

LUMIÈRE, MATIÈRE ET COSMOS

par

M. Claude Cohen-Tannoudji

Délégué de l'Académie des sciences

Le spectacle d'un ciel étoilé par nuit claire fait toujours rêver. Ne sommes-nous pas littéralement sidérés quand nous réalisons que la lumière émise par l'étoile la plus proche du soleil, Proxima du Centaure, met quatre années pour parvenir jusqu'à nous, et que celle en provenance des galaxies les plus lointaines met des milliards d'années pour nous atteindre ? Comme le dit Jean Perrin, en conclusion de son livre de 1913 *Les atomes*, dont la réédition a été préfacée par Pierre-Gilles de Gennes, « [...] l'astronome découvre, saisi de vertige, au-delà des cieux familiers, au-delà de ces gouffres d'ombre que la lumière met des millénaires à franchir, de pâles flocons perdus dans l'espace, voies lactées démesurément lointaines dont la faible lueur nous révèle encore la palpitation ardente de millions d'astres géants ». En un siècle, notre champ de vision est passé du millier d'années-lumière, au milliard d'années-lumière.

Qu'est-ce que la lumière ? Comment est-elle produite ? Comment la percevons-nous ? Comment interagit-elle avec la matière dont nous sommes faits ? Comment nous renseigne-t-elle sur l'univers dans lequel nous vivons ? Telles sont les questions que je voudrais effleurer dans ce bref exposé, questions qui ont de tout temps occupé une place essentielle dans les réflexions des philosophes et des scientifiques.

Nous savons aujourd'hui que la lumière se comporte à la fois comme une onde électromagnétique et comme une pluie de corpuscules, les quanta de lumière ou photons. Ondes et photons se propagent dans l'espace, partout et toujours, à la même vitesse prodigieuse de 300 000 kilomètres par seconde. La fréquence d'oscillation de l'onde, proportionnelle à l'énergie des photons qui lui sont associés, peut varier de 0 à l'infini. Les fréquences auxquelles notre rétine est sensible constituent une toute petite partie de ce spectre de fréquence, le « spectre visible », qui couvre à peu près une octave et qui est bordé vers le bas par les ondes hertziennes, centimétriques et infrarouges, et vers le haut par les ondes ultraviolettes, les rayons X et gamma.

L'idée de la dualité onde/corpuscule, si féconde pour la lumière, Louis de Broglie eut l'audace de l'étendre à l'ensemble de la matière. À tout corpuscule matériel, il associe une onde dont la longueur d'onde est d'autant plus grande que la vitesse du corpuscule est plus petite. Prenant connaissance de ce travail révolutionnaire, Einstein dira qu'il « a soulevé un coin du grand voile ». Ce travail, en effet, devait être le point de départ de l'élaboration d'une nouvelle mécanique, la mécanique quantique, qui donne une interprétation quantitative de la structure des atomes, des molécules et des divers états de la matière. L'application des concepts quantiques au champ électromagnétique allait aussi conduire à une théorie beaucoup plus satisfaisante de la lumière et de ses interactions avec des particules chargées comme les électrons, l'« électrodynamique quantique », qui permet de rendre compte des observations expérimentales avec une précision inégalée par ailleurs.

L'électrodynamique quantique nous permet aussi de comprendre la structure de l'atome ainsi que sa capacité à émettre ou absorber de la lumière. Il faut pour cela étudier l'évolution de l'onde de Louis de Broglie associée à l'électron en mouvement autour du noyau. On trouve alors que la fréquence propre de cette onde ne peut pas être quelconque. Elle ne peut prendre que certaines valeurs bien définies, de la même manière que la corde d'un violon ou d'un piano ne peut vibrer qu'à certaines fréquences qui sont les fréquences de résonance de la corde. Ainsi, l'énergie de l'électron, reliée à la fréquence de l'onde qui lui est associée, est-elle quantifiée. L'atome ne peut exister que dans certains niveaux d'énergie bien définie. S'il passe d'un niveau donné à un niveau d'énergie inférieure, l'énergie perdue est émise sous la forme d'un photon. La fréquence de la lumière rayonnée est proportionnelle à la différence des énergies des deux niveaux entre lesquels s'effectue la transition.

Ce qui est important, c'est que deux espèces atomiques différentes, par exemple le sodium et l'hydrogène, n'ont pas les mêmes niveaux d'énergie. Leur spectre de fréquences est en quelque sorte analogue à une signature génétique qui permet d'identifier l'atome émetteur. L'observation de la lumière émise par un milieu permet donc d'identifier les atomes contenus dans ce milieu. Elle constitue par exemple une source essentielle d'informations sur les espèces atomiques présentes dans les étoiles et les atmosphères planétaires, sur les centaines de molécules détectées dans l'espace interstellaire, ou, plus près de nous, sur les polluants présents dans la fumée des usines.

