



HAL
open science

Division Physique Atomique Moléculaire Optique (PAMO)

Andrew Mayne, Fabrice Catoire, Olivier Dulieu

► **To cite this version:**

Andrew Mayne, Fabrice Catoire, Olivier Dulieu. Division Physique Atomique Moléculaire Optique (PAMO). Les 150 ans de la Société Française de Physique, EDP Sciences, 2023, 978-2-7598-3075-6. hal-04279622

HAL Id: hal-04279622

<https://hal.science/hal-04279622>

Submitted on 10 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Division Physique Atomique Moléculaire Optique (PAMO)

Andrew J. Mayne
Fabrice Catoire
Olivier Dulieu

Introduction

La physique atomique, moléculaire et optique couvre beaucoup de domaines de la physique. Elle a eu des impacts dans des domaines aussi variés que la philosophie (dualité onde-corpuscule, principe d'incertitude et déterminisme, etc.) mais également dans la vie de tous les jours avec l'avènement de technologies comme le laser, l'électronique et bien d'autres.

Les approches modernes de cette science commencent avec les expériences de Newton essayant de déterminer la nature de la lumière, et la théorie développée par Dalton sur la composition de la matière en introduisant la notion moderne « d'atome ».

Sans vouloir donner une vision exhaustive, nous présentons dans ce chapitre quelques faits marquants pour illustrer la discipline ainsi que quelques portraits de personnalités qui l'ont marquée.

Aperçus historiques du développement de la physique atomique, moléculaire et optique

L'histoire de la physique atomique moléculaire et optique est complexe et a été sujette à de nombreuses péripéties. Entre la première tentative de la description de la matière par Démocrite – qui a introduit le concept d'atome venant du grec *ἄτομος* qui veut dire insécable – à la démonstration empirique de son existence, il aura fallu une maturation de presque deux millénaires. Nous allons ici nous concentrer sur un exemple concret – l'effet Auger – la dynamique allant de la découverte à l'application en passant par la compréhension appuyée par une interprétation théorique.

Pierre Auger était jeune thésard lorsqu'il s'est intéressé à la photo-ionisation – l'émission d'électrons induits par l'irradiation d'une cible avec des particules de haute énergie (Briand, 2011). En s'inspirant des travaux de Wilson, il construit la première chambre à brouillard en France. La chambre de Wilson a été conçue pour détecter les particules émises par des noyaux radioactifs. Son travail de thèse, sous la direction de Jean Perrin à l'École Normale Supérieure de Paris, entrepris entre 1922 et 1925, lui a permis de

découvrir une nouvelle forme d'excitation et d'émission d'électrons (Hardouin Duparc, 2010). Le principe est le suivant : lorsqu'une particule de haute énergie (photon-X, rayon-Gamma, ou électron rapide) entre en interaction avec un atome (cible solide ou gaz), un électron d'une couche interne est éjecté. Pour combler cette lacune caractérisant un ion dans un état excité, soit un autre électron d'une couche externe recombine en émettant l'excédent d'énergie sous forme d'un photon X, soit un électron d'une couche externe recombine et l'excédent d'énergie permet l'éjection d'un autre électron. C'est l'interaction coulombienne – qui peut être vue comme une absorption de photon virtuel – entre les deux électrons impliqués dans ce mécanisme qui permet l'éjection d'un électron et de produire un ion doublement chargé. L'électron, ainsi éjecté, est appelé électron Auger. Lors de cette découverte, il fallait à la fois comprendre le mécanisme mis en jeu permettant la création de ces « nouveaux » électrons à énergie bien définie, mais également faire face aux limites des techniques expérimentales disponibles à l'époque. Les spectres observés montrent sur une très large gamme d'énergie une bande continue parsemée de pics discrets et étroits. Les scientifiques comme Lise Meitner et Otto Hahn pensaient que les pics discrets avaient pour origine une physique se produisant au sein du noyau de l'atome, et que la partie continue était due à des perturbations de ces pics. L'autre souci auquel Pierre Auger s'est confronté était l'analyse des spectres. Les spectres ont été enregistrés sur des plaques photographiques qui présentent une faible sensibilité. La trace du premier électron dit « dur » – de haute énergie – était donc facile à voir, mais les électrons secondaires plus « mous », ou moins énergétiques, étaient très difficiles à observer car ils étaient absorbés par la matière environnante, et donc l'empreinte due à ces électrons était faible. En dépit de ces difficultés, la ténacité et la sagacité de Pierre Auger ont permis de mettre en évidence l'existence et la nature de ces électrons de faible énergie, et de donner une explication de leur origine (Auger, 1923, 1925). Bien que l'effet Auger fut mentionné par des scientifiques dès 1927, il est resté un peu aux oubliettes pendant des décennies. Il aura fallu des progrès technologiques, notamment l'avènement des vides plus poussés et des jets atomiques, pour que l'effet Auger soit « redécouvert » dans les années 1960 par Madden et Codling (que nous allons recroiser dans l'histoire du synchrotron) (Madden et Codling, 1963). Aujourd'hui, les

appareils dédiés à la mesure des spectres Auger permettent l'étude et la caractérisation chimique des matériaux dans des domaines divers, allant de la physique des surfaces jusqu'aux applications industrielles. L'année 2023 sera la centenaire de la découverte faite par Pierre Auger.

