f = \frac{4,66 \times 1,6021 \times 10^{-19}}{6,6252 \times 10^{-34}}$$

ce qui donne finalement :

$$f = 1,125 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

Cette radiation aurait une longueur d'onde égale à 0,2660 microns environ. On se trouve ici dans l'ultraviolet.

Signalons immédiatement que l'exemple précédent est fictif et ne sert que d'application numérique : en effet, si, dans l'émission, les transitions peuvent se produire entre les états excités et l'état fondamental (mais aussi entre deux états excités), dans l'absorption, les transitions entre l'état fondamental et les états excités n'existent pas, en général : en effet, dans les conditions normales, la plupart des atomes sont dans leur état fondamental. Il existe certaines règles de sélection qui éliminent certaines transitions.

LES PHOTONS : DES QUANTA DE LUMIERE

Tout ceci nous autorise cependant à retirer énergie et fréquence de rayonnement : certains rayonnements seront capables de porter un atome d'un élément chimique d'un état stationnaire « bas » à un état stationnaire « haut » ; si $E_2 - E_1$ représente l'écart énergétique entre ces deux niveaux, on appliquera un rayonnement de fréquence $f = (E_2 - E_1)/h$ où h est la constante de Planck. La longueur d'onde de ce rayonnement sera alors donnée par des formules classiques.

$$\text{Longueur d'onde} = 3 \times 10^8 / f$$

Si par contre l'atome descend d'un niveau « haut » E_2 à un niveau « bas » E_1 , il émettra un rayonnement de fréquence f telle que $f = (E_2 - E_1)/h$; sa longueur d'onde sera exprimée par la formule classique précédente.

Comme les niveaux d'énergie sont discrets, les fréquences de rayonnement associées à chaque transition seront en nombre fini ; il en va de même des « quanta » d'énergie hf. Ces quanta seront appelés : des photons.

Il y a donc, dans la lumière, deux aspects complémentaires : un aspect corpusculaire, qui se manifeste par les photons, particules sans masse, se déplaçant à 300 000 km/s, et que l'on introduit pour véhiculer de l'énergie ; d'autre part, il y a aussi un aspect ondulatoire qui joue un rôle essentiel dès que l'on s'intéresse à la propagation de la lumière.

Ces deux aspects de la lumière sont indissociables pour le physicien désirant décrire complètement les phénomènes lumineux.

Le double caractère des rayonnements électromagnétiques se retrouve dans les propriétés de la matière. Louis de Broglie fut le premier à proposer une hypothèse analogue pour les électrons et les autres particules, en associant un phénomène ondulatoire au mouvement des particules. L'hypothèse de De Broglie s'est trouvée confirmée par les expériences.

Le double aspect corpusculaire et ondulatoire a obligé le physicien à abandonner ses habitudes classiques : la présence d'ondes lui donne seulement le moyen d'estimer la probabilité de trouver en un point de l'espace un quantum de lumière, mais ne lui permet pas de connaître la position exacte, en un instant donné, de ce quantum. Le physicien ne dispose pas de moyen d'observation du quantum, ce qui nécessite de parler de probabilité de présence de quantum.

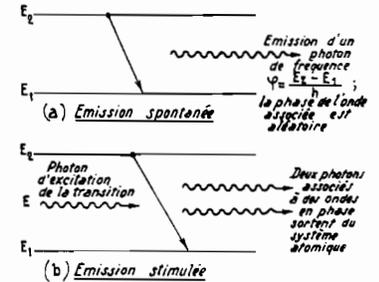


Fig. 3

En d'autres termes, le quantum transporte l'énergie dans le milieu microscopique ; l'onde associée signale, au milieu macroscopique, la présence d'un quantum de lumière.

L'EMISSION DES PHOTONS PEUT ETRE STIMULEE

En 1917, Albert Einstein, alors professeur à l'université de Berlin introduisit une idée nouvelle : l'émission stimulée.

Considérons N atomes possédant deux états stationnaires, dont les niveaux d'énergie sont E_1 et E_2 . Supposons que ces atomes soient placés dans un récipient, contenant également des photons, d'énergie $E_2 - E_1$; ce quantum d'énergie est associé à une onde de fréquence :

$$f = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

où h est la constante de Planck.

La présence des photons permet la transition des atomes entre les deux états stationnaires :

- L'absorption de photons augmentera le nombre d'atomes placés dans l'état stationnaire d'énergie supérieure : on dit que la « population » de cet état augmente.

- Si la population de l'état stationnaire d'énergie supérieure décroît, donc s'il y a des transitions de l'état supérieur à l'état inférieur, on aura alors affaire à une émission d'une onde de fréquence $f = \frac{E_2 - E_1}{h}$

Deux cas peuvent se présenter pour l'émission :

● L'atome se trouve en un instant donné, au niveau supérieur : il redescend automatiquement au niveau inférieur, sans qu'aucune action extérieure vienne le « pousser » à descendre. C'est, en somme, l'équivalent d'une bascule monostable. L'émission de photons pendant la transition est dite spontanée.