Le processus inverse de l'émission, l'absorption, correspond au passage de l'atome d'un niveau donné à un niveau d'énergie plus élevé par absorption d'un photon. De tels processus sont essentiels pour la vie des plantes car elles peuvent, en captant l'énergie de la lumière solaire, synthétiser la matière organique dont elles ont besoin pour se développer. C'est l'absorption d'énergie solaire qui permet également à une cellule photovoltaïque de générer un courant électrique, une source d'énergie non polluante qui sera de plus en plus compétitive si le prix de fabrication des panneaux solaires décroît et si leur rendement augmente.

L'invention du laser, au milieu du siècle dernier, est le fruit d'une étude de plus en plus approfondie des processus d'émission et d'absorption de lumière dans des milieux hors d'équilibre. Le laser, cette nouvelle source de lumière, dont les applications, insoupçonnées au début, ne se comptent plus, qu'il s'agisse des traitements de la rétine, des lecteurs de disques, des télécommunications par fibre optique, de la télémétrie, de la découpe des matériaux, et de bien d'autres technologies encore. Quel bel exemple de retombées de recherches fondamentales qui, pourtant, n'étaient initialement guidées que par la curiosité et le désir de comprendre.

Dans les mains des physiciens, ces nouvelles sources de lumière sont devenues de remarquables instruments qui leur permettent d'explorer de nouveaux territoires de recherche. La lumière n'apparaît plus seulement comme une source d'informations sur les atomes, mais également comme un moyen d'agir sur eux, de les manipuler, de les placer dans des conditions nouvelles, souvent extrêmes. Permettez-moi de rappeler qu'Alfred Kastler et Jean Brossel, mes deux directeurs de thèse, ont joué un rôle de pionniers dans cette façon d'utiliser la lumière.

Considérons, par exemple, le refroidissement laser, qui utilise la lumière laser

pour dompter les atomes, c'est-à-dire réduire leur mouvement d'agitation désordonnée. La situation d'un atome absorbant et réémettant les photons d'un faisceau laser rappelle celle d'une cible qui recevrait une grêle de projectiles. Sous l'effet d'un tel bombardement, la cible subit une force moyenne qui la fait reculer dans la direction des projectiles incidents. De même, un atome placé dans un faisceau laser résonnant subit une « force de pression de radiation » qui peut être utilisée pour modifier sa vitesse et la réduire à des valeurs très faibles, de l'ordre du millimètre par seconde. À titre de comparaison, les molécules d'oxygène et d'azote dans l'air de cette coupole sont animées de vitesses de l'ordre de quelques centaines de mètres par seconde. En termes de températures absolues, celles que le refroidissement laser permet d'obtenir au laboratoire peuvent atteindre des valeurs cent milliards de fois plus basses que la température de cette coupole.

Comme ils sont animés de vitesses très faibles, les mesures de fréquences effectuées sur ces atomes ainsi refroidis peuvent se faire en un temps beaucoup plus long et devenir beaucoup plus précises, comme le prédit la mécanique quantique. Il devient alors possible d'améliorer de manière spectaculaire les performances des horloges atomiques asservies sur ces fréquences. On parvient ainsi à limiter la dérive des horloges à atomes ultrafroids à moins d'une seconde sur 300 millions d'années, ce qui permet d'envisager des tests beaucoup plus sévères pour valider des théories fondamentales comme la relativité générale, et une amélioration sensible de systèmes de positionnement comme le GPS et bientôt Galileo. Autre caractéristique intéressante des atomes ultrafroids : leur très grande longueur d'onde de Louis de Broglie liée à leur très faible vitesse. Il devient alors beaucoup plus aisé d'observer le caractère ondulatoire du mouvement des atomes et de faire interférer des ondes atomiques pour réaliser, par exemple, de nouveaux types d'interféromètres ultrasensibles mesurant des vitesses de rotation très faibles. Des nouveaux états de la matière, les condensats de Bose-Einstein gazeux, ont pu être également obtenus en laboratoire. Un grand nombre d'atomes, de l'ordre du million, se retrouvent associés à la même onde de matière, siège d'effets quantiques macroscopiques spectaculaires comme la cohérence et la super-fluidité. D'autres applications des atomes ultrafroids sont actuellement envisagées dans le nouveau domaine très prometteur de l'information quantique.

La lumière est également essentielle pour comprendre la structure et l'évolution de l'univers dans lequel nous vivons. La cosmologie élabore des modèles d'univers, partant d'un état initial supposé, et évoluant, selon les lois de la physique, jusqu'à son état actuel. C'est l'observation de la lumière provenant des étoiles et des galaxies, plus généralement du rayonnement électromagnétique émis dans tous les domaines de fréquence, qui permet de valider ou non ces modèles selon que les observations en confirment ou en infirment les prédictions théoriques. Pour l'instant, nous ne disposons que de la lumière comme source d'information. Il est possible que d'autres signaux puissent être détectés dans un avenir proche, comme les ondes gravitationnelles, c'est à dire des déformations de la structure de l'espace temps provoquées par des événements violents comme la rencontre de deux trous noirs.