Schéma d'illustration de l'effet Auger : Par l'absorption d'un photon X , un électron de la couche K est éjecté. L'ion ainsi créé est instable et la lacune réalisée en couche interne est comblée par le recombinaison d'un électron d'une couche externe – ici M2. L'excédent d'énergie permet de libérer un électron – dans cette illustration provenant de la couche M3 – possédant une énergie cinétique $E_K = E_{M3} + (E_{M2} - E_K)$ caractéristique du processus Auger.

Essor des outils expérimentaux pour la physique atomiques et moléculaires

Le domaine de la physique atomique et moléculaire a connu un essor important notamment par le développement spectaculaire des outils d'analyses et des sources. Dans cette section nous allons illustrer les développements de deux de ces outils : le laser et le synchrotron. Le premier a eu un impact scientifique et sociétal sans égal qui a été le fruit de plus de 50 ans de recherche et développement. Le second a permis l'émergence d'une analyse de pointe (spectroscopie, imagerie, etc.) et a fortement contribué à la compréhension des recherches menées en physique atomique et moléculaire. C'est avec ce regard que nous abordons cette présentation.

Lasers

Les découvertes et avancées scientifiques décrites dans la section suivante n'auraient pas pu voir le jour sans l'invention d'un dispositif clé : le laser. Le récit de la genèse du laser commence avec la découverte des propriétés de la lumière (Cagnac et Chareyron, 2017 ; *Reflète de la physique*, octobre 2010). Il a longtemps été admis que la lumière était composée de particules (voir la section sur Newton). Cette conception de la lumière a dû être révisée quand en 1801, Thomas Young a fait son expérience en irradiant simultanément deux fentes étroites. Il a observé la formation de franges d'interférence sur le détecteur placé derrière les fentes. La lumière présente donc un comportement ondulatoire. Par la suite, la théorie a été consolidée par les travaux d'Augustin Fresnel et François Arago. Une avancée cruciale a été

accomplie par James Clark Maxwell en 1865, lorsqu'il a décrit la lumière comme une onde électromagnétique composée d'un champ électrique et d'un champ magnétique disposés perpendiculairement l'un par rapport l'autre, et perpendiculaires à l'axe de propagation (Maxwell, 1865; Catoire, 2012).

À présent, il faut considérer l'interaction de cette onde avec la matière. Pour cela, il faut se rappeler la structure de l'atome proposée par Niels Bohr en 1913. Un atome est composé d'un noyau qui est lui-même entouré d'électrons placés dans des orbites ayant des énergies bien définies. Les scientifiques ne connaissaient que deux processus d'interaction entre la matière (les atomes) et la lumière : l'absorption et l'émission spontanée. Le premier processus se produit quand l'atome absorbe un photon, et l'énergie reçue par l'atome permet à un électron d'un niveau inférieur d'être promu vers un niveau supérieur (où la différence d'énergie correspond exactement à l'énergie du photon). L'atome ainsi irradié est dans un état dit excité. Le deuxième processus est l'inverse du premier : un atome excité possédant un électron dans un niveau supérieur peut revenir dans un état d'énergie inférieure, voire vers le fondamental par émission d'un photon dont l'énergie est exactement la différence entre les deux niveaux. Ce mécanisme admis ne devrait pourtant pas se produire dans une vision stationnaire des états atomiques. Ce n'est que bien plus tard que l'on comprendra que ce mécanisme ne peut être compris qu'en introduisant une description quantique de la lumière et en prenant en compte le vide (de photons) et ses fluctuations (Dirac, 1927).

En 1905, Albert Einstein propose un troisième processus qu'il a nommé « émission stimulée », alors qu'il cherchait une interprétation du rayonnement du corps noir (Einstein, 1905, 1917). Ici, il s'agit d'irradier un atome déjà dans un état excité avec des photons ayant la même énergie que la transition que l'électron doit effectuer. Par ce processus, on produit un deuxième photon avec la même énergie et on montre que ces photons sont en tout point identiques. De ce fait, la lumière incidente est enrichie des photons ainsi générés par le processus d'émission stimulée. Il est donc en principe possible d'amplifier le rayonnement si on arrive à piéger les atomes dans un état excité suffisamment longtemps.

C'est seulement 40 ans après la découverte de l'émission stimulée qu'en 1954 Charles H. Townes a trouvé une astuce permettant de conserver les atomes dans un état excité : en effet, la probabilité de désexcitation par émission spontanée est réduite en choisissant une fréquence dans la gamme des micro-ondes permettant ainsi la désexcitation par émission stimulée avant qu'elle n'ait lieu par émission spontanée. Il a étudié la molécule d'ammoniac, en profitant du fait que les molécules d'ammoniac non excitées n'ont pas le même moment dipolaire que les molécules excitées : un champ magnétique lui a permis de séparer spatialement les molécules excitées des molécules non excitées. Ainsi, l'onde radar produite par les molécules excitées a été amplifiée au cours de sa propagation. Il a construit un MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). L'année suivante, il a profité d'une année sabbatique passée à l'École Normale Supérieure de Paris pour travailler avec Alfred Kastler. Alfred Kastler était maître de conférences à l'université de Bordeaux avant de succéder à Pierre Auger à l'Université de Paris (et délégué à l'ENS), lui-même parti aux États-Unis. Alfred Kastler étudiait alors le moment magnétique des atomes avec de la lumière polarisée en utilisant le pompage optique. Grâce au pompage optique, Charles Townes a ainsi pu fabriquer le premier MASER, qu'il a présenté dans un article avec Arthur Schawlow en 1958 (Schawlow et Townes, 1958). En 1960, Teddy H. Maiman a étendu cette approche au cas d'un matériau pompe qui est un cristal de rubis. Cette initiative lui a permis d'effectuer une amplification du signal dans une longueur d'onde du visible et donc de réaliser ainsi le premier LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Figures 2-1 et 2-2 : Schéma d'illustration de la propagation d'une onde électromagnétique. Ici sont illustrées l'évolution du champ magnétique (en bleu) et électrique (en rouge) au cours du temps en un point donné de l'espace. L'évolution temporelle pour une onde plane – comme illustré dans cette figure – est caractérisée par un schéma temporelle qui se répète avec la périodicité T . Cette périodicité temporelle possède un homologue dans le domaine spatial qui est la longueur d'onde notée λ . Ces deux grandeurs sont reliées entre elle par la relation $c = \lambda/T$ où c est la vitesse de la lumière ici dans le vide.