● L'atome est au niveau supérieur d'énergie, il ne redescend pas automatiquement. Il faut le « pousser » à descendre, en lui envoyant un quantum d'énergie, un photon.

Le physicien français A. Kastler a imaginé un procédé de « pompage optique » qui est universellement utilisé actuellement par les constructeurs de lasers. Le pompage optique peut avoir lieu par décharge électrique sous basse pression dans un gaz : tel est le cas du laser à mélange d'hélium et de néon ; une décharge HF sur 27 MHz sert au pompage. Les électrons, accélérés par la décharge excitent les atomes d'hélium et les portent dans un état stationnaire situé à 19,81 électron-volts au-dessus de l'état fondamental.

Or, le niveau supérieur du néon est situé à 0,04 électron-volt du

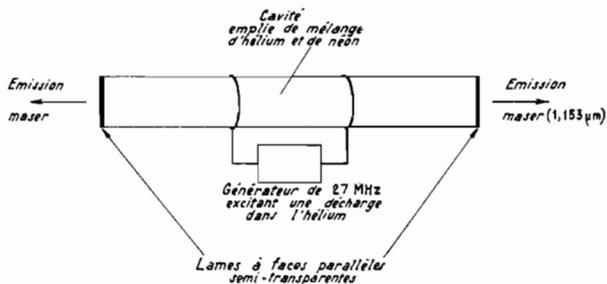


Fig. 4

Frappé par un photon, l'atome chute au niveau inférieur en émettant un autre photon. C'est, ici, l'équivalent de la bascule bistable, qui ne passe d'un état à l'autre que si on lui envoie un signal d'excitation. L'émission est stimulée.

Dans ce dernier cas, le photon exciteur a permis la libération d'un photon par transition de l'état supérieur vers l'état inférieur. Il y a eu « multiplication » de photons, donc « amplification par émission stimulée de radiation » : en anglais, cette expression se traduira par :

« Amplification by Stimulated Emission of Radiation ».

C'est le phénomène A.S.E.R.

Si le rayonnement est visible, on aura réalisé un Laser (L pour : Light, soit lumière). Sinon, ce sera un Maser (M pour microwave, soit micro-ondes).

IL FAUT POMPER LE NIVEAU BAS

Un problème se pose immédiatement : l'émission stimulée va favoriser les transitions du niveau haut au niveau bas ; le niveau haut va donc se dépeupler au profit du niveau bas, et si l'on ne modifie rien dans le système atomique, le Laser ne pourra pas fonctionner.

Il faut donc « pomper » des atomes situés dans le niveau énergétique bas pour les amener dans le niveau énergétique haut.

niveau excité de l'hélium : il y a alors transfert d'énergie au cours des chocs entre les atomes d'hélium et de néon ; l'atome d'hélium redescend à l'état fondamental, tandis que le néon monte à son niveau excité (19,77 électron-volts).

On parle de la sorte les niveaux supérieurs du néon par l'intermédiaire d'un autre atome.

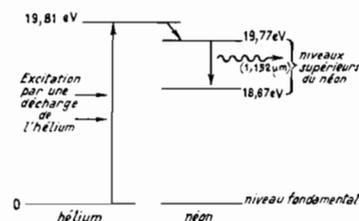


Fig. 5

Dès que ces niveaux sont suffisamment peuplés, l'effet laser se manifeste par transition de l'atome de néon entre le niveau 19,77 électron-volts et les niveaux intermédiaires entre le niveau supérieur et le niveau fondamental. Par exemple, la transition avec le niveau 19,02 électron-volts donne une émission maser dont la longueur d'onde est 1,153 micron.

En utilisant d'autres niveaux de l'hélium pour le pompage, on excite d'autres niveaux du néon, donnant lieu à des émissions dans le rouge (longueur d'onde : 0,6328 micron) et dans l'infrarouge lointain (3,39 microns).

Marc Ferretti.

LISEZ

SYSTEME D
LA REVUE DES BRICOLEURS

Le plus fort tirage
de la presse spécialisée

DANS LE NUMÉRO D'AOUT :

- AGENCEMENT D'UNE SALLE DE SÉJOUR.
- TROIS SOLUTIONS POUR UN PARAVENT.
- LE PLAN D'UN BUREAU D'ENFANT.
- COMMENT AMÉLIORER LA SUSPENSION DE VOTRE 2 CV.
- LA DÉTECTION ET LA DESTRUCTION DES TERMITES.

... Et 40 autres articles sur tous les sujets.

2,50 F

Mensuel - En vente partout

Le numéro d'août est en vente chez votre marchand de journaux

Si vous ne pouvez vous le procurer, envoyez-nous le bon ci-dessous accompagné de 2,50 F en timbres.

Je joins 2,50 F en timbres à :

SYSTÈME « D » (AH-SAP)
43, rue de Dunkerque - PARIS (10^e)
Pour recevoir SYSTÈME « D » d'août

NOM PRÉNOM

ADRESSE