

GILLES

COHEN

TANNOUJJI

LES CONSTANTES

UNIVERSELLES

HACHETTE



**GILLES
COHEN
TANNOUJJI
LES CONSTANTES
UNIVERSELLES**

HACHETTE

Documents de couverture :
Traces de particules Z0, détecteur Delphy (CERN/LEP),
© Philippe Plailly
Portrait de Gilles Cohen-Tannoudji, © John Foley.
© Hachette, 1991.

INTRODUCTION

Au mois de mai 1687, Isaac Newton (1642-1727) rédige à Cambridge la préface à la première édition des *Principia mathematica philosophiae naturalis*, le livre qui allait pendant plus de deux siècles dominer la pensée des physiciens et, au-delà d'eux, de tous les hommes de science et de culture. L'auteur présente son œuvre, rédigée à la demande de l'astronome Edmond Halley (1656-1742), comme destinée à « établir » et « démontrer » rigoureusement la science qu'il désigne comme « mécanique rationnelle », c'est-à-dire par opposition à la « mécanique pratique » destinée à l'usage des machines, l'étude mathématique « des mouvements qui résultent de forces quelconques et des forces qui sont requises pour des mouvements quelconques ». Cette science comporte des « propositions générales » (définitions, axiomes ou lois, théorèmes...) occupant les deux premières parties de l'ouvrage; la troisième présentera un « exemple » en « expliquant le système du monde ».

Newton aurait un jour déclaré, reprenant une très ancienne maxime : « Si j'ai vu plus loin que d'autres hommes, c'est que j'étais perché sur les épaules de géants. » De fait, on le voit prendre le relais de Galilée et de Descartes en mécanique, de Kepler en astronomie, et l'on sait l'appui qu'il trouva dans les œuvres de Christian Huygens. Les cinquante premières années du XVII^e siècle ne

manquent pas de « géants » ! Les *Principia* peuvent, en un sens, se lire comme le couronnement du plus puissant mouvement de pensée inventive dont l'humanité se soit montrée capable depuis l'Antiquité. Mais Newton ne se contente pas de coordonner des résultats acquis ; dès l'énoncé de ses définitions et axiomes, il innove avec une audace qui a déconcerté beaucoup de ses contemporains. Trois de ces innovations vont se trouver l'objet des plus vifs débats qui ont accompagné les progrès de la physique.

Contre Descartes, il réintroduit dans la science la notion de « force ». L'auteur des *Principes de la philosophie* (1644) avait cru devoir l'en chasser comme une idée obscure et confuse liée à la métaphysique finaliste d'Aristote. Il avait entrepris en conséquence de réduire la matière à l'étendue en niant qu'il existât quelque différence réelle entre l'intérieur et l'extérieur d'un corps. Il avait réussi à donner ainsi du monde un vaste tableau où tous les mouvements s'effectuaient par contacts, provoquant d'immenses et incessants « tourbillons ». Newton s'oppose à ces vues grandioses qui s'avéraient impropres à une mathématisation de la physique, malgré l'ambition affichée de Descartes. Il redéfinit la quantité de matière comme « mesure que l'on tire à la fois de sa densité et de son volume », puis la quantité de mouvement d'un corps comme « mesure que l'on tire à la fois de sa vitesse et de sa quantité de matière ». De là, il infère que les corps se meuvent dans un espace immobile

et vide selon des trajectoires qui s'avèrent déterminées par des forces elles-mêmes mesurables avec toute la précision mathématique souhaitable.

La deuxième innovation majeure de Newton apparaît ainsi immédiatement : l'élaboration d'une méthode de calcul inédite, déjà exposée par lui dans un mémoire intitulé *Méthode des fluxions et des suites infinies* (1671) et désignée ici comme « méthode des premières et des dernières raisons ». Il s'agit du calcul « infinitésimal » ou, comme on dirait aujourd'hui, « différentiel ». Newton a lui-même parfaitement résumé l'essentiel de la conception des mathématiques qui soutenait ce calcul : « Je considère ici les quantités mathématiques, non pas comme composées de parties les plus petites possibles, mais comme décrites par un mouvement continu. Les lignes sont décrites, et, étant décrites, sont générées non par l'apposition de parties, mais par le mouvement continu des points; les surfaces par le mouvement des lignes; les solides par le mouvement des surfaces; les angles par la rotation des côtés; les temps par un flux continu... Ces genèses tiennent une place véritable dans la nature des choses et on les remarque quotidiennement dans le mouvement des corps. »

De l'application de la « mécanique rationnelle » ainsi conçue se tire le grandiose système qui vaudra à Newton une gloire sans pareille. L'énoncé de la loi de la gravitation universelle – troisième innovation – rend compte par une même équation du mouvement d'« une pierre tournant

au bout d'une fronde » aussi bien que « des planètes effectuant leurs révolutions autour d'autres planètes ou astres ». Newton affirme espérer qu'on pourra un jour rendre compte de la même façon des forces qui régissent les mouvements des « particules constituant les corps ».

