Avant-propos

Par *Michèle Leduc* et *Michel Le Bellac*

EN 1905, Einstein publiait une série d'articles fondateurs sur la relativité, les quanta lumineux et le mouvement brownien. Un siècle après cet « *annus mirabilis* », il nous a paru intéressant de demander à quelques physiciens français de renom de donner leur point de vue sur l'apport d'Einstein à la physique de ce début du XXI^e siècle. Nous avons choisi de ne pas nous limiter à l'année 1905, mais nous avons pris en compte l'ensemble de l'œuvre scientifique d'Einstein jusqu'au milieu des années 1930. En effet ses derniers travaux passés à la postérité sont d'une part celui sur les fondements de la mécanique quantique, effectué en collaboration avec Podolsky et Rosen et connu sous les initiales « EPR » (1935), et d'autre part celui sur les lentilles gravitationnelles (1936). Le panorama dressé dans ce livre permet de juger de la diversité impressionnante des sujets abordés par Einstein. Parmi les plus marquants, citons :

Quanta : quanta lumineux (1905) ; chaleur spécifique des solides (1907) ; émission stimulée de rayonnement (1917) ; condensation de Bose-Einstein (1923).

Relativité : relativité restreinte (1905) ; énoncé du principe d'équivalence (1907) ; relativité générale (1916).

Fluctuations : mouvement brownien (1905) ; théorie des fluctuations thermodynamiques (1910).

Fondements de la mécanique quantique : article EPR, débats avec Niels Bohr (1935).

Cosmologie : principe cosmologique et constante cosmologique (1917) ; modèle d'Univers en expansion d'Einstein et de Sitter (1932).

Ces travaux ont non seulement ouvert la voie à une bonne partie de la physique du XX^e siècle, mais ils continuent encore aujourd'hui à avoir un impact dans des domaines parfois inattendus : ainsi il a fallu attendre près de 50 ans, avec les travaux de John Bell et les expériences qui ont suivi, pour que soit reconnue l'importance de l'intrication des systèmes quantiques. Ce n'est qu'en 1995 qu'a été vérifiée sans ambiguïté la prédiction de la condensation

de Bose-Einstein. Et Einstein n'avait sûrement pas envisagé que la relativité serait indispensable pour notre système de navigation GPS, un outil qui fait partie maintenant de notre vie quotidienne.

Ce livre contient sept contributions. La première est une introduction historique écrite par Olivier Darrigol, qui décrit en détail la genèse des articles fondateurs de 1905, et plus succinctement celle des travaux ultérieurs. On constatera combien Einstein, loin de l'image du savant solitaire isolé dans son bureau des brevets à Zürich, était parfaitement au courant des grandes interrogations de la physique de son époque et des travaux de ses grands contemporains (Lorentz, Poincaré, Planck, Mach, ...) tout en « les dépassant par l'ampleur et la radicalité de ses points de vue », comme le souligne Olivier Darrigol.

Les trois contributions suivantes concernent la physique quantique, en suivant l'ordre historique inversé des articles fondateurs. Alain Aspect et Philippe Grangier montrent comment Einstein, Podolsky et Rosen (EPR), parallèlement à Erwin Schrödinger, avaient mis en lumière une particularité unique de la mécanique quantique, qui est largement connue aujourd'hui sous le nom d'intrication des systèmes quantiques. Einstein, très opposé à l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, s'était appuyé sur l'intrication afin d'essayer de prouver que la mécanique quantique constituait une description incomplète de la réalité physique. Niels Bohr avait jusque là répondu brillamment aux objections antérieures d'Einstein, mais il ne put donner cette fois qu'une réponse alambiquée. Ce débat de géants tomba dans l'oubli pendant une trentaine d'années, et il fallut attendre les travaux de John Bell en 1964 pour que l'article EPR revienne sur le devant de la scène. En effet, John Bell put montrer que les idées contenues dans cet article étaient susceptibles de vérification expérimentale. Alain Aspect et Philippe Grangier décrivent les expériences récentes qui ont permis d'invalider la conclusion immédiate du travail EPR (il faut compléter la mécanique quantique), tout en montrant en revanche combien la notion d'intrication est fondamentale : jointe aux progrès expérimentaux qui permettent de manipuler des objets quantiques individuels, elle a donné naissance à une « nouvelle révolution quantique », dont un exemple est l'information quantique.

Dans l'article suivant, Claude Cohen-Tannoudji, Jean Dalibard et Frank Laloë examinent la postérité du travail de 1923, qui prédisait le phénomène appelé aujourd'hui « condensation de Bose-Einstein », le fait que des atomes d'un certain type (obéissant à la statistique de Bose) ont tendance à s'accumuler dans un état quantique unique à très basse température. Einstein lui-même était assez sceptique sur la possibilité de mettre cet effet en évidence. Depuis les premières vérifications expérimentales de la condensation de Bose-Einstein en 1995, on assiste à une explosion de travaux sur ce nouvel état de la matière. L'intérêt du phénomène vient de la relation fascinante et controversée entre superfluidité et condensation de Bose-Einstein, et aussi des perspectives de transposer toute l'optique aux ondes de matière, et de fabriquer des « lasers à atomes ». Enfin les condensats de Bose-Einstein atomiques gazeux (et les gaz

d'atomes fermioniques à très basse température) permettent de réaliser des systèmes modèles qui servent à tester des idées de la physique de la matière condensée dans des conditions parfaitement contrôlées.

