

QU'EST-CE QUE LA LUMIÈRE POUR LE PHYSICIEN D'AUJOURD'HUI ?

Les interrogations sur la nature de la lumière : Une source de révolutions conceptuelles pour la physique.

Comprendre la nature de la lumière a toujours été une préoccupation essentielle des scientifiques et des philosophes. Nous ne nous étendrons pas ici sur les premières tentatives d'interprétation des phénomènes lumineux, présentées plus en détail dans d'autres articles de cet ouvrage : celle des philosophes grecs comme Aristote qui faisait jouer un rôle essentiel à un milieu intermédiaire entre l'œil et l'objet regardé qu'il appelait « diaphane » ; celle de René Descartes, puis d'Isaac Newton qui, pour expliquer la couleur, décrivait la lumière comme un ensemble hétérogène de corpuscules de types différents. A cette conception corpusculaire de la lumière s'opposait une conception ondulatoire, comme celle de Christiaan Huygens ou de Robert Hooke qui considérait la lumière comme une vibration transversale, analogue à la vibration d'une corde. Par leur étude des phénomènes d'interférence et de diffraction Thomas Young et Augustin Fresnel donnèrent une base solide à cette conception ondulatoire qui trouva son apogée dans la seconde moitié du XIX^e siècle, lorsque James Clerk Maxwell établit des équations portant son nom, qui montraient que la lumière est une onde électromagnétique formée par un champ électrique et un champ magnétique, oscillant à une fréquence ν et se propageant dans l'espace à une vitesse élevée, de l'ordre de 300.000 kilomètres par seconde. Les expériences de Heinrich Hertz réalisées peu après mirent en évidence les ondes radio rayonnées par des antennes et montrèrent que ces ondes radio sont de même nature que les ondes lumineuses. Ainsi, à la fin du XIX^e siècle, la théorie électromagnétique semblait confirmer de manière incontestable la nature ondulatoire de la lumière et fournissait un premier exemple de théorie unifiée, permettant de décrire par les mêmes équations des phénomènes aussi divers que l'électricité, le magnétisme, les ondes radio ou lumineuses.

Deux difficultés subsistaient cependant dans l'interprétation des phénomènes physiques impliquant la lumière, deux « petits nuages » comme les appelait Lord Kelvin. Ces deux petits nuages allaient être à l'origine de 2 révolutions conceptuelles majeures dans l'histoire de la physique.

La révolution relativiste

Tous les autres phénomènes ondulatoires connus à la fin du XIX^e siècle faisaient intervenir un milieu matériel (gazeux, liquide ou solide) dont les vibrations constituent l'onde étudiée, vibrations se propageant de proche en proche au sein du milieu. Comme l'onde électromagnétique se propage même en l'absence de toute matière, les physiciens trouvaient naturel de supposer qu'il existait un milieu non matériel, présent dans tout l'espace, et qui servirait de support aux vibrations lumineuses pour leur permettre de se propager. Ils appelaient un tel milieu « éther » et considéraient que les équations de Maxwell n'étaient valables que dans un référentiel où l'éther est au repos, un référentiel étant un repère spatial permettant de préciser la position de chaque point de l'espace.

Il était normal alors d'essayer de mettre en évidence, par l'analyse de phénomènes connus ou par de nouvelles expériences, l'existence de cet éther, et en particulier les effets du mouvement du référentiel de l'observateur par rapport à l'éther. De nombreux efforts dans cette direction, aussi bien théoriques avec notamment les travaux de Hendrik Lorentz et Henri Poincaré, qu'expérimentaux avec les travaux de Hippolyte Fizeau, Albert Michelson et Edward Morley, n'apportèrent pas de réponse satisfaisante. Le pas décisif fut accompli par Albert Einstein en 1905. Il abandonna l'idée artificielle de l'éther, et postula que toutes les lois de la physique devaient avoir la même forme dans tous les référentiels en mouvement de translation uniforme (à vitesse constante) les uns par rapport aux autres. Ce principe de relativité implique en particulier que les équations de Maxwell restent valables dans tous ces référentiels et donc que la vitesse de la lumière ne dépend pas du référentiel dans lequel on l'observe. Par une analyse précise de la manière dont on peut synchroniser des horloges par échange de signaux lumineux, Albert Einstein fut alors conduit à introduire l'idée révolutionnaire que la notion d'un temps absolu, s'écoulant à la même vitesse pour tous les observateurs, devait être abandonnée. Deux événements apparaissant simultanés pour un observateur ne le sont plus forcément pour un autre observateur se déplaçant par rapport au premier. Etendant le principe de relativité à la dynamique, Albert Einstein établit la célèbre formule $E=mc^2$, montrant l'équivalence entre masse et énergie. De la masse peut disparaître et se transformer en énergie et réciproquement. C'est ainsi l'étude de la propagation de la lumière dans des référentiels en mouvement les uns par rapport aux autres qui a conduit les physiciens à réviser de manière fondamentale des notions aussi ancrées que le caractère absolu du temps et de l'espace ou l'invariance de la masse.

