

Un siècle de quanta



Édité par Michel Crozon & Yves Sacquin



Extrait de la publication



UN SIÈCLE DE QUANTA

Édité par Michel Crozon et Yves Sacquin

Olivier Darrigol
Dominique Lambert
Roger Balian
Philippe Chomaz
Serge Haroche
Daniel Estève
Michel Dévoret
Dominique Lecourt
Michel Bitbol



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf
91944 Les Ulis Cedex A, France

Sixièmes rencontres « Physique et interrogations fondamentales »
15 novembre 2000

Illustration de couverture : D'après une toile de Laurent Corvaisier

ISBN : 2-86883-604-6

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2003

TABLE DES MATIÈRES

Un siècle de quanta Michel Crozon	5
I. Les quanta dans l'histoire.....	21
Continuités et discontinuités dans l'« acte désespéré » de Max Planck Olivier Darrigol.....	23
La réception de la mécanique quantique chez Georges Lemaître Dominique Lambert.....	39
II. Les quanta dans la physique	57
La physique quantique à notre échelle Roger Balian.....	59
Dans l'atome, des mondes quantiques Philippe Chomaz	91
III. Quelques perspectives actuelles.....	111
Une exploration au cœur du monde quantique Serge Haroche.....	113
Vers des machines quantiques Daniel Estève et Michel Dévoret	135
IV. Quanta et philosophie.....	147
Kant et les quanta Dominique Lecourt.....	149
Relations et corrélations en physique quantique Michel Bitbol.....	159

UN SIÈCLE DE QUANTA

Michel Crozon*

C'est de façon assez humble, à propos du « corps noir », que la physique quantique est apparue à l'extrême fin du XIX^e siècle. Un corps chauffé, un lingot de métal par exemple, rayonne de la lumière : invisible à basse température, celle-ci devient rouge sombre dès 600 degrés, blanche vers 1 600 degrés, etc. Quel que soit le corps considéré, cette couleur est la même à une température donnée. La lumière, on le sait depuis James Maxwell, est constituée de vibrations électromagnétiques. Le « spectre de couleurs » de la lumière émise, c'est-à-dire la distribution des longueurs d'onde (ou, plus commodément, des fréquences) des vibrations engendrées par le corps chauffé, ne dépend pas de la nature de celui-ci mais seulement de sa température. Pour étudier ces distributions, Gustav Kirchhoff, en 1860, a imaginé le concept générique de *corps noir*, corps chauffé en équilibre avec son propre rayonnement. Sur le plan pratique, un corps noir peut être conçu comme une enceinte close, un four dont les parois sont portées à une température homogène. Un petit trou percé dans une paroi permet de laisser sortir une proportion minimale de la

* Physicien, CNRS, LPNHE-Université Paris 6 et 7.

lumière remplissant la cavité et d'en analyser le spectre. Kirchhoff a démontré que la densité d'énergie U au sein du rayonnement ne dépend que de ν , la fréquence et de T , la température. Le nom de « corps noir » provient du fait qu'à l'équilibre entre émission et absorption, le corps en question absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit.

Pour déterminer le spectre du corps noir, il fallait décomposer le rayonnement et mesurer les flux d'énergie correspondant aux diverses fréquences. À partir de 1880, cette détermination, notamment dans le domaine infrarouge, a connu de grands progrès. Les spectromètres employés étaient constitués de divers cristaux artificiels transparents aux rayonnements infrarouges ainsi que de réseaux à profils étudiés. Pour mesurer l'intensité aux différentes fréquences, les bolomètres, conçus sur le modèle de celui de Samuel Langley (1880), utilisaient des thermorésistances très sensibles et très précises.

En 1879, Joseph Stephan avait montré que le rayonnement total est proportionnel à la quatrième puissance de la température absolue du corps considéré. Quelque temps après, Ludwig Boltzmann interprétait la loi de Stephan en s'appuyant sur la thermodynamique (il considérait le rayonnement comme un gaz) ainsi que sur la théorie de Maxwell. En 1896, Wilhelm Wien, s'appuyant sur les raisonnements statistiques de Boltzmann, établissait une formule pour représenter le spectre du corps noir.