Dans la dernière contribution à cette série « quantique », Jean-Paul Pocholle fait le point sur ce qui est sans doute l'application la plus largement connue des travaux de 1917, le laser. L'apport conceptuel d'Einstein à la théorie de l'interaction lumière-matière est essentiel. Il a en effet introduit la notion d'émission stimulée de rayonnement, qui est à l'origine du processus d'émission laser ; celle-ci a vu le jour dans les laboratoires à la fin des années 1950, lorsque les physiciens ont été capables de réaliser des inversions de population de niveaux atomiques ou moléculaires. Depuis lors, la technologie du laser a enregistré des progrès spectaculaires, allant des diodes laser à semi-conducteur de taille micrométrique jusqu'aux sources laser à verre dopé surpuissantes pour la fusion contrôlée. Les applications des lasers sont aujourd'hui trop nombreuses pour être recensées de façon exhaustive ; ils sont devenus les compagnons de notre vie quotidienne tout autant que des outils incontournables pour la recherche.

L'apport d'Einstein à la théorie du mouvement brownien et aux fluctuations statistiques est sans doute moins connu que ses contributions à la physique quantique et à la relativité. Elle n'en est pas moins essentielle, car il fut le premier à saisir le lien quantitatif entre les fluctuations d'origine microscopique et les propriétés thermodynamiques, une idée à la base de la physique statistique moderne. Comme le montre Olivier Darrigol, sa compréhension profonde des fluctuations constitue aussi le fil directeur de ses travaux sur la physique quantique. Dans leur chapitre, Bernard Derrida et Eric Brunet donnent un aperçu de la variété des problèmes de physique allant de la théorie du mouvement brownien à celle des polymères, du théorème fluctuation dissipation aux systèmes hors équilibre, qui sont dans le prolongement des travaux d'Einstein.

Les deux derniers chapitres, par Thibault Damour et François Bouchet, sont des synthèses très documentées et actualisées sur la relativité générale et la cosmologie. Après la relativité restreinte en 1905, il fallut à Einstein une dizaine d'années de travail acharné pour mettre au point sa théorie relativiste de la gravitation, ou relativité générale. Cette extraordinaire construction intellectuelle connut des débuts très médiatisés en raison de l'expédition d'Eddington confirmant la déviation des rayons lumineux par le Soleil. Elle fut cependant assez largement ignorée des physiciens jusqu'au début des années 1960, en raison de ses difficultés mathématiques et du caractère limité des tests expérimentaux envisageables à l'époque. Comme le montre Thibault Damour, la perception de la relativité générale est totalement différente aujourd'hui. Elle est vérifiée dans un grand nombre de situations, qui vont de notre environnement immédiat (système GPS) jusqu'aux confins de l'Univers, avec une précision relative qui peut atteindre 10^{-5} . Elle est devenue une théorie indispensable de l'astrophysique contemporaine : elle est à la base de notre

compréhension des étoiles massives, des trous noirs, des lentilles gravitationnelles et des ondes gravitationnelles.

La relativité générale est au fondement de la cosmologie moderne. C'est ce qu'Einstein avait compris dès 1917, comme en témoigne la saga de la constante cosmologique (notée Λ), qu'il introduisit dans un premier temps afin de rendre compte d'un Univers supposé statique, pour la renier quinze ans plus tard quand s'imposa l'idée de l'expansion de l'Univers. François Bouchet décrit l'évolution fulgurante de la cosmologie depuis dix ans, qui aboutit aujourd'hui au modèle standard dit Λ CDM, où figurent Λ parce que la constante cosmologique a finalement refait surface et CDM, initiales de Cold Dark Matter, la matière sombre froide. Ce modèle standard rend compte de façon remarquable d'un grand nombre d'observations d'origine très diverse, tout en nous apprenant que la matière telle que nous la connaissons ne représente qu'une fraction infime (moins de 5 %) de l'Univers : les observations concordent pour suggérer qu'il est aussi constitué de 25 % de matière sombre et de 70 % d'énergie sombre, dont la nature reste aujourd'hui complètement mystérieuse.

L'année 2005 a été choisie comme « année mondiale de la physique » par l'ONU et l'UNESCO pour commémorer l'« annus mirabilis » dont c'est le centième anniversaire, et ce livre s'inscrit dans cette perspective. Nous remercions les auteurs, qui figurent parmi les meilleurs spécialistes au monde dans leurs disciplines respectives, d'avoir pris le temps d'apporter des contributions originales tout spécialement dédiées à ce centième anniversaire.

Michèle Leduc

Michèle Leduc est directrice de recherche au CNRS. Elle poursuit des recherches en physique des atomes refroidis par laser au Laboratoire Kastler Brossel à l'École Normale Supérieure (Paris). Elle dirige la collection « Savoirs Actuels » du CNRS depuis 1986.

Michel Le Bellac

Michel Le Bellac est professeur émérite à l'Université de Nice, chercheur au laboratoire INLN à Sophia Antipolis. Auteur de nombreux livres de physique, il est le coordinateur de l'ouvrage « Einstein aujourd'hui ».