Catoire, 2012, p. 24-35. (Photos : Alfred Kastler et Charles H. Townes.)

Synchrotrons – LURE et SOLEIL

Le développement du synchrotron a débuté aux États-Unis dans les années 1940 (Robinson, 2015 ; Codling et J. Synch, 1997). L'origine du projet est née du souhait des physiciens nucléaires de produire des sources de rayons X de haute énergie. Pour cela, il fallait construire un « betatron », c'est-à-dire un faisceau étroit d'électrons rapides projetés sur une cible métallique, produisant ainsi une source intense de rayons X. Le premier synchrotron a été construit à l'Université d'Illinois en 1940. Des calculs d'Ivanenko, de Pomeranchuk (Ivanenko et Pomeranchuk, 1944) puis de Schwinger (Schwinger, 1949) ont montré que la radiation lumineuse produite par des électrons accélérés à des vitesses relativistes pouvait être décrite classiquement, et qu'une trajectoire circulaire donnerait une distribution optimale du rayonnement émis.

La première observation de la lumière synchrotron a été faite par Pollack à General Electric en 1947. Par sérendipité, la couche protectrice du tube contenant le faisceau d'électrons était transparente. L'ingénieur qui a regardé l'intérieur avec un miroir a observé un arc de lumière. Jusqu'au début des années 1960, l'objectif primaire des faisceaux X a été la physique nucléaire, mais des expériences de mesures de transmission près des niveaux K et L réalisées sur des cibles d'alumine ont permis de bien comprendre les caractéristiques de la lumière synchrotron. La première génération de synchrotron a été construite au National Bureau of Standards par Madden et Codling (ceux qui en même temps ont redécouvert l'effet Auger !). L'intérêt de cette lumière synchrotron a stimulé la construction des premières machines en Europe, notamment à Frascati en Italie et DESY à Hambourg.

Un grand saut technique est survenu au début des années 1970 avec le développement des anneaux de stockage des électrons. L'anneau de stockage fournit un faisceau plus intense et stable sur de longues durées. Bien que le premier accélérateur opérationnel ait été construit à l'Université du Wisconsin, la France a mis en place le premier anneau – ACO : Anneau de Collision d'Orsay – en 1971 à partir des éléments de celui de Frascati. Ce projet a été initié par Sydney Leach et ses collègues Irène Nenner, Paul-Marie Guyon et Yves Farge (Leach, 1997). Ayant fonctionné entre 1971 et 1988, ACO peut aujourd'hui être visité comme musée. La deuxième génération de source synchrotron, comme SRS à Daresbury et SuperACO à Orsay, a vu le jour dans les années 1980.

Au début, la physique des synchrotrons concernait essentiellement la production de particules exotiques, et la physique issue du rayonnement synchrotron passait au second plan. Ceci est la conséquence du fait que la production de faisceaux d'électrons de faible courant induisait une faible brillance du rayonnement. Les scientifiques ont donc cherché à augmenter cette brillance. Le mécanisme de production du rayonnement ne reposant pas sur de l'amplification, il a fallu travailler sur la source d'électrons, notamment en inventant une nouvelle configuration d'aimants. D'autres avancées techniques comme celle des onduleurs peuvent également être insérées dans l'anneau lui-même. Ces nouvelles approches ont permis le développement de la troisième génération de synchrotron, améliorant sensiblement la brillance du rayonnement, et dont le premier construit fut l'ESRF à Grenoble en 1994.

Photos : ACO, SOLEIL et ESRF. Photos : Yves Farge.

Légendes Photos :

Photo de l'anneau d'ACO le premier synchrotron en France.

Photo aérien des synchrotrons actuellement opérationnels – SOLEIL à Saclay et l'ESRF à Grenoble.