Quelques années plus tard, Albert Einstein étendit le principe de relativité à des situations faisant intervenir un champ de gravitation et des

référentiels en mouvement quelconque, et non plus seulement uniforme, les uns par rapport aux autres. Là encore, l'étude de la propagation de la lumière a joué un rôle essentiel pour confirmer la validité de cette nouvelle théorie (appelée théorie de la relativité générale). Les interactions gravitationnelles y apparaissent sous un autre jour que dans la théorie initiale d'Isaac Newton où les forces de gravitation entre 2 corps matériels apparaissent comme des forces attractives, inversement proportionnelles au carré de la distance qui les sépare. Dans la nouvelle interprétation proposée par Einstein, la présence d'une masse modifie la géométrie de l'espace-temps autour de cette masse. Cet espace n'est plus euclidien mais courbe, et c'est dans cet espace courbe que se déplacent d'autres objets. En particulier, les rayons lumineux doivent suivre les « géodésiques » de cet espace, c'est-à-dire les lignes de longueur minimale joignant deux points donnés. Un rayon lumineux passant au voisinage d'une masse importante sera donc dévié à cause de la courbure importante de l'espace au voisinage de la masse. L'observation en 1919 par Arthur Eddington de cet effet sur la lumière venant d'une étoile dans la direction du soleil lors d'une éclipse totale du soleil apporta une confirmation éclatante des idées d'Einstein. Notons que cet effet de déviation des rayons lumineux au voisinage d'une masse est utilisé maintenant couramment pour détecter des objets astronomiques peu lumineux quand des masses importantes de matière sont situés entre ces objets lointains et la terre. La déviation des rayons par ces masses fait apparaître un effet de lentille qui focalise les rayons et augmente l'intensité reçue. On parle aussi de « mirage gravitationnel ».

La théorie de la relativité générale prédit également que la fréquence d'une horloge dépend du champ de gravitation dans lequel elle se trouve. Cet effet joue un rôle important dans le système GPS (pour « Global Positioning System ») permettant à un observateur recevant des signaux de 3 satellites de se positionner par triangulation sur la surface de la terre. Les horloges atomiques présentes dans les satellites n'ont pas la même fréquence que celle de l'observateur car elles sont plus éloignées de la terre et donc dans un champ de gravitation plus faible. Si l'on ne tenait pas compte de cet effet de relativité générale, l'erreur sur la position calculée serait de plusieurs kilomètres !

La révolution quantique

Le deuxième « petit nuage » subsistant à la fin du XIX^e siècle concernait la distribution $u(\nu)$ des fréquences ν d'un rayonnement s'échappant d'une enceinte absorbante à la température T , appelé « rayonnement du corps

noir ». Ce problème attirait beaucoup d'attention car il faisait intervenir simultanément la théorie de la lumière et la thermodynamique. Ludwig Boltzmann venait d'élaborer une approche statistique de la thermodynamique. En appliquant ces idées au problème du rayonnement interagissant avec N oscillateurs matériels de fréquence ν dans une enceinte à la température T , les physiciens de l'époque n'arrivaient pas à rendre compte de la répartition $u(\nu)$ mesurée expérimentalement. La distribution calculée tendait trop lentement vers 0 aux grandes valeurs de ν , ce qui conduisait au résultat absurde que l'énergie totale du rayonnement, faisant intervenir l'intégrale sur ν de $u(\nu)$, était infinie!

Un premier pas fut accompli par Max Planck en 1900. Dans le calcul des probabilités statistiques de l'état des N oscillateurs, on est amené à considérer l'énergie de chaque oscillateur, non plus comme une variable continue, mais comme une variable discrète prenant des valeurs égales à un multiple entier d'une quantité ε qui apparaît comme un intermédiaire de calcul. A la fin des calculs, on doit en effet faire tendre ε vers 0. Max Planck réalisa que pour retrouver la distribution expérimentale $u(\nu)$, avec le bon comportement asymptotique aux fréquences élevées, il fallait garder pour ε une valeur finie, proportionnelle à ν . Il posa $\varepsilon = h\nu$, faisant apparaître ainsi une nouvelle constante fondamentale, h , appelée depuis constante de Planck, qui allait jouer ensuite un rôle central en physique quantique.

Max Planck ne croyait pas cependant à une quantification de l'énergie des oscillateurs sous forme d'un multiple entier de $h\nu$, encore moins à une quantification de l'énergie du rayonnement interagissant avec ces oscillateurs. C'est là encore Einstein qui franchit un pas décisif en 1905. Calculant les fluctuations statistiques du rayonnement de fréquence ν , il montra que ces fluctuations sont les mêmes que celles d'un gaz de particules d'énergie $h\nu$. Il n'hésita pas à en conclure – réactualisant la thèse de Newton- que le rayonnement est constitué de « corpuscules », de quanta d'énergie $h\nu$ et il montra que ce point de vue permet d'interpréter de manière très simple l'effet photoélectrique. Un quantum de lumière, qui sera appelé plus tard « photon », absorbé par un électron dans un métal, fournit à ce dernier l'énergie W nécessaire pour sortir du métal, l'excédent d'énergie $h\nu - W$ se retrouvant sous forme d'énergie cinétique du photoélectron émis.