Max Planck est né en 1858 à Kiel, dans le nord de l'Allemagne. Après des études à l'université de Munich, il prépara sa thèse à l'université de Berlin, sous la direction de Hermann von Helmholtz, sur « le deuxième principe de la thermodynamique ». Il consacra ensuite plusieurs années à l'étude de l'entropie qu'il considérait comme « la propriété la plus importante des phénomènes physiques ». Nommé professeur à Kiel (1885), puis à Berlin (1889), il fut admis en 1894 à l'Académie des Sciences de Prusse.

C'est en 1897 que Max Planck, théoricien reconnu, spécialiste de la thermodynamique, a entrepris l'étude du corps noir d'un point de vue nouveau en le considérant comme un ensemble d'oscillateurs en équilibre avec leur rayonnement. Dans ce cadre, il a démontré la formule de Wien. Sa réflexion l'a amené à mettre en évidence l'existence de constantes universelles qui, jointes à la vitesse de la lumière et à la constante de gravitation, lui permettaient de définir un système « naturel » d'unités de longueur, de temps et de masse que l'on nomme aujourd'hui longueur, temps et masse de Planck. Sans en avoir conscience, il s'approchait ainsi de la description quantique du monde. En 1899, par des expériences précises, Otto Lummer et E. Pringshein remettaient en cause, au moins pour les faibles fréquences, la validité de la loi de Wien. John Rayleigh, s'appuyant sur la théorie des électrons de Lorentz, proposa une nouvelle formule pour le spectre du corps noir, fondée sur la physique classique, mais cette formule ne s'accordait avec l'expérience que pour les basses fréquences !

Pour résoudre ces difficultés, le 19 octobre 1900, Max Planck présenta à la Société de Physique de Berlin une première ébauche : *Sur une amélioration de la loi de Wien*. Il tenait compte de nouveaux résultats expérimentaux obtenus, pour les très basses fréquences, par ses collègues H. Rubens et F. Kurlbaum et proposait une approche semi-empirique combinant la formule de Wien et celle de Rayleigh. Il obtenait ainsi un très bon accord avec l'expérience. Puis, le 14 décembre 1900, sa nouvelle théorie faisait l'objet d'une communication intitulée : *Sur une théorie de la loi de distribution du spectre normal*. Il y présentait la formule que l'on appelle aujourd'hui la loi du rayonnement de Planck. À partir de ses idées de 1897, et par un raisonnement thermodynamique, il calculait l'entropie de ses oscillateurs. Pour établir cette théorie, Planck avait dû abandonner l'hypothèse classique selon laquelle l'énergie d'un oscillateur est susceptible de changements continus. Il avait, au contraire, postulé que cette énergie ne varie que par des multiples entiers d'une énergie minimale. Pour un oscillateur monochromatique, l'énergie est alors

supposée être de la forme $nh\nu$. Dans cette formule, n est un nombre entier, ν est la fréquence et h est une constante *ad hoc*, devenue par la suite constante universelle. Un oscillateur de fréquence n émet une énergie minimale égale à $h\nu$. La quantité h (la *constante de Planck*) a les dimensions d'une énergie divisée par une fréquence : c'est ce que l'on nomme une action. Au départ, Planck pensait sans doute pouvoir faire tendre n vers l'infini et h vers zéro, ce qui lui aurait permis de rejoindre la théorie classique¹. Malheureusement, cela conduisait à une « catastrophe ultraviolette » consistant en l'apparition, dans le calcul, de termes infinis. Il fallait donc garder à h une valeur non nulle bien que très petite. Cela revenait à introduire de la discontinuité dans un phénomène jusqu'alors considéré comme continu. La théorie de la lumière avait été élaborée tout au long du XIX^e siècle et sa nature ondulatoire, appuyée sur les phénomènes d'interférence et de diffraction, semblait hors de doute. Dans la théorie de Planck, l'énergie échangée par les oscillateurs est distribuée sous forme de *quanta* $h\nu$, entités minimales insécables.

Planck était un homme d'âge mûr, plutôt conservateur, peu enclin aux révolutions, fussent-elles scientifiques (Emilio Segrè l'a surnommé « le révolutionnaire malgré lui »). Beaucoup plus tard, il dira : « C'était un acte de désespoir. Pendant six ans je m'étais battu avec la théorie du corps noir. Je devais trouver une explication théorique à n'importe quel prix, mais sans renoncer au caractère intangible des deux principes de la thermodynamique. » Pendant plusieurs années, il fit « de vaines tentatives pour ajuster le quantum élémentaire d'action, d'une manière ou d'une autre, au cadre de la physique classique ».