Développement de la physique atomique, moléculaire et optique

Spectroscopie moléculaire

La recherche scientifique d'après-guerre n'a pas été une simple affaire (Guthleben, 1959). Cette génération de chercheurs commençait avec peu de moyens mais avec un enthousiasme inébranlable. C'est dans ce contexte que Sydney Leach, jeune britannique, est arrivé en France en 1946 pour étudier la spectroscopie des molécules (Leach, 1997). Il a intégré l'équipe d'Edmund Bauer et Michel Magat au Laboratoire de Chimie Physique à Paris. Pour poursuivre ses expériences, Sydney Leach avait besoin de construire un tube de Schüler. Celui-ci est composé d'un tube en verre avec une cathode et anode à chaque extrémité. En appliquant une tension élevée entre les deux électrodes à travers un gaz rare (souvent l'Argon), des photons sont émis qui à leur tour peuvent exciter d'autres molécules ajoutées au gaz rare. Mais les matériaux manquaient et il n'avait pas d'argent. Bauer lui a suggéré d'aller piocher dans les expériences de Pierre Auger laissées au sous-sol depuis.

Avec l'aide des verriers du laboratoire entassés dans une cabine dans la cour d'école, Sydney Leach réussit à fabriquer son tube de Schüler. Ainsi, il a pu obtenir les premiers spectres d'émission d'OH (neutre et chargé).

Malgré les pénuries, les discussions scientifiques fleurirent. Soutenus par les Sociétés Françaises de Physique et de Chimie, des séminaires bimensuels et des colloques internationaux étaient des lieux de partage et d'échanges d'idées avec les scientifiques de renom de l'époque : Gerhard Herzberg, Robert Mulliken, Linus Pauling, Louis Néel et Charles Coulson, parmi beaucoup d'autres.

Sur cette dynamique d'après-guerre, la spectroscopie moléculaire a progressé rapidement pendant les années 1950 et 1960. Avec le développement de nouvelles techniques, comme les jets supersoniques (composés soit d'atomes soit de molécules) croisés par un faisceau d'électrons (Horani et Leach, 1959), il a été possible de réaliser une spectroscopie fine et de faire des études précises, comme par exemple celle de molécules cycliques (Leach et Lopez-Delgado, 1964), et de la luminescence des molécules (ou leurs radicaux) piégées dans des matrices solides (Cossart-Magos, Leach *et al.*, 1972). Il est important de souligner qu'en parallèle à cette avancée expérimentale, les calculs ont connu le même essor, ce qui a permis aux scientifiques de mieux comprendre leurs résultats expérimentaux (Leach, Velghe, *et al.*, 1976). L'invention du laser (voir section Synchrotrons – LURE et SOLEIL) par Charles H. Townes a également ouvert une nouvelle voie de recherche sur l'étude de la dynamique moléculaire, et permis par exemple les mesures des durées de vie des états excités (Field, Simons, *et al.*, 2020).

La fin des années 1960 et le début des années 1970 ont apporté à leur tour des avancées majeures, motivant la création de nouveaux laboratoires qui allaient impacter la physique atomique, moléculaire et optique en France : le Laboratoire de Photophysique Moléculaire (fondé par Sydney Leach), et le Laboratoire de Chimie-Physique et des Rayonnements (qui deviendra plus tard le Laboratoire de Chimie-Physique) fondé par Michel Magat (Leach, 1997). Côté technologie, le développement du rayonnement synchrotron (voir section Synchrotrons – LURE et SOLEIL) aura permis de sonder les états très excités des atomes et des molécules.

Les gaz quantiques ultra-froids

Le refroidissement des atomes par laser a sans aucun doute contribué à un renouveau de la physique quantique moderne. Immédiatement après la découverte du laser – dispositif physique dont les propriétés sont contrôlées avec une précision incomparable – débutaient les recherches sur la possibilité d’influencer le mouvement des atomes par le laser. À peine vingt ans après, le refroidissement des atomes par laser était démontré, d’abord sur des ions atomiques, puis sur des atomes neutres. La combinaison du laser et de champs magnétiques externes a permis d’aboutir au confinement spatial de particules quantiques dans des pièges magnéto-optiques. La compréhension extrêmement fine et profonde de l’interaction entre le laser et les atomes a permis de diversifier les dispositifs de piégeage, donnant naissance à un nouveau domaine de recherche, celui des gaz quantiques ultra-froids. Ainsi, des échantillons gazeux contenant jusqu’à plusieurs millions d’atomes, animés de vitesses équivalentes à une température inférieure au millionième de degré Kelvin, ont pu être étudiés en laboratoire. On n’avait jamais été aussi proche de la limite « mythique » du zéro absolu ! Outre le contrôle poussé du mouvement des particules, qui permet d’effectuer des mesures de précision inégalée, la dégénérescence quantique induite par les propriétés collectives des particules dans le gaz, prévue de longue date par Bose, Einstein ou Fermi a finalement été observée en laboratoire. Ces découvertes déterminantes pour le futur de la physique ont été successivement récompensées par plusieurs Prix Nobel : il a été attribué en 1997 à S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, et W. D. Phillips pour le refroidissement laser, en 2001 à E. A. Cornell, W. Ketterle, et C. E. Wieman pour l’observation de la condensation de Bose-Einstein dans des gaz d’atomes ultra-froids, et en 2012 à S. Haroche et D. Wineland pour la manipulation de systèmes quantiques individuels (Cohen-Tannoudji, 2013).