Quel type de mesures peut-on faire sur la lumière qui nous parvient d'un objet lointain, comme une galaxie ou un amas de galaxies ? On peut mesurer l'intensité lumineuse reçue, les fréquences et intensités des raies spectrales émises par les divers

atomes émettant cette lumière. On peut aussi suivre les variations temporelles de la lumière émise par certains astres variables, comme les Céphéides, ou par certaines supernovae dont la dynamique est suffisamment bien comprise. Il est alors possible de déterminer la distance qui nous sépare de l'objet, sa vitesse relative par rapport à nous, les abondances relatives des diverses espèces atomiques qu'il contient. L'astronome Edwin Hubble a pu ainsi montrer en 1929 que les différentes galaxies s'éloignent les unes des autres avec une vitesse proportionnelle à leur distance, ce qui ne peut se comprendre que si l'univers est en expansion. Je donnerais volontiers une image métaphorique de ce phénomène : imaginons pour simplifier un univers à deux dimensions confiné à la surface d'un ballon qu'on gonflerait. Des pastilles collées sur la surface du ballon et symbolisant les galaxies s'éloignent les unes des autres lors du gonflement du ballon, avec une vitesse relative d'autant plus grande que leur distance initiale est plus grande. Tout aussi clairement, cette image montre que l'univers n'a pas de centre. Tous les points du ballon sont équivalents. Ptolémée plaçait la terre au centre du monde, Copernic remplaçait cette représentation géocentrique par une représentation héliocentrique. Nous savons aujourd'hui que l'univers s'étend bien au delà du système solaire et de la voie lactée.

Le fait que l'univers soit en expansion nous conduit à la conclusion qu'il était dans le passé plus dense et plus chaud. Des observations de plus en plus précises, obtenues en particulier par les missions spatiales qui s'affranchissent de l'absorption par l'atmosphère terrestre du rayonnement en provenance des étoiles, confortent le modèle du *big bang*. Celui-ci décrit un univers en expansion à partir d'une phase extrêmement dense et énergétique apparue il y a environ 13,7 milliards d'années. Il est impossible dans ce court exposé de décrire les différentes phases par lesquelles l'univers est passé depuis le *big bang*. Disons simplement que la lumière, initialement piégée au sein d'un milieu ionisé très dense et opaque, s'en est échappée 380 000 ans après le *big bang*, lorsque ce milieu est devenu suffisamment dilué et transparent. Ce rayonnement primordial, le « fonds diffus cosmologique », avait initialement une température très élevée. Il s'est refroidi au cours de l'expansion de l'univers pour atteindre aujourd'hui une température de l'ordre de 2,7 degrés Kelvin, ce qui correspond à des longueurs d'ondes dans le domaine radio. C'est le vestige le plus ancien que l'on puisse observer. Il est détecté et étudié en grand détail grâce aux nombreuses missions spatiales qui lui sont consacrées car il nous donne une image de plus en plus précise de l'univers primordial, tel qu'il était il y a 13,7 milliards d'années, bien avant l'apparition du système solaire.

Comment l'être humain, un être si fragile, dont la vie dépasse rarement les cent ans, une poussière de temps comparée à l'âge de l'univers, a-t-il pu, avec sa seule intelligence, se hisser à une telle cohérence dans la représentation du monde qui l'entoure, aussi bien dans l'infiniment petit des atomes et des particules élémentaires que dans l'infiniment grand du cosmos ?

Les quelques avancées que je viens d'évoquer ne doivent cependant pas laisser penser que tous les problèmes sont résolus. Loin s'en faut ! Par exemple, les deux découvertes récentes des astrophysiciens, celle d'une « matière sombre », une forme inconnue de matière, cinq à six fois plus abondante que la matière ordinaire, qui ne se

manifesterait que par ses effets gravitationnels, et celle d'une « énergie sombre », une mystérieuse énergie qui serait à l'origine d'une accélération de l'expansion de l'univers, ne sont toujours pas expliquées. Tout progrès dans l'exploration du monde ouvre de nouveaux horizons, dévoile de nouveaux mystères, pose de nouvelles questions. Nous ne disposons pas encore de théories physiques pouvant décrire ce qui se passe dans les régimes d'énergie très élevée régnant dans les tous premiers instants suivant le *big bang*. La gravitation est toujours en attente d'une théorie quantique. Y-a-t'il un avant *big bang*? L'espace et le temps sont-ils apparus avec lui? Pourra-t-on détecter dans les atmosphères des exoplanètes découvertes autour d'un nombre croissant d'étoiles autres que le soleil, des molécules susceptibles de donner naissance à des formes de vie?

Albert Einstein, le premier à avoir émis l'hypothèse des quanta de lumière, écrivait le 12 décembre 1951 à son ami Michele Besso : « Ces cinquante années de rumination consciente ne m'ont pas rapproché de la réponse à la question 'que sont les quanta lumineux ?' ». Peut-on imaginer pareille modestie de la part d'un homme qui, par ses contributions, a transformé complètement notre vision du monde? Puissent tous les scientifiques, présents et à venir, poursuivre son œuvre avec la même humilité et la même intelligence visionnaire.