La constante de Planck est peu à peu devenue le centre d'un ébranlement général de la physique. Cela a commencé par les travaux d'Einstein sur *La production et la transformation de la lumière*. Dans

1.— Cette explication est sans doute simpliste. On trouvera page 23 la description détaillée de la démarche de Max Planck, par Olivier Darrigol.

l'un des trois fameux articles qu'il publia en 1905, Einstein a, en effet, émis « l'hypothèse que l'énergie dans la lumière est distribuée de manière discontinue dans l'espace ». Il expliquait de cette façon pourquoi l'apparition de l'effet photo-électrique (arrachement d'électrons sous l'impact de rayons lumineux) est liée non pas à l'intensité de la lumière qui le produit mais à sa fréquence. Sa formule faisait intervenir la constante de Planck.

L'idée d'une lumière discontinue était choquante. Pourtant, au premier Conseil Solvay en 1911, elle a commencé à s'imposer, donnant corps à la notion de quantum d'énergie lumineuse. Résultat ? Tout en déclarant, en 1916, cette hypothèse « hardie » voire « téméraire », Robert Millikan publiait une mesure précise, fondée sur l'équation d'Einstein, de la valeur de h , la constante de Planck. Le « grain » de lumière ainsi défini sera, beaucoup plus tard (1926), baptisé *photon*.

Depuis longtemps, la question des raies lumineuses émises par les atomes chauffés faisait l'objet de mesures systématiques. Établie empiriquement en 1885, une formule due à Johann Balmer où intervenait la suite discrète des nombres entiers, permettait de calculer avec une grande précision la répartition des fréquences des raies du spectre visible de l'hydrogène. Autour de 1910, les expériences d'Ernest Rutherford avaient montré que les atomes sont formés d'un noyau dense entouré d'électrons retenus par l'attraction électrique. En 1913, Niels Bohr a proposé un modèle planétaire pour l'atome. Il émettait l'hypothèse que le moment cinétique de l'électron tournant autour du noyau central était quantifié en une suite de valeurs discrètes et il postulait que l'électron, passant d'une orbite à un autre, émet ou absorbe un photon d'énergie $h\nu$ égale à la différence des énergies entre les deux états stationnaires. Il retrouvait ainsi aisément la formule de Balmer et, postulant que « les électrons ne décrivent que certaines orbites définies par un nombre entier », il donnait une justification aux discontinuités introduites par Planck. Ce modèle expliquait aussi la production d'états excités dans les atomes ainsi que

l'action d'un champ électrique (effet Stark) sur le spectre de l'hydrogène.

En 1919, après l'interruption due à la première guerre mondiale, Max Planck reçut le prix Nobel. Une période de grande fécondité scientifique commença alors, appuyée sur l'idée de quantum d'énergie. En 1921, l'expérience de Otto Stern et Walther Gerlach a révélé la quantification spatiale du moment magnétique des atomes puis, en 1922, Arthur Compton a mis en évidence l'aspect corpusculaire des rayons X en mesurant leur diffusion par les électrons du graphite. En ce qui concerne la théorie, c'est aux électrons eux-mêmes, considérés jusque-là comme des grains élémentaires de matière électrique, que Louis de Broglie a attribué une double nature, corpusculaire et ondulatoire, dans sa thèse de doctorat (1924) intitulée *Recherche sur la théorie des quanta*. Saluée par Einstein qui déclara que de Broglie avait « soulevé un coin du grand voile », cette hypothèse va devenir, sous la houlette de Niels Bohr, le point de départ d'une extraordinaire aventure intellectuelle collective. Une poignée de jeunes chercheurs brillants venant des quatre coins d'une Europe que la guerre venait de déchirer a, en quelques années, construit l'une des plus extraordinaires réalisations de l'esprit humain, la *mécanique quantique*. Tour à tour Werner Heisenberg, Paul Dirac, Erwin Schrödinger, par trois approches différentes, ont proposé trois formulations des phénomènes quantiques et Schrödinger a démontré que celles-ci sont équivalentes. Wolfgang Pauli a attribué à l'électron une propriété quantique à deux valeurs et énoncé son *principe d'exclusion*, puis George Eugene Uhlenbeck et S. A. Goutsmit ont découvert le spin. Max Born et Pascual Jordan ont introduit les relations de commutation et Heisenberg a énoncé les relations d'incertitude qui explicitent les limites de notre connaissance de la réalité quantique. Born a proposé l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde introduite par Schrödinger. L'équation de Klein-Gordon et celle de Dirac incorporent les concepts de la relativité restreinte dans les équations de la mécanique quantique. L'étude des statistiques quantiques a mis en évidence deux

familles d'objets quantiques, selon qu'ils relèvent ou non du principe d'exclusion de Pauli : les *fermions* (statistiques de Fermi-Dirac) et les *bosons* (statistiques de Bose-Einstein).