Le refroidissement laser des atomes repose sur le principe simple de la pression de radiation : un photon de fréquence appropriée est absorbé par un atome dans une direction donnée (celle du faisceau laser), qui le réémet dans une direction aléatoire. Lorsque des atomes sont exposés à trois paires de faisceaux lasers contre-propageants selon les trois directions de l’espace, ils subissent une force de friction dans toutes les directions et sont

donc ralentis : on parle alors d'une mélasse optique. Lorsque l'on y superpose un champ magnétique inhomogène, les niveaux d'énergie de l'atome varient spatialement, de sorte à ce que les atomes soient entraînés vers l'endroit où ce champ est minimal : c'est le piège magnéto-optique, qui s'est révélé être d'une très grande efficacité pour préparer des gaz d'atomes froids, avec une température certes très basse, mais limitée à environ 1 millikelvin. Il est alors possible d'abaisser encore plus la température du gaz par d'autres techniques, comme le piège purement magnétique, qui agit sur le moment magnétique des atomes avec un champ magnétique externe, particulièrement prisé pour son utilisation dans des dispositifs miniaturisés (« atom chips ») permettant de piéger des atomes près d'une surface avec un fort gradient de champ magnétique. Une alternative très usitée est le piège dipolaire, créé par un faisceau laser focalisé dont la fréquence est choisie plus petite que toutes les fréquences de résonances de l'atome : le champ électromagnétique induit ainsi un dipôle et donc une force qui attire l'atome vers les maxima d'intensité lumineuse. C'est le principe de la pince optique, proposé par A. Ashkin (prix Nobel 2018) dans les années 1980 pour manipuler des particules biologiques, et qui fonctionne donc aussi pour piéger des atomes individuels, comme cela a été démontré par exemple dans le groupe d'A. Browaeys (LCF, Palaiseau).

Dans cette « quête du zéro absolu », c'est le refroidissement évaporatif qui a permis de franchir le pas vers l'obtention de gaz quantiques dégénérés : cette approche, bien connue en cryogénie, consiste simplement à laisser les atomes les plus chauds du gaz s'évaporer par collisions, tandis que demeurent dans le piège les atomes de plus en plus froids. Elle est efficace dès que l'échantillon initial est suffisamment froid avec un nombre suffisant de particules. Il est utile de rappeler ici que de tels gaz quantiques demeurent très petits (quelques dizaines de milliers d'atomes) et très dilués ($\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$). C'est leur très faible « température » (de l'ordre de quelques nanokelvins !) qui leur confèrent des propriétés collectives (en vertu de leur grande longueur d'onde de De Broglie) assimilables à celles de la matière condensée. Les propriétés ondulatoires des atomes se manifestent également de façon spectaculaire, lorsque des faisceaux atomiques adoptent des propriétés de cohérence similaires à celles du laser (on parle de laser à atomes et d'interférométrie atomique).

Toutes ces approches ont maintenant été démontrées de façon prometteuse pour les systèmes plus complexes que constituent les molécules diatomiques (et quelques exemples de molécules polyatomiques). De par leurs degrés de liberté internes (vibration, rotation), les molécules offrent des possibilités de contrôle encore plus élaborées. Par exemple, les molécules dipolaires – possédant un moment dipolaire permanent dans leur référentiel propre – peuvent interagir de façon anisotrope au travers de l'interaction dipôle-dipôle, ce qui en fait une plateforme très attractive pour de futures expériences de simulation quantique, consistant à reproduire des propriétés anisotropes de la matière condensée avec des gaz quantiques dégénérés dipolaires. Ces molécules dipolaires ultra-froides représentent une troisième voie dans ce contexte, avec les atomes paramagnétiques (comme l'erbium, le dysprosium), et les atomes de Rydberg (atomes extrêmement excités présentant un moment dipolaire instantané de plusieurs ordres de grandeur supérieur à celui des molécules !). Les molécules ultra-froides ont conduit aussi à l'émergence d'un nouveau domaine de recherche, celui de la « chimie ultra-froide », dominée par des effets quantiques.

Les particules ultra-froides sont promises à des applications dont la plupart restent sans doute à découvrir. Mais le caractère ultime de la précision avec laquelle ces particules peuvent être contrôlées a déjà conduit à des avancées remarquables dans le domaine de la métrologie. Depuis que la définition de la seconde repose sur une transition micro-onde de l'atome de césium mesurée dans un échantillon d'atomes froids et piégés, des perspectives d'amélioration considérable de la mesure du temps – au travers des mesures de fréquences de transition entre niveaux atomiques – se sont ouvertes avec d'autres espèces atomiques comme le strontium. Ces atomes partagent ce potentiel avec les ions piégés refroidis par laser (ces derniers pouvant être individuellement piégés dans des dispositifs très robustes). D'autres applications concernent la mesure des effets gravitationnels engendrés par la Terre, les capteurs inertiels, la détection d'ondes gravitationnelles, etc. Enfin, ces particules ultra-froides demeurent l'une des solutions d'avenir pour le stockage d'informations, ce qui nourrit l'espoir de la réalisation d'un ordinateur quantique.

Il est fascinant de réaliser qu'aujourd'hui, cet outil qu'est le laser, qui peut être contrôlé avec une précision extrême par les chercheurs et qui a envahi tous les aspects des

sociétés humaines, voit ses propriétés transférées vers la matière que représentent les gaz quantiques ultra-froids. Ceux-ci ont ainsi permis d'obtenir en laboratoire des résultats véritablement révolutionnaires, révélant les possibilités ultimes de contrôle de la matière jusqu'au niveau quantique unique et choisi.