L'introduction par Einstein des quanta lumineux fut accueillie avec beaucoup de scepticisme à l'époque. Revenir à une conception corpusculaire de la lumière après les succès éclatants de la théorie ondulatoire semblait hérétique. Il fallut attendre les expériences d'Arthur

Compton sur la diffusion des rayons X par des électrons pour convaincre finalement les physiciens de l'existence des photons. Il était cependant nécessaire de conserver l'aspect ondulatoire de la lumière pour rendre compte des phénomènes d'interférence et de diffraction. Apparaissait ainsi en physique la notion importante de « dualité onde corpuscule » : La lumière est à la fois une onde et un ensemble de photons. Suivant l'expérience réalisée, c'est tel ou tel aspect qui se manifeste. Il est impossible de rendre compte de l'ensemble des phénomènes observés en ne retenant qu'un seul des 2 aspects. Cette notion allait devenir plus claire avec l'apparition de la mécanique quantique.

Quand la matière rejoint la lumière : la physique quantique

L'idée de quantification issue de l'étude du rayonnement du corps noir apparaissait également dans d'autres travaux, par exemple dans les tentatives d'interprétation du caractère discret des fréquences lumineuses émises par un électron atomique tournant autour du noyau. La mécanique classique prédit que toutes les fréquences pourraient être émises, formant ainsi un spectre « continu ». Or, le spectre observé est constitué d'un ensemble discret de fréquences. Niels Bohr introduisit en 1913 l'idée que seules certaines orbites de l'électron autour du noyau sont possibles, caractérisées par des règles de quantification où apparaît la constante de Planck et qui semblaient à l'époque assez arbitraires. A chacune de ces orbites est associée une certaine énergie et l'émission de lumière correspond à un passage de l'électron d'une orbite à l'autre avec émission d'un photon d'énergie $h\nu$ égale à la différence d'énergie entre les 2 orbites. Niels Bohr arrivait ainsi à rendre compte quantitativement du spectre de raies émises par l'atome d'hydrogène.

L'interprétation des règles de quantification de Bohr allait être donnée quelques années plus tard par Louis de Broglie qui, inspiré par les travaux d'Einstein, proposait en 1924 une nouvelle idée révolutionnaire. La dualité onde corpuscule, introduite pour la lumière, doit s'appliquer également à toute particule matérielle. A toute particule de masse m et d'impulsion p (si la vitesse v est faible devant la vitesse de la lumière, on a simplement $p=mv$) est associée une onde, appelée maintenant onde de de Broglie, dont la longueur d'onde λ_{dB} est égale à h/p . La condition de quantification de Bohr apparaît alors tout simplement comme une condition exprimant que la longueur totale de l'orbite est un nombre entier de longueurs d'onde, une condition analogue à celle donnant les fréquences de résonance d'une corde vibrante.

Quelques mois plus tard, Erwin Schrödinger établissait l'équation qui porte son nom et qui régit l'évolution de la « fonction d'onde » décrivant mathématiquement l'onde de de Broglie associée à la particule. Quand on essaie de résoudre cette équation, par exemple pour un électron évoluant dans le champ électrostatique d'un noyau atomique, on trouve que seules certaines solutions de fréquences bien définies sont physiquement acceptables. Une telle situation rappelle là encore celle des fréquences de résonance d'un instrument de musique. Comme l'énergie E de l'électron est reliée à la fréquence ν de l'onde associée par la relation $E = h\nu$, on en déduit que l'énergie d'un électron atomique ne peut prendre que certaines valeurs discrètes. La notion de quantification des grandeurs physiques apparaît ainsi tout naturellement. Une nouvelle mécanique voyait ainsi le jour, qui expliquait avec succès le comportement des systèmes physiques à l'échelle atomique et qui allait, en quelques années, connaître un développement spectaculaire avec les travaux de Werner Heisenberg, Paul Dirac, Wolfgang Pauli et de bien d'autres qu'il serait trop long d'énumérer ici. Mentionnons simplement l'interprétation physique donnée par Max Born de la fonction d'onde associée à une particule. Le carré du module de la valeur, en un point donné, de cette fonction d'onde donne la probabilité de trouver la particule en ce point. La dualité onde corpuscule reçoit ainsi un nouvel éclairage. Le lien entre l'aspect onde et l'aspect corpuscule est de nature probabiliste. L'onde permet de calculer la probabilité pour que le corpuscule se manifeste.