Alors que la théorie de la relativité, premier ébranlement majeur de la physique d'origine newtonienne, avait conservé le système classique de représentation des grandeurs physiques (position, vitesse, moment angulaire.), la mécanique quantique doit recourir à des opérateurs mathématiques agissant sur les vecteurs d'espaces de Hilbert représentant les états quantiques. Les prédictions quantiques s'expriment, pour la plupart, en termes de probabilités. La « dualité onde-corpuscule » oblige à mêler les descriptions corpusculaire et ondulatoire pour l'évaluation des probabilités. En outre, la description d'un système doit tenir compte des conditions d'observation et celles-ci sont de nature statistique. Par exemple, l'expérience classique des fentes d'Young, qu'elle s'applique aux rayons lumineux ou à un faisceau d'électrons, donne naissance à des franges d'interférence, mais celles-ci se construisent par l'addition d'impacts ponctuels individuellement imprévisibles et, de plus, il est impossible de déterminer la fente par laquelle passe chaque particule sans détruire la figure d'interférence.

L'incertitude liée à l'aspect probabiliste de la théorie quantique allait contre la tradition déterministe de la physique classique². Cependant Bohr, approuvé par beaucoup de jeunes physiciens, armé de son *principe de complémentarité*, a soutenu cette interprétation, dite de Copenhague. Il fondait son raisonnement sur le concept de phénomène, interaction entre un processus et un instrument de mesure. Les grandeurs physiques mesurables correspondent à des opérateurs « observables » et seules les observables qui commutent peuvent donner lieu à des mesures simultanées précises. Des représentations sont complémentaires si elles mettent en jeu des observables qui ne commutent pas et, selon les phénomènes que l'on

2.-Voir le texte de Dominique Lecourt, page 151.

considère, il faut utiliser l'une ou l'autre des représentations. D'autres physiciens, comme Einstein, ainsi que de Broglie, répugnaient à accepter que « Dieu joue aux dés » dans l'Univers et, en conséquence, présumaient que la description quantique reste incomplète. Des expériences de pensée, comme celle, fameuse, dite du « chat de Schrödinger », ont été imaginées pour mettre à l'épreuve la mécanique quantique. Surtout Einstein, Podolski et Rosen ont conçu une expérience de pensée (EPR) par laquelle on pourrait connaître deux quantités conjuguées, sans que la mesure les perturbe, ce qui montrerait le caractère incomplet de la mécanique quantique. Niels Bohr, défendant sa propre conception, a rejeté leurs arguments.

La mécanique quantique, on le sait, a modifié notre vision de la réalité et a profondément marqué de nombreux développements de la science du XX^e siècle³. En effet, indépendamment des débats sur les fondements et les modalités de la mesure, la théorie quantique s'est affirmée comme seule capable de décrire les phénomènes physiques à l'échelle microscopique. Dès les premières années elle expliquait les spectres atomiques, la stricte identité entre les atomes d'un même élément, la stabilité des corps solides, la structure de molécules simples et même le troisième principe de la thermodynamique. La constante h introduite par Planck (ou plutôt $h/2\pi$, symbolisé par \hbar), a joué un rôle croissant dans la description physique et chimique de la réalité. Cela a été particulièrement sensible en physique nucléaire et en physique des particules, domaines qui se sont développés à partir des années 1930.

En 1932, la découverte du neutron par James Chadwick ouvrait la voie à la physique nucléaire : un noyau est constitué d'un ensemble de protons et de neutrons (les nucléons) juxtaposés et seules certaines de ces combinaisons sont stables. Pour rendre compte de cette stabilité en dépit de la répulsion électrique entre protons, Heisenberg postulait l'existence d'une interaction nucléaire forte et, pour transmettre cette

3.- Voir le texte de Dominique Lambert, page 39.

interaction, Hideki Yukawa prévoyait l'existence d'une particule. Celle-ci, que l'on nomme aujourd'hui *pion*, découverte en 1947, s'est révélée n'être que la première de toute une catégorie de particules instables, les *mésons*, dont les propriétés ont été par la suite explorées par la physique des particules. La physique nucléaire a connu un grand développement dès les années 1930, notamment avec l'utilisation des cyclotrons pour provoquer des réactions nucléaires. Cela a conduit à l'élaboration de modèles théoriques du noyau, comme le modèle en couches, inspiré par les niveaux et les états d'excitation des électrons dans les atomes⁴. L'énergie de liaison entre nucléons et donc la stabilité des noyaux dépend des proportions de protons et de neutrons qu'ils contiennent. En particulier, le noyau d'uranium devient instable quand il reçoit un neutron supplémentaire : c'est le phénomène de fission de l'uranium, dont on connaît les conséquences guerrières et énergétiques. À partir des intuitions de Hans Bethe (1938) prolongées par William Fowler et Edwin Salpeter, on a pu comprendre les mécanismes nucléaires qui aboutissent, au cœur du Soleil et des étoiles, au dégagement d'énergie grâce à la fusion de noyaux légers en noyaux plus lourds. C'est cette nucléosynthèse dans les étoiles qui a fabriqué les noyaux des divers éléments chimiques constituant la matière qui nous entoure.

La connaissance détaillée des modalités de la désintégration des noyaux instables est à l'origine de divers procédés de datation cosmique, géologique, préhistorique..Au cours des dernières décennies, l'utilisation de faisceaux d'ions lourds a aussi mis en évidence des propriétés de vibration et de rotation des noyaux qui ne peuvent, elles non plus, être interprétées en termes classiques.

Au début des années 1930, à l'instigation de Oskar Klein, Jordan, Heisenberg, Pauli, Eugene Wigner et Victor Weisskopf, une autre étape s'ouvrait, celle de la quantification des champs de forces. Dès 1931, Dirac avait prévu l'existence de l'antiparticule de l'électron : le

4.- Voir le texte de Philippe Chomaz, page 91.

positon (ou positron) fut découvert expérimentalement en 1932 par Carl Anderson dans le rayonnement cosmique. Peu de temps après, Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie annonçaient l'apparition simultanée d'un électron et d'un positon par « matérialisation » d'un photon dans un champ électromagnétique. Cependant, sur le plan quantique, l'électrodynamique, théorie du champ électromagnétique, se heurtait à de difficiles problèmes de divergences mathématiques.

Parallèlement, l'étude de la radioactivité β amenait Pauli et surtout Enrico Fermi à proposer l'existence d'une force nouvelle, « l'interaction faible », ainsi que celle d'une particule singulière, presque indétectable, le *neutrino*. Celui-ci ne fut observé expérimentalement que vers 1955.

Gravitation, électromagnétisme, interaction forte, interaction faible : quatre forces fondamentales sont donc nécessaires pour décrire l'univers matériel. L'interaction gravitationnelle semblant pratiquement négligeable à l'échelle des particules individuelles, ce sont les trois autres interactions qui ont d'abord fait l'objet de la physique des particules. Pour explorer la structure des particules à des dimensions de plus en plus petites, il fallait, selon les principes mêmes de la mécanique quantique, utiliser des collisions à des énergies de plus en plus élevées. Pour cela, les chercheurs ont eu d'abord recours aux rayons cosmiques puis aux accélérateurs de particules et aux collisionneurs, jusqu'au gigantesque LHC, grand collisionneur de protons qui entrera en service vers 2007 au Cern, en Suisse.

Vers 1947, les problèmes liés aux difficultés mathématiques rencontrées en électrodynamique ont été résolus par la *renormalisation*. Des valeurs infinies ou divergences apparaissent lorsque l'on calcule les processus élémentaires d'interactions entre charges électriques et champs électromagnétiques en utilisant les masses et constantes de couplages « nues », c'est-à-dire égales à ce qu'elles seraient en l'absence d'interaction. Les divergences disparaissent si l'on utilise les masses et les constantes dites « habillées », c'est-à-dire