Pour en savoir plus sur ce domaine de recherche, on pourra se référer à l'excellent ouvrage édité en 2020 par EDP Sciences, *Atomes, Ions, Molécules Ultra-Froids, et Technologies Quantiques*, sous la conduite de R. Kaiser, M. Leduc, et H. Perrin (Kaiser, M. Leduc *et al.*, 2020).

Schéma de principe du piège magnéto-optique (MOT). Une onde laser polarisée circulairement droite (S^+) provenant de la gauche est réfléchiée sur un miroir de telle sorte qu'une onde polarisée circulairement droite (S^-) vient localement s'ajouter à la première onde au centre du piège. Deux autres laser croisés perpendiculairement au premier – indiqués par les rayons rouges sur la figure – ayant les mêmes propriétés de polarisation sont ajoutés. Cette configuration laser, ainsi que l'ajout du champ magnétique au travers des bobines de Helmholtz, permettent d'obtenir une configuration de champ en trois dimensions conduisant au ralentissement des atomes comme explicité dans le texte. (Photos : Claude Cohen-Tannoudji, Serge Haroche)

L'optique quantique

Le début du XX^e siècle est connu pour le développement de la mécanique quantique, dont les principaux acteurs sont entre autres Albert Einstein, Werner Heisenberg, Niels Bohr, Edwin Schrödinger et Louis de Broglie (voir Chapitre 6 qui donne un aperçu plus détaillé de l'histoire). En 1935, Albert Einstein et ses collègues Boris Podolsky et Nathan Rosen de l'Université de Princeton ont posé une *gedanken experiment*, ou une expérience de pensée. Dans un article publié dans *Physical Review* (Einstein, Boris Podolsky *et al.*, 1935), ils posent la question de la complétude de la mécanique quantique – au même titre que Gödel en mathématiques.

L'interprétation de Copenhague de la physique quantique – vision de Bohr et du courant de pensée créé par ce dernier – repose sur le fait que l'état quantique d'un système n'est pas connu avant d'être observé, ce qui conduit à la théorie probabiliste de cette branche de la physique. Si lors d'une expérience, deux particules sont émises et qu'une relation de

conservation existe pour une de leurs propriétés (par exemple la somme de leurs spins est nulle), la connaissance d'une des propriétés de l'une nous informe instantanément sur l'état de l'autre particule, et ceci quelle que soit la distance qui sépare les deux particules. En d'autres termes, la seconde particule ne peut être informée de l'état de la première, ce qui dans ces conditions implique que cette propriété est déterminée dès le départ, en contradiction avec l'interprétation de la physique quantique de l'école de Copenhague. C'est ce que relève le paradoxe EPR (pour Einstein, Podolsky, Rosen) : soit l'interprétation que l'on fait de la physique quantique est erronée, soit cette physique entre en contradiction avec au moins une des trois hypothèses suivantes : (i) un signal ne peut pas dépasser la vitesse de la lumière c (causalité imposée par le physique relativiste), (ii) la physique quantique est complète et décrit entièrement la réalité (pas de variables cachées), (iii) les deux particules éloignées forment des éléments indépendants de la réalité (non-localité). Ce débat, qui peut paraître philosophique au premier abord, a pu être formalisé mathématiquement quelques décennies plus tard par John Bell.

Pendant les années suivantes, plusieurs scientifiques, dont Louis de Broglie, David Bohm et Yakir Aharonov, ont postulé que la présence de la fonction d'onde d'une particule permet une interaction non locale entre particules dans un même état en supposant une variable cachée (Bohm, Aharonov, 1957). John Bell a repris ces idées pour construire un formalisme mathématique permettant un test sans équivoque (Bell, 1965) qui permettrait de statuer sur l'existence de variables cachées. John Bell propose alors de prendre une source qui émettra des paires de particules ayant un spin $1/2$, les deux particules formant un état intriqué – c'est à dire non séparable – appelé singulet. Dans son schéma, après détection des particules et la mesure du spin de chaque particule, il détermine la corrélation entre ces deux mesures. À partir de ce raisonnement, il a pu borner la grandeur mesurable appelée S , et montre que $S < 2$, ce qui deviendra les « Inégalités de Bell ». Ce résultat repose essentiellement sur l'hypothèse de localité. Mais au moment de cette découverte, personne ne pouvait tester par l'expérience cette inégalité.

Il aura fallu encore 10 ans avant qu'Alain Aspect et ses collègues de l'Institut d'Optique à Orsay puissent réussir la démonstration expérimentale des inégalités de Bell

(Aspect, Grangier *et al.*, 1982). Au lieu de considérer des particules ayant un spin, ils ont utilisé une source lumineuse qui émet des paires de photons intriqués dont la polarisation peut être +1 ou -1 – analogue du spin pour les particules comme les électrons. L'objectif de l'expérience était la mesure en coïncidence de l'arrivée des photons sur les détecteurs. La première difficulté rencontrée a été la faible efficacité des détecteurs. En l'absence de photo-détecteur ultra-sensible, il aurait été impossible de savoir si le photo-multiplicateur a raté l'événement, ou si le polariseur l'a bloqué. Le résultat de leurs mesures de coïncidences a donné une valeur de $S = 2,697$ qui correspondait parfaitement avec la prédiction de la mécanique quantique. Soucieux de vouloir confirmer ces résultats, Alain Aspect a mis en place une expérience plus précise avec un parcours optique de douze mètres au sous-sol de l'Institut d'Optique. Ceci a rallongé le temps écoulé entre l'arrivée des paires de photons sur les détecteurs, permettant aux interrupteurs acousto-optiques de pouvoir basculer les polariseurs avant l'arrivée des paires de photons (Aspect, Dalibard, Roger, 1982). Ils ont pu vérifier toutes les orientations de polarisation suivant le schéma des inégalités générales (Clauser, Horne *et al.*, 1969), et aussi changer les paramètres pendant le temps de vol. Ce dernier test permet de répondre à la question de communication plus rapide que la lumière posée par Y. Aharonov et D. Bohm (Bohm, Aharonov, 1957). La conclusion de ces travaux est l'inexistence des variables cachées locales et l'inhérente non-localité de la physique quantique. Cette découverte lui a valu le Prix Nobel de Physique en 2022 partagé avec J. Clauser et A. Zeilinger.

Très vite, les scientifiques ont compris l'importance de ce travail et ses applications potentielles. Déjà, en 1982, Richard Feynman avait réfléchi à la réalisation d'un ordinateur quantique, en proposant un scénario à base de photons intriqués, comme Einstein (Feynman, 1982). Une des applications est la transmission sécurisée de l'information – la cryptographie. Parce que les algorithmes d'encryptage et décryptage sont connus, la sécurité dépend de la clé utilisée. Dès 1991, Artur Ekert a vu que la sécurité de la distribution de la clé pourrait être testée en utilisant le schéma de Bohm et les inégalités de Bell généralisées (Ekert, 1991). Il proposait que l'expérience d'Alain Aspect serait le test expérimental idéal permettant ainsi de savoir si quelqu'un a écouté le message transmis ou

pas. Le succès de cette méthode repose sur le fait que la mécanique quantique est complète dans le sens où toute l'information du système est connue entièrement.

Fig3-3 (Aspect, Dalibard, 1982).

Caption: Expérience avec des ondes séparatrices acousto-optiques pour mesurer le temps de vol des photons. Chaque onde séparatrice acousto-optique (C_I , C_{II}) est suivie par deux polarisateurs dans deux orientations différentes. Chaque combinaison équivaut un basculement rapide entre deux orientations.

(Photos : John Bell et Alain Aspect.)

Perspectives

La champ disciplinaire couvert par la division PAMO est très dynamique, et de nombreuses découvertes ont permis l'émergence de nouvelles thématiques de recherche. Le laser, tout en continuant à irriguer l'ensemble des domaines de recherche et sociétaux, a connu de grands développements.

L'application et le développement de lasers femtosecondes intenses (Druon, Sentis *et al.*, 2019) (prix Nobel de Physique G. Mourou, D. Strickland et A. Ashkin en 2020) a trouvé des applications comme la chirurgie laser ou encore la gravure de grande précision (micro-gravure). Sur le plan fondamental, les lasers femtoseconde ont révélé un nouveau type de rayonnement dit harmonique, résultant d'une physique hautement non linéaire (Veyrinas, Vabek *et al.*, 2022), et produisant un rayonnement ultra-bref à l'échelle attoseconde (10^{-18} s)[38-40] : c'est la naissance de l'attoscience.

Les lasers femtoseconde ont aussi été utilisés pour fabriquer des peignes de fréquences (Amy-Klein, 2010) (prix Nobel de physique en 2005 J. L. Hall et T. W. Hänsch) conduisant à une nouvelle spectroscopie de très haute résolution.

Enfin, la technique LIBS (Fabre et Bousquet, 2020) (pour *Light Induced Breakdown Spectroscopy*) est également une technique de spectroscopie très versatile issue de ces développements. Un dispositif LIBS est d'ailleurs installé sur l'astromobile *Perseverance* qui a été envoyé sur Mars en 2020, et qui analyse directement la constitution chimique des roches martiennes. Les recherches menées sur les gaz quantiques ultra-froids sont de même à la pointe de développements fondamentaux et applicatifs, illustrés de la plus belle manière

avec le prix Nobel d'Alain Aspect en 2022 sur l'intrication quantique, considérée comme la « deuxième révolution quantique ». Un axe de recherche porte notamment sur le développement de la cryptographie quantique se basant sur les propriétés fondamentales de la physique quantique pour rendre un message illisible par une tierce personne, ou encore l'avènement de l'ordinateur quantique (LeBellac, 2020 ; -Waintal, 2021) ne se basant plus sur des nombres sous forme de bit de valeur 0 ou 1, mais sous forme de qubit (pour « quantum bit ») reflétant le principe fondamental de superposition d'états inhérent à la physique quantique.

Ces avancées sont le fruit, entre autres, de l'importance des discussions et échanges entre scientifiques. La Société Française de Physique a joué, et joue, un rôle clé dans ce contexte. Par exemple, elle a soutenu Albert Einstein après la Première Guerre mondiale en l'accueillant, lui permettant de trouver un cadre propice pour poursuivre ses activités de recherche. Plusieurs des histoires relatées dans ce chapitre sont le fruit des échanges, des débats, parfois houleux, mais toujours constructifs, et de l'apport d'idées nouvelles entre hommes et femmes de science. C'est bien cette dynamique qui fait progresser la connaissance et qui est l'essence même de la Science.

Bibliographie

- « Le laser : 50 ans de découvertes », *Reflets de la physique* 21, octobre 2010.
- Aspect A., Dalibard J., Roger G., 1982, « Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers », *Physical Review Letters* 49, 1804-1807.
- Aspect A., Grangier P., Roger G., 1982, « Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities », *Physical Review Letters* 49, 91-94.
- Amy-Klein A., 2010, « Des lasers à impulsions femtosecondes pour mesurer les fréquences », *Reflets de la physique* 21, 42-45.
- Auger P., 1923, *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris*, 177, 169.
—, 1925, *Comptes Rendus Acad. Sci. Paris*, 180, 65.
- Belakhovsky M., 2013, « La lumière synchrotron, au service de la science et de la société », *Reflets de la physique* 34-35.
- Bell J. S., 1965, *Physics* 1, 195.
- Bohm D., Aharanov Y., 1957, *Physical Review* 108, 1070.
- Briand J.-P., 2011, « Pierre Auger et la physique atomique », *Reflets de la Physique* 25, 10-14.
- Cagnac B. et Chareyron D., 2017, « Histoire et Principe de fonctionnement du Maser et du Laser », <https://culturesciencesphysique.ens-lyon.fr/ressource/histoire-laser-Cagnac.xml>.
- Catoire F., 2012, « Le Laser : une invention lumineuse », *La Découverte* 378, 24-35.
- Catoire F., Quintard L., Hort O., Dubrouil A. et Constant E., 2014, « Les sources attosecondes », *Photonique* 70, 28-33.
- Clauser J. F., Horne M. A., Shoimony A., Holt R. A., 1969, *Physical Review Letters* 23, 880.
- Codling K., 1997, *J. Synch. Rad.* 4, 316.
- Cohen-Tannoudji C., 2013, « Prix Nobel de Physique 2012 », *Reflets de la Physique* 32, 26-27.
- Cossart-Magos C., Leach S., 1972, *J. Chem. Phys.* 56, 1534.
- Dirac P. A.M., 1927, *Proc. R. Soc. London Ser. A* 114, 243.
- Druon F., Sentis M., Salin F., Le Blanc C., Salières P., Quéré F. et Zeitoun P., 2019, « Générer des impulsions laser ultra-brèves de très haute intensité : la technique du CPA », *Reflets de la physique* 61, 13-25.
- Einstein A., 1905, *Annalen der Physik B*, 132.
- Einstein A., 1917, « The quantum theory of radiation », *Physikalische Zeitschrift* 18, 121.
- Einstein A., Podolsky B., Rosen N., 1935, *Physical Review* 47, 777.
- Ekert A. K., 1991, « Quantum Cryptography based on Bell's theorem », *Physical Review Letters* 67, 661-663.
- Fabre C. et Bousquet B., 2020, « De chemcam à supercam : L'apport de la LIBS pour le spatial », *Photonique* 103, 38-41.

- Feynman R. P., 1982, « Simulating Physics with Computers », *International journal of Theoretical Physics* 21, 467-488.
- Field D., Simons J. P., Cockell C., 2020, « Sydney Leach », *Biogr. Mem. Fell. R. Soc.* 69, 313–332.
- Guthleben D., 2009, *Histoire du CNRS de 1939 à nos jours*, Armand Colin.
- Hardouin Duparc O., 2010, « Pierre Auger et Lise Meitner », *Reflète de la Physique* 18, 23-25.
- Horani M., Leach S., 1959, *Comptes Rendus Acad. Sci.* 24, 2196.
- Ivanenko D., Pomeranchuk I., 1944, « On the maximal energy attainable in betatron », *Physical Review* 65, 343.
- Kaiser R., Leduc M., et Perrin H., 2020, *Atomes, Ions, Molécules Ultra-Froids, et Technologies Quantiques*, EDP Sciences.
- Leach S., 1997, « In my time: scenes in scientific life », *Annu. Rev. Phys. Chem.* 48, 1–4.
- Leach S., Lopez-Delgado R., 1964, *J. Chim. Phys.* 61, 1636.
- Leach S., Velghe M., 1976, *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer* 16, 861.
- LeBellac M., 2020, « Peut-on parler de suprématie quantique ? », *Reflète de la physique* 67, 4–8.
- Madden R. P., K. Codling, 1963, *Phys. Rev. Lett.* 10, 516.
- Maxwell J.-C., 1865, « A dynamical theory of the electromagnetic field », *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, 459–512.
- Robinson A. L., 2015, « History of Synchrotron Radiation », *Synchrotron Radiation News* 28, 4-9.
- Salières P. et Quéré F., 2019, « Les impulsions ultras-courtes », *Reflète de la physique* 61, 22–23.
- Schawlow A. L., Townes C. H., 1958, « Infrared and Optical Maser », *Physical Review* 112, 1940-1949.
- Schwinger J., 1949, « On the Classical Radiation of Accelerated Electrons », *Physical Review* 75, 1912.
- Schwob C. et Julien L., 2010, « Le laser : principe de fonctionnement », *Reflète de la Phys.* 21, 12-16.
- Veyrinas K., Vabek J., Valentin C., Mével É., Constant É. et Catoire F., 2022, « Quand les harmoniques d'un rayonnement ultraviolet extrême se focalisent », *Reflète de la physique* 72, 10-16.
- Waintal X., 2021, « Le problème à N corps qui se cache derrière l'ordinateur quantique », *Reflète de la physique* 70, 18-23.