L'application des concepts quantiques au champ électromagnétique devait alors conduire à une théorie quantique beaucoup plus satisfaisante de la lumière et de ses interactions avec des particules chargées comme les électrons. Les travaux de Paul Dirac et Enrico Fermi, puis ceux de Richard Feynman, Julian Schwinger, Shin Tomonaga, Freeman Dyson conduisirent à l'élaboration d'un nouveau cadre théorique, l'électrodynamique quantique, permettant de rendre compte des observations expérimentales avec une précision inégalée par ailleurs. L'électrodynamique quantique est en fait un prototype de théorie quantique des champs qui devait bientôt être étendu aux autres interactions fondamentales de la physique, comme les interactions faibles, responsables de la radioactivité β , et les interactions fortes, responsables de la stabilité des noyaux atomiques. Un modèle, dit standard, permet maintenant de traiter quantiquement les interactions électromagnétiques, faibles et fortes. Pour le moment, seule l'interaction gravitationnelle présente des difficultés pour être intégrée dans un tel cadre. Des espoirs sont placés dans une nouvelle approche, appelée « théorie des cordes », représentant les particules par des objets étendus, comme des cordes ou des membranes. Mais des confirmations expérimentales semblent encore lointaines. Rencontrons nous là une situation analogue à celle de la

fin du XIX^e siècle ? S'agit-il d'un nouveau « petit nuage », annonciateur de nouvelles révolutions conceptuelles ?

La lumière émise ou absorbée par les atomes : une source d'informations sur le monde qui nous entoure.

Revenons à l'étude de la lumière et introduisons les processus élémentaires par lesquels elle peut être émise ou absorbée par des atomes ou des molécules.

Nous avons déjà indiqué plus haut que l'énergie d'un atome était quantifiée et ne pouvait prendre que des valeurs discrètes. A chacune de ces valeurs correspond ce que nous appellerons un niveau d'énergie, qui est la généralisation quantique des orbites privilégiées de Bohr. Considérons un atome dans un niveau d'énergie E_b . Cet atome peut passer dans un niveau d'énergie inférieure E_a en perdant de l'énergie sous la forme d'un photon d'énergie $h\nu$. La conservation de l'énergie implique que $E_b - E_a = h\nu$. En effet, l'énergie perdue par l'atome passant de E_b à E_a est emportée par le photon émis d'énergie $h\nu$. Il existe donc une relation bien définie entre la fréquence ν de la lumière émise et les différences d'énergie entre paires de niveaux atomiques.

Le processus inverse existe bien sûr : l'absorption d'un photon par un atome. L'atome passe d'un niveau d'énergie E_a à un niveau d'énergie supérieure E_b en absorbant un photon qui lui fournit l'énergie nécessaire pour une telle transition.

La lumière émise ou absorbée par un atome a donc une série de fréquences discrètes égales, au facteur $1/h$ près, aux différences d'énergie entre paires de niveaux de cet atome. Cet ensemble de fréquences constitue un spectre de raies qui peut être mesuré expérimentalement au moyen d'un spectromètre.

Le point important est qu'un spectre de raies est caractéristique d'un atome. Il n'est pas le même pour un atome A et un atome B. C'est en quelque sorte une « empreinte digitale » de cet atome. En mesurant au moyen d'un spectromètre les fréquences de la lumière émise par un milieu, on peut donc identifier les atomes contenus dans ce milieu. C'est ainsi que la spectroscopie est la source essentielle d'informations que nous avons sur les objets astrophysiques : atmosphères stellaires et planétaires, espace interstellaire, galaxies. Le décalage Doppler des fréquences des raies émises, dû à la vitesse relative de l'émetteur par rapport à l'observateur, permet de mesurer la vitesse d'éloignement des galaxies et de mettre en évidence l'expansion de l'univers. Le déplacement Zeeman des raies dû à

un champ magnétique permet de mesurer le champ magnétique régnant dans le milieu émetteur. La largeur des raies émises fournit des informations sur la température du milieu. Notons enfin que les études spectroscopiques permettent d'étudier d'autres milieux que les milieux astrophysiques, comme des flammes ou des plasmas.

De nouvelles sources de lumière : les lasers

Depuis quelques décennies, les physiciens disposent de nouvelles sources de lumière, les lasers, permettant d'explorer de nouveaux aspects des interactions lumière matière et ouvrant la voie à de très nombreuses applications.

Le principe des sources laser repose sur des recherches fondamentales qui remontent à 1917. Pour retrouver la loi de Planck à partir de l'étude du bilan des échanges d'énergie entre un atome à 2 niveaux et un rayonnement à l'équilibre thermodynamique, Einstein a été amené à introduire deux types d'émission de photons : l'émission spontanée et l'émission stimulée. L'émission spontanée est le processus décrit plus haut : un atome excité dans un état E_b tombe spontanément dans un niveau d'énergie inférieure E_a en émettant un photon d'énergie $h\nu = E_b - E_a$, le photon étant émis dans n'importe quelle direction avec des probabilités égales dans 2 directions opposées. Si l'atome, dans l'état excité E_b , est en présence d'un photon d'énergie $h\nu = E_b - E_a$, un deuxième type d'émission se produit également au cours duquel l'atome tombe dans l'état E_a en émettant un photon en tous points identique au photon incident qui stimule cette émission, dans la même direction, avec la même énergie et la même polarisation que ce photon incident. Un tel processus peut amplifier un rayonnement incident si le nombre de photons nouveaux, identiques aux photons incidents et produits par émission stimulée, qui est proportionnel au nombre N_b d'atomes dans l'état E_b , est supérieur au nombre de photons incidents qui disparaissent par absorption à partir de l'état E_a , proportionnel au nombre N_a d'atomes dans cet état. Dans un milieu atomique en équilibre thermodynamique, on a toujours $N_b < N_a$, l'absorption est plus importante que l'émission stimulée et le rayonnement incident est atténué. De nouvelles méthodes sont cependant apparues au cours du siècle dernier, permettant de réaliser des situations hors d'équilibre, où la population N_b d'un niveau excité E_b peut être plus grande que la population N_a d'un niveau d'énergie inférieure E_a . Un tel milieu est dit "inversé". L'émission stimulée l'emporte alors sur l'absorption, et le rayonnement incident est amplifié. C'est l'effet laser (sigle pour "Light Amplification by Stimulated Emission Radiation"). La méthode proposée par Charles Townes et Arthur

Schawlow pour réaliser de nouvelles sources de lumière consiste à placer un milieu atomique amplificateur entre 2 miroirs partiellement réfléchissants. La lumière peut alors effectuer plusieurs allers et retours entre les 2 miroirs et subir à chaque fois une amplification. Si la cavité formée par les 2 miroirs est accordée sur la fréquence ν de la transition atomique et si le gain du milieu atomique est supérieur aux pertes lors de la réflexion sur les miroirs, l'amplificateur se transforme en oscillateur et on obtient une source lumineuse laser aux caractéristiques tout à fait nouvelles par rapport aux sources lumineuses conventionnelles (en intensité, directivité, cohérence, monochromaticité).

Les nouvelles sources laser ont permis aux physiciens d'explorer des nouveaux domaines de recherche, et d'acquérir une compréhension beaucoup plus satisfaisante des interactions matière rayonnement, notamment aux hautes intensités lumineuses. Mentionnons 2 exemples. Le premier concerne les processus non linéaires, comme les transitions à plusieurs photons entre 2 niveaux atomiques, la photo ionisation à plusieurs photons, la génération d'harmoniques. L'optique non linéaire est maintenant un domaine de recherche très actif, non seulement à cause de la richesse des phénomènes qui peuvent être étudiés, mais aussi à cause des nombreux dispositifs nouveaux qui peuvent être réalisés à partir de ces phénomènes et qui étendent au domaine optique toutes les techniques utilisées en électronique. Le second exemple concerne les impulsions laser ultra brèves qui peuvent être réalisées et qui durent des temps aussi courts qu'une femtoseconde (un millionième de milliardième de seconde !). L'utilisation de telles impulsions permet de suivre en temps réel la vibration d'une molécule et a donné naissance à un nouveau domaine de recherches, la femtochimie. Quant aux applications pratiques des sources laser, elles couvrent des domaines très variés : traitements de la rétine, lecteurs de CD, codes barre dans les supermarchés, télécommunications optiques dans des fibres optiques, découpe des matériaux, gyromètres laser pour la navigation, télémétrie, guidage des missiles....

La lumière : un outil pour manipuler les atomes

Lorsqu'un atome absorbe un photon incident, puis le réémet spontanément dans n'importe quelle direction de l'espace, son état est modifié. Cet atome a acquis certaines propriétés du photon absorbé. En choisissant convenablement la fréquence, la direction, la polarisation du faisceau lumineux qui excite les atomes, on peut donc manipuler ces atomes et modifier certaines de leurs propriétés physiques comme leur énergie, leur vitesse ou leur polarisation.

Premier exemple : refroidissement laser des atomes

Nous avons déjà mentionné plus haut comment l'absorption résonnante d'un photon augmente l'énergie d'un atome en le faisant passer de l'état E_a à l'état E_b . Montrons maintenant comment une telle absorption de photon peut changer la vitesse de l'atome.

Un atome absorbant des photons arrivant sur lui dans une direction bien définie puis les réémettant dans n'importe quelle direction, rappelle la situation d'une cible recevant une grêle de projectiles qui arrivent sur elle dans la même direction et qui rebondissent sur la cible dans toutes les directions possibles. Sous l'effet d'un tel bombardement, la cible subit une force moyenne qui la fait reculer dans la direction des projectiles incidents. Un atome placé dans un faisceau lumineux résonnant subit de même une « force de pression de radiation » qui le fait reculer dans la direction du faisceau incident. C'est un tel phénomène qui explique par exemple la queue des comètes, constituée de particules reculant dans une direction bien définie sous l'effet de la pression de radiation exercée par la lumière venant du soleil.

Une étude plus précise, que nous ne détaillerons pas ici et qui est basée sur l'utilisation des lois de conservation de la quantité de mouvement dans les interactions atome photon, permet de montrer que l'absorption et la réémission d'un seul photon change en moyenne la vitesse de l'atome d'une quantité de l'ordre de 10^{-2} m/s, c'est-à-dire de 1 centimètre par seconde. Cet effet semble faible, comparé aux vitesses d'agitation thermique des atomes à la température ambiante, qui sont plutôt de l'ordre du kilomètre par seconde. Mais ce petit effet peut être cumulé un très grand nombre de fois car on peut montrer qu'un atome placé dans un faisceau laser résonnant suffisamment intense peut absorber et réémettre environ 100 millions de photons par seconde (10^8 /s). Son changement de vitesse par seconde, c'est-à-dire encore son accélération (ou décélération), est alors de l'ordre de 10^{-2} m/s \times 10^8 /s = 10^6 m/s². Il est intéressant de comparer cette accélération à celle d'un corps tombant dans le champ de pesanteur, qui est de l'ordre de $g = 10$ m/s². Ainsi, dans un faisceau laser résonnant suffisamment intense, l'atome peut subir des forces de pression de radiation considérables, qui peuvent être 100.000 fois plus intenses que la force de pesanteur.

Ces forces de pression de radiation, combinées avec l'effet Doppler qui les rend sensibles à la vitesse de l'atome, et d'autres types de force que nous ne détaillerons pas ici et qui sont dues à des gradients d'intensité lumineuse ou à des gradients de champ magnétique, permettent maintenant de contrôler très efficacement la position et la vitesse des atomes. On

arrive couramment à obtenir des nuages atomiques contenant de 10^6 à 10^9 atomes piégés dans un petit volume spatial et sans contact avec une paroi, la température de ces atomes pouvant être aussi basse que 10^{-6} K, soit environ 300 millions de fois plus basses que la température ambiante, de l'ordre de 300 K. Les vitesses de ces atomes ultrafroids sont de l'ordre de quelques millimètres par seconde, alors que les vitesses des molécules de l'air aux températures ambiantes sont de quelques centaines de mètres par seconde. Les méthodes de refroidissement et de piégeage des atomes par des faisceaux laser, développées au cours des 2 dernières décennies, permettent donc de réaliser des situations tout à fait originales qui ouvrent des nouvelles perspectives discutées plus loin.

Deuxième exemple : pompage optique

Auparavant, mentionnons brièvement d'autres méthodes antérieures de manipulation des atomes, qui ont été développés à partir du début des années 1950 et qui concernent une autre de leurs propriétés physiques, la polarisation. Les atomes sont analogues à des petites toupies. Ils sont animés de mouvements de rotation donnant naissance à ce qu'on appelle un moment cinétique \mathbf{J} . Au mouvement de rotation des charges constituant l'atome est associé également un moment magnétique \mathbf{M} proportionnel à \mathbf{J} . Un atome dans un niveau d'énergie de moment cinétique non nul peut donc être considéré comme une petite aiguille aimantée. Dans un champ magnétique \mathbf{B} , l'énergie magnétique de l'atome dépend de l'angle entre \mathbf{M} et \mathbf{B} . Par exemple, l'énergie magnétique de la petite aiguille associée à l'atome n'est pas la même suivant que cette aiguille pointe dans la direction de \mathbf{B} ou dans la direction opposée, une situation qui rappelle celle de l'aiguille d'une boussole dans le champ magnétique terrestre.

Sous l'effet des seules interactions magnétiques avec le champ \mathbf{B} le moment magnétique de l'atome aurait tendance à s'orienter dans la direction pour laquelle l'énergie magnétique est la plus basse, qui est la direction parallèle à \mathbf{B} . C'est ce qui se passe pour l'aiguille d'une boussole qui s'oriente parallèlement au champ terrestre dirigé vers le nord. Les atomes d'un gaz sont en fait soumis à d'autres interactions comme celles résultant de collisions entre atomes ou de collisions avec la paroi de l'enceinte qui les contient. Ces collisions changent l'orientation du moment magnétique des atomes et tendent à instaurer un équilibre thermodynamique caractérisé par la température T de l'échantillon et dans lequel les moments magnétiques ne sont plus nécessairement tous parallèles à \mathbf{B} .

Aux températures usuelles et dans des champs magnétiques pas trop intenses, l'effet des collisions est prépondérant devant celui du champ

magnétique. Les moments magnétiques atomiques pointent dans toutes les directions possibles. On dit que l'échantillon atomique n'est pas polarisé. L'idée du « pompage optique » proposée par Alfred Kastler en 1950, et mise ensuite en oeuvre par Alfred Kastler et Jean Brossel à l'Ecole Normale Supérieure, consiste à éclairer les atomes avec de la lumière polarisée. Les photons associés à une onde convenablement polarisée ont un moment cinétique le long de leur direction de propagation. Ce moment cinétique est partiellement transféré aux atomes lors de cycles absorption – émission spontanée, ce qui fait apparaître une polarisation des atomes et donc une magnétisation le long d'une direction caractérisée par le faisceau lumineux. Cet effet de polarisation par pompage optique peut être plus efficace que l'effet désorientant des collisions et on peut ainsi obtenir des échantillons atomiques « polarisés », où une proportion appréciable des atomes pointent tous dans la même direction.

Une description plus précise des phénomènes, tenant compte de la quantification spatiale des atomes pourrait être donnée, sans changer les conclusions essentielles de la discussion simple précédente. Disons simplement ici que la projection J_z du moment cinétique sur l'axe z du champ magnétique, et donc celle M_z du moment magnétique de l'atome, ne peut prendre qu'un certain nombre de valeurs discrètes. Un niveau atomique donné comporte donc en fait plusieurs sous niveaux, appelés sous niveaux Zeeman, chaque sous niveau correspondant à une valeur possible de J_z . Dans un échantillon atomique non polarisé, tous les sous niveaux Zeeman sont également peuplés. La méthode de pompage optique permet de concentrer les atomes dans les sous niveaux Zeeman correspondant aux valeurs les plus élevées de M_z .

Il a été ainsi possible d'obtenir des informations très nombreuses et très précises sur les écarts énergétiques entre sous niveaux Zeeman et sur les divers processus de retour à l'équilibre thermodynamique par collisions. Il est intéressant de noter aussi que de nombreux concepts introduits lors de ces études, comme les déplacements des sous niveaux Zeeman dus à la lumière excitatrice, se sont révélés jouer un rôle important dans les mécanismes les plus efficaces de refroidissement laser. Mentionnons enfin une application récente du pompage optique utilisant les fortes polarisations d'échantillons gazeux de gaz rares pompés optiquement pour obtenir des images de résonance magnétique des cavités pulmonaires remplies par ces gaz mélangés à de l'air. Les méthodes traditionnelles d'imagerie par résonance magnétique, utilisant des milieux à l'équilibre très faiblement polarisés, ne fonctionnent qu'avec des milieux beaucoup plus denses, comme le sang, les os ou les tissus.

Perspectives ouvertes par les méthodes de manipulation des atomes

La possibilité de manipuler par la lumière les divers degrés de liberté de liberté d'un atome a ouvert un certain nombre de domaines de recherche nouveaux. Nous passons maintenant en revue un certain nombre d'entre eux, sans entrer dans des détails trop techniques.

Mesures de haute précision. Horloges atomiques.

Les atomes ultrafroids, animés de vitesses très faibles, demeurent un temps beaucoup plus long dans la zone d'observation. Or, la précision d'une mesure physique est d'autant plus élevée que le temps d'observation est plus long. Les atomes ultrafroids permettent donc de mesurer de manière ultra précise les fréquences des transitions atomiques et donc de réaliser des horloges atomiques asservies sur ces fréquences. Les meilleures horloges atomiques actuelles utilisent des atomes ultrafroids. Leur stabilité relative et leur exactitude atteignent quelques 10^{-16} . Pour donner une idée plus concrète d'une telle stabilité relative, mentionnons qu'elle correspond à une dérive de seulement 1 seconde sur 300 millions d'années. Les horloges à atomes ultrafroids permettent d'améliorer le système GPS et d'effectuer des nouveaux tests très sévères des théories fondamentales comme la relativité générale ou certains modèles prédisant par exemple une variation des constantes fondamentales sur des échelles de temps cosmologiques.

Grandes longueurs d 'onde de de Broglie. Interférométrie atomique.

Comme nous l'avons indiqué plus haut, la longueur d'onde de de Broglie associée à une particule est inversement proportionnelle à la vitesse de la particule. Comme cette vitesse est très faible pour des atomes ultrafroids, la longueur d'onde de de Broglie de ces atomes est beaucoup plus élevée que celle des atomes à température ambiante et on s'attend donc à observer plus aisément la nature ondulatoire de leur mouvement. Effectivement, de nombreuses expériences ont été réalisées, reproduisant avec les ondes de de Broglie associées à des atomes ultrafroids les effets d'interférence et de diffraction observés avec des ondes lumineuses. Des interféromètres atomiques de très grande sensibilité ont été réalisés pour mesurer des vitesses de rotation (gyromètres) ou des champs de gravitation.

Gaz quantiques dégénérés. Condensats de Bose Einstein gazeux.

Aux températures très basses atteintes par le refroidissement laser complété par d'autres méthodes comme le refroidissement par évaporation, la longueur d'onde de de Broglie des atomes devient de l'ordre de quelques microns. Les paquets d'onde des divers atomes peuvent alors se recouvrir et interférer même si la distance moyenne entre atomes est de l'ordre du micron, c'est à dire si l'échantillon est gazeux. Il devient ainsi possible d'observer sur de tels gaz ultrafroids des effets dits de dégénérescence quantique.

Un premier exemple de ces effets est la condensation de Bose Einstein. Les atomes se répartissent en 2 catégories, suivant le caractère entier ou demi entier d'un nombre quantique caractérisant le moment cinétique de l'atome. Si ce nombre quantique est entier, les atomes sont des bosons et plusieurs bosons peuvent occuper le même état quantique. S'il est demi entier, les atomes sont de fermions et le principe d'exclusion de Pauli interdit à 2 fermions d'occuper le même état. Einstein a prédit en 1924 que si la température d'un gaz d'atomes bosoniques descend au dessous d'une certaine température critique, un nombre macroscopique de bosons identiques piégés viennent occuper tous la même fonction d'onde associée au même état quantique, donnant ainsi naissance à une onde de matière géante. Cet effet a pu être observé la première fois il y a 10 ans sur des gaz d'atomes ultrafroids. Une activité intense, tant théorique qu'expérimentale, est actuellement consacrée à l'étude de ces systèmes. Des effets quantiques macroscopiques, comme la cohérence ou la superfluidité peuvent maintenant être observés et étudiés sur des gaz alors que de telles observations n'avaient pu jusqu'ici être effectuées que sur des systèmes denses comme l'hélium liquide ou les supraconducteurs. Des faisceaux cohérents d'ondes de de Broglie peuvent être extraits de ces condensats gazeux, formant un « laser à atomes » présentant de nombreuses analogies avec les lasers ordinaires, les ondes lumineuses cohérentes d'un laser ordinaire étant remplacées par des ondes de de Broglie. Plus récemment, de telles études ont été étendues aux gaz d'atomes fermioniques. Le régime de dégénérescence quantique a été largement atteint et de nombreux effets nouveaux sont en cours d'étude sur ces systèmes.

Les gaz ultrafroids dégénérés présentent de nombreux avantages. La distance moyenne entre atomes étant beaucoup plus grande que la portée du potentiel d'interaction entre atomes, les atomes n'interagissent que lorsqu'ils entrent en collision. La plupart du temps, les atomes sont libres, puisque la durée moyenne d'une collision est beaucoup plus courte que le temps séparant 2 collisions successives subies par le même atome. Le rôle des interactions entre atomes peut donc être analysé de manière beaucoup plus approfondie que pour un système dense où les atomes interagissent en

permanence. De plus, le balayage d'un champ magnétique au voisinage de certaines valeurs appelées "résonances de Feshbach" permet de modifier l'effet des collisions et de modifier ainsi à volonté les interactions entre atomes. Les gaz atomiques ultrafroids constituent ainsi un système idéal pour lequel tous les paramètres physiques (température, densité, volume de piégeage, interactions) peuvent être contrôlés par l'expérimentateur. On peut espérer qu'une compréhension plus approfondie des effets quantiques macroscopiques résultera de telles études.

Information quantique

Une notion importante en théorie de l'information est celle de « bit » d'information. Elle fait intervenir des systèmes pouvant exister dans 2 états seulement, + ou -, 1 ou 2.

Un bit quantique, appelé encore « qubit », est un système à 2 états quantiques ϕ_0 et ϕ_1 . Un tel système peut exister, non seulement dans chacun des 2 états ϕ_0 ou ϕ_1 , mais encore dans n'importe quelle combinaison linéaire $c_0\phi_0 + c_1\phi_1$. Une bien plus grande variété d'états peut donc exister pour un bit quantique, due au fait que les états quantiques peuvent être superposés linéairement. Par ailleurs, 2 bits quantiques peuvent exister dans un état « intriqué » dans lequel ils ne peuvent pas être considérés comme 2 entités séparées. Il existe alors entre ces 2 qubits des corrélations quantiques subtiles ouvrant des perspectives prometteuses dans le domaine de l'information, compte tenu notamment de notre plus grande maîtrise dans la manipulation des systèmes atomiques.

Dans ce domaine également, la lumière joue un rôle important. Un photon peut être considéré comme un qubit dans la mesure où il peut exister dans 2 états de polarisation linéaires orthogonaux, et dans n'importe quelle superposition linéaire de ces 2 états. Dans une cascade radiative où un atome passe d'un état E_c à un état d'énergie inférieure E_b en émettant un premier photon, puis de l'état E_b à un troisième état d'énergie inférieure E_a en émettant un deuxième photon, on peut montrer que les 2 photons ainsi émis sont dans un état intriqué du point de vue de leur polarisation. D'autres processus d'optique non linéaire, comme les processus de conversion paramétrique, donnent également naissance à des paires de photons dans un état intriqué. De telles paires de photons sont maintenant utilisées pour permettre à 2 opérateurs d'échanger des informations sans risque de voir ces informations interceptées par un espion. Cet exemple de « cryptographie quantique » est un premier exemple d'utilisation de la lumière dans le domaine nouveau très prometteur de l'information quantique. On peut espérer qu'il sera suivi de nombreuses autres réalisations dans les années à venir.

Ainsi, l'étude de la lumière et de ses interactions avec la matière a été et demeure toujours une ligne de recherche très féconde pour la physique. Elle a permis de dégager des concepts très fondamentaux et très généraux comme la relativité de l'espace et du temps, l'équivalence entre masse et énergie, la dualité onde corpuscule, la quantification des grandeurs physiques. Les cadres théoriques élaborés pour l'étude des interactions électromagnétiques, comme l'électrodynamique quantique, ont été étendus à d'autres interactions comme les interactions faibles et fortes. La spectroscopie, c'est-à-dire l'étude des spectres de raies émises par les atomes et molécules, s'est révélée comme une source d'informations essentielles pour comprendre la structure interne de ces objets et aussi pour déterminer la composition et les propriétés de divers types de milieux, comme les milieux astrophysiques. Nous savons maintenant réaliser des nouvelles sources de lumière, les lasers, dont les performances sont sans commune mesure avec celles de toutes les autres sources connues jusqu'ici. L'utilisation de ces sources pour manipuler les atomes nous permet de réaliser des situations complètement nouvelles, comme les atomes ultrafroids, les gaz quantiques dégénérés, permettant de poser de nouvelles questions fondamentales et d'espérer des nouvelles applications dont nous ne soupçonnons pas encore toute l'étendue.

Claude Cohen-Tannoudji