en tenant compte de l'action des particules sur elles-mêmes. Cette méthode, développée par Julian Schwinger, Hans Bethe, Richard Feynmann, Shin Tomonaga et quelques autres a permis d'élaborer l'électrodynamique quantique (QED), remarquable théorie des champs quantiques qui permet de calculer les processus mettant en œuvre des charges électriques et des photons avec une précision inégalée (jusqu'à dix chiffres significatifs). Ce succès en a fait un modèle de théorie physique et a poussé les théoriciens à imiter la QED pour décrire les autres interactions. Le succès de la renormalisation de la QED doit être attribué à l'invariance de jauge. Celle-ci signifie que la théorie est invariante quel que soit le référentiel local. Cela n'est possible que s'il existe, couplé au champ de l'électron, un champ de jauge qui n'est autre que le champ électromagnétique transporté par les photons. D'où l'espoir que les autres formes d'interaction relèvent, elles aussi, de théories de jauge. Un premier succès a été obtenu dans le domaine de l'interaction faible. À la suite des travaux de Chen Ning Yang, R. L. Mills, Tsung Dao Lee, Martinus Veltman, Gerardus 't Hooft, et d'autres encore, il a été possible à Abdus Salam, Sheldon Glashow et Steven Weinberg d'élaborer une théorie commune aux interactions faible et électromagnétique, la théorie *électrofaible* qui, en plus du photon de l'interaction électromagnétique, prévoyait l'existence de bosons transportant l'interaction faible. Ces bosons devaient avoir une masse très élevée, ce qui explique la très courte portée de cette interaction. En 1973, la découverte par André Lagarrigue et ses collaborateurs d'interactions faibles à courant neutre (c'est-à-dire sans échange de charge électrique) dans les interactions des neutrinos a apporté une première confirmation de la théorie électrofaible. Puis les bosons faibles W^+ , W^- , et Z^0 ont été mis en évidence au Cern en 1983 à la suite d'un développement technologique exceptionnel et cela a consacré le succès de la théorie de jauge électrofaible, étape importante vers l'unification des forces élémentaires.

En ce qui concerne l'interaction nucléaire forte, les physiciens avaient dû, à partir de 1947, faire face à une multiplication inattendue

des découvertes de nouveaux hadrons qui sont les particules qui subissent cette interaction. Aucune de celles-ci ne paraissant plus élémentaire que les autres, les théoriciens se heurtaient à des difficultés en apparence insurmontables. Cependant, après un travail de classification, Murray Gell-Mann et George Zweig ont émis l'hypothèse (1964) que les hadrons sont constitués d'objets plus élémentaires qu'on a dénommés quarks. D'abord simple modèle mathématique descriptif, l'hypothèse des quarks a pris consistance à la suite d'expériences qui ont mis en évidence une structure ponctuelle au sein même des hadrons. Bien que ne pouvant être isolés, les quarks ont pu être considérés comme les quanta de champs fondamentaux. Au début des années 1970, les théoriciens ont ébauché la chromodynamique quantique (QCD), théorie des interactions dites de couleur dans laquelle les quarks composant les hadrons interagissent entre eux par l'intermédiaire de particules de jauge, les gluons. Quarks et gluons sont porteurs de charges dites « de couleur » (d'où le nom donné à la théorie), ce qui assure leur cohésion.

Ensemble, la théorie électrofaible et la chromodynamique quantique constituent ce que les physiciens appellent le Modèle Standard. Celui-ci, constitué de théories de jauge obéissant à des symétries mathématiques, représente un triomphe de la théorie des champs quantiques ! Plus de vingt ans d'expériences de plus en plus précises et raffinées, notamment sur le collisionneur LEP du Cern, n'ont pas pu le mettre en défaut. Pourtant, il reste insatisfaisant : il comporte un très grand nombre de paramètres que l'expérience doit déterminer et il n'explique pas pourquoi les quarks restent confinés au sein des hadrons. Et surtout les physiciens aspirent à une théorie quantique qui intégrerait de façon plus complète les interactions, en y ajoutant la gravitation. Dans cette perspective, ils ont ébauché des constructions théoriques comme la Grande Unification, la Supersymétrie, et la théorie des Supercordes (qui postule l'existence de dimensions supplémentaires à celles de notre espace-temps). En dépit de leur séduction esthétique ou intellectuelle, aucune de ces théories

n'a, jusqu'à aujourd'hui, reçu de confirmation expérimentale non ambiguë. Mais s'il existe un jour une théorie « ultime », quelle qu'elle soit, nul ne doute qu'elle doive intégrer les principes et les résultats du Modèle Standard.

La renormalisation, qu'on pouvait au départ considérer comme une sorte d'artifice, est devenue une caractéristique des théories permettant d'accéder aux conditions mêmes d'observation des phénomènes. Grâce aux travaux de K. Wilson vers 1975, le groupe de renormalisation a pu être appliquée à un domaine entièrement différent de la physique, la théorie des transitions de phase, c'est-à-dire un phénomène macroscopique.

Toutefois, la question de la validité ultime de la description quantique restait ouverte. Le paradoxe EPR la mettait en question. Cette difficulté a été surmontée après 1960. D'abord John Bell, en 1964, a établi un ensemble d'inégalités arithmétiques que doivent satisfaire les mesures sur des états classiques (c'est-à-dire non quantiques) statistiquement indépendants et spatialement séparés. Au contraire, si la mécanique quantique est valable, les états produits dans l'expérience EPR violeraient ces inégalités à cause de ce que l'on appelle l'intrication quantique ou non-séparabilité⁵. Plusieurs séries d'expériences, notamment celles d'Alain Aspect, portant sur les corrélations entre les polarisations de photons émis par paires ont permis de constater une incontestable violation des relations de Bell. Ainsi, au début des années 1980, la mécanique quantique s'est trouvée fermement confirmée par l'expérience.

Reste à comprendre comment se fait la transition qui va de l'univers quantique des objets microscopiques à celui qui nous est familier dont les apparences sont tout à fait classiques. C'est là l'objet des théories de la décohérence. Utilisant le formalisme de l'intégrale de chemins que l'on doit à Feynman, elles permettent de faire

5.- Voir le texte de Serge Haroche, page 113.

émerger, au sens des probabilités, l'univers classique à partir de la description quantique. Dans un système complexe, comportant un grand nombre de particules, les écarts quantiques à la description classique deviennent négligeables. Ce que l'on nomme la décohérence, c'est-à-dire la perte des effets d'interférence liés au monde quantique, est lié à l'échelle (ou grain) à laquelle on observe la réalité. On peut trouver une description de ces méthodes dans les ouvrages de Murray Gell-Mann et de Roland Omnès.

Les progrès instrumentaux et théoriques au cours du dernier quart du XX^e siècle ont permis la réalisation de prédictions quantiques jusque-là inaccessibles et ouvrent la voie à des réalisations pratiques utilisant les propriétés microscopiques de la matière. On peut citer par exemple la production de condensats de Bose à partir d'atomes qui sont pourtant des objets complexes. Il faut aussi rappeler que le modèle cosmologique dit du Big Bang repose sur l'hypothèse d'une fluctuation quantique initiale et que son déroulement met en jeu une succession de phénomènes quantiques seuls à même d'expliquer les caractéristiques actuelles de notre univers. Roger Balian (page 59) dresse un tableau de « la physique quantique à notre échelle ».

Les quanta, d'abord simple postulat abstrait destiné à décrire le spectre du rayonnement du corps noir, interviennent aujourd'hui dans tous les phénomènes physiques, de la cohésion des solides aux lois de la thermodynamique, de la conductivité électrique à la cinétique des réactions chimiques.

Les quanta sont aussi partie prenante de notre univers technique. Citons le transistor déjà ancien ainsi que toutes les techniques électroniques miniaturisées à l'extrême qui facilitent notre information et nos échanges. Un pas de plus sera franchi avec les dispositifs à effet quantique utilisant des composants dont les dimensions approchent les distances interatomiques. En ce qui concerne la lumière, il faut rappeler l'invention du laser, dispositif produisant des faisceaux de lumière cohérente, c'est-à-dire de photons obéissant à la

statistique de Bose-Einstein, ainsi que celle des photo-détecteurs aux multiples usages. De grands espoirs sont mis aujourd'hui dans les ordinateurs quantiques qui, au lieu des valeurs binaires 0 et 1 pourraient utiliser les « Q-bits », superpositions de spineurs de Pauli⁶.

Si, du corps noir à l'ordinateur quantique, la mécanique quantique a envahi tous les champs des sciences et des techniques, elle a aussi remis en question les concepts traditionnels de la philosophie des sciences : le temps, l'espace, la causalité. Les objets qu'elle considère n'ont plus la rassurante solidité des points matériels de la mécanique de Newton. C'est de cet impact philosophique que traitent les articles de Dominique Lecourt (page 151) et de Michel Bitbol (page 161).

Max Planck, l'homme qui en 1900 a amorcé cette révolution de la physique, a connu les plus grands honneurs. Après le prix Nobel de physique en 1919, il fut nommé en 1930 à la présidence de l'Institut Kaiser-Wilhelm qu'il quitta en 1937. Après la guerre cet institut fut baptisé « Institut Max Planck ». Il en fut le président d'honneur et cet institut reste aujourd'hui l'un des piliers de la recherche scientifique en Allemagne. Sous le régime nazi, la conduite de Max Planck fut d'une grande dignité, il ne consentit à aucune bassesse. Quand il mourut en 1947, âgé de 89 ans, la mécanique quantique était solidement établie.

Cent ans après sa découverte, les physiciens français, comme leurs collègues du monde entier, ont tenu à la célébrer par des colloques et des rencontres où ont été décrits quelques-uns des accomplissements qu'a apportés cette véritable révolution scientifique. Le présent ouvrage rassemble quelques-unes des interventions prononcées à cette occasion.

6.- Voir le texte de Michel Dévoret et Daniel Estève, page 135.

physique quantique sautait aux yeux. Leur caractère non-survenant a tardé à être explicité, mais il était à peu près perçu. En revanche, le statut de la relation *cognitive* est resté ambigu. Tantôt, il était conçu sur le modèle classique (dans l'image de la « perturbation » des propriétés de l'objet par les propriétés de l'agent de mesure). Tantôt on tentait de le mettre aux normes du nouveau type de relation objectale (dans la théorie quantique de la mesure de Von Neumann).

Mais, même dans ce dernier cas, on ne saisissait pas toutes les implications de la nature *non-survenante* des relations cognitives. L'un des signes de cette incompréhension est qu'on attendait d'une description de cette relation dans le cadre de la théorie quantique qu'elle permette la définition de certaines *propriétés*, et l'affirmation d'énoncés uniques. On espérait au moins qu'elle fixe une propriété univoque de l'*appareil* à l'issue de la mesure, exprimée par un énoncé catégorique : la propriété qui consiste à afficher une position d'aiguille sur un cadran, ou une inscription bien définie sur un écran, traduite par l'énoncé catégorique d'un *résultat* de mesure déterminé.

Or, sauf à faire intervenir un *deus ex machina*, comme le « terme de réduction spontanée » de Ghirardi, Rimini et Weber, ou bien la « conscience » de Wigner, cet espoir a été déçu. Du haut en bas de l'échelle des grandeurs spatiales, dans son traitement des relations cognitives comme dans sa description des relations objectales, le formalisme quantique n'indique que de pures *corrélations*. Des corrélations que le langage courant peut tout au plus traduire par une *liste d'énoncés conditionnels*, comme par exemple : « *si* la trace se situe au niveau de la première graduation, *alors* cela signifie telle ou telle chose pour l'objet mesuré ; mais *si* elle est sur la deuxième graduation, *alors* cela entraîne telle ou telle autre chose, *si* elle est sur la troisième, *alors* (...) »³⁴.

34.-E. Schrödinger, « La situation actuelle en mécanique quantique », in: E. Schrödinger, *Physique quantique et représentation du monde*, Points-Seuil, 1992, p. 121.

Les théories de la décohérence elles-mêmes n'ont pas fondamentalement changé cette situation. Tout ce qu'elles ont montré est que la structure particulière des corrélations quantiques (impliquant des termes de forme interférentielle), se rapproche asymptotiquement, à l'échelle macroscopique, de la structure des corrélations de la théorie *classique* des probabilités. Cela permet bien de traiter approximativement ces corrélations *comme si* elles reflétaient des relations survenantes entre propriétés macroscopiques. Mais d'une part, le « comme si » reste inéliminable, ce qui interdit d'ignorer le caractère essentiellement non-survenant des relations quantiques. Et d'autre part, aucune propriété singulière n'émerge des calculs de décohérence, montrant une nouvelle fois que le formalisme de la théorie quantique ne saurait sortir par lui-même du *cercle des relations*.

Les théories de la décohérence (corroborées par l'expérience) montrent simplement la compatibilité approximative, à l'échelle macroscopique, du cercle de propriétés de la physique classique et du cercle de relations non-survenantes de la physique quantique.