Une fois vaincues les opiniâtres résistances cartésiennes, la renommée de Newton fut universelle; le respect dont son œuvre se trouva entourée confine à l'adoration. Les philosophes des Lumières se voulurent newtoniens aussi bien dans les sciences qu'en morale et en politique. Le présent livre de Gilles Cohen-Tannoudji remet en perspective toute l'histoire de la physique moderne du point de vue des recherches contemporaines. Newton y représente la première de quatre grandes figures autour desquelles tourne son argumentation. Il apparaît en effet clairement que, depuis trois siècles, les physiciens n'ont jamais cessé de s'expliquer avec son œuvre. Des *Principia*, on retient au début du XVIII^e siècle que leur auteur a réussi à donner le dessin sinon complet du moins parfaitement cohérent des forces qui régissent le monde physique en les soumettant à une unique formule mathématique; qu'il a ainsi prouvé que la connaissance humaine a trouvé la voie pour s'appropriier le tout de la nature. En ce sens, Newton justifiait les espoirs placés dans la physique depuis l'aube de la science moderne. Galilée n'avait-il pas exprimé la conviction que le « grand livre de la nature » était

écrit en langage mathématique? Newton en apportait la démonstration. En quoi, il faisait triompher non seulement une certaine idée du rapport de la pensée à la nature, mais une représentation de la pensée elle-même qui avait fait l'objet de très rudes combats.

Une certaine vue sèchement rationaliste de l'histoire tient la constitution de la science moderne pour le résultat d'une brutale conversion des esprits à la « vie active ». Le monde du Moyen Âge finissant se serait arraché aux torpeurs de la contemplation pour soumettre la nature à « la question », selon le mot plein de sens du chancelier Bacon. Mais il n'est de « conversion » que longuement mûrie, préparée par un profond mouvement spirituel. Tel fut le cas. Que l'on songe, parmi d'autres, aux œuvres sulfureuses et enfiévrées de Giordano Bruno (1548-1600). Le philosophe allemand Ernst Cassirer a su trouver les mots justes pour rendre leur tonalité essentielle : « le désir et la jouissance sensuels se joignent à la puissance de l'esprit pour arracher l'homme au simple donné et l'envoyer prendre l'air du possible. » L'Inquisition le conduisit au bûcher le 17 février 1600 dans des conditions effroyables. Le tribunal ecclésiastique avait parfaitement perçu le danger : le crime du dominicain rebelle ne résidait pas seulement dans son adhésion aux thèses héliocentriques de Copernic; il avait sans aucun doute commis l'erreur de professer une

« magie naturelle » puisée à la tradition hermétiste qui divisait l'Église et les monarchies de la Contre-Réforme; mais sa faute la plus grave n'avait-elle pas consisté, aux yeux de ses bourreaux, à avoir fièrement porté, sur cette base doctrinalement archaïque, le message d'un monde nouveau? La thèse proclamée de l'infinité de l'Univers et de la pluralité des mondes apparaissait comme le symbole maudit d'une allure de la pensée dont l'arrogance pouvait passer pour démoniaque. Le glas sonnait ainsi de la conception médiévale du rapport de la pensée à l'être. Toute réalité jusque-là trouvait sa place dans une architecture immuable d'origine divine; par la distance qui le séparait de la « cause première », chaque être recevait une « valeur » absolument déterminée. Connaître revenait, par l'exercice de la raison naturelle, à percevoir cette place et à découvrir cette hiérarchie. La nature apparaissait comme limitée par un horizon prédéterminé, par la frontière infranchissable qui, les séparant du Créateur, condamnait d'avance toutes les créatures à l'imperfection aussi bien de leurs connaissances que de leurs œuvres. Bruno provoque un véritable séisme qui menace d'effondrement cet édifice : la nature, selon lui, participe tout entière, de l'intérieur, à l'être divin originaire, lequel fait ainsi figure d' « âme du monde ». Il s'ensuit que la puissance créatrice de la pensée peut elle-même s'affirmer comme infinie!

Sans doute Galilée partageait-il une part de cette conviction; mais il l'exprima dans un tout

autre langage en usant d'une image qui préservait l'idée d'un Dieu personnel entretenant avec les créatures un rapport d'extériorité. Dieu est l'auteur du « grand livre de la Nature ». Il faut donc admettre qu'il ait donné deux livres à l'humanité. Tout juste Galilée suggère-t-il qu'aux obscurités de la parole révélée inscrite dans les Écritures, on peut préférer la netteté du « langage mathématique » lisible en toutes lettres dans la Nature puisque ce langage apparaît intégralement accessible à l'entendement humain. Mais il ne s'est guère expliqué sur l'abîme métaphysique qu'ouvrait sa conception des deux livres. Descartes qui l'admirait comme savant déplorait la médiocrité de sa philosophie. Son génie propre s'appliqua donc à établir les bases philosophiques qui pussent convenir à la mécanique nouvelle. Les *Méditations métaphysiques* (1641) présentent le chemin d'une telle fondation : renouvelant le sens du mot « création », Descartes présente Dieu comme le créateur de l'essence des choses et des « vérités éternelles » dont il a déposé les « semences » en nos esprits ; Dieu apparaît ainsi comme le « garant » de l'application que nous faisons de ces vérités à la nature. Pour peu que nous suivions la bonne méthode, celle que nous enseigne la géométrie analytique, nous pouvons par la lumière naturelle rendre le monde transparent à notre esprit. L'élan « moderne » de la pensée, et l'autonomie de sa démarche se trouvent ainsi assurés. Mais Descartes se garde de l'audace de Bruno : Dieu, en tant qu'être infini, reste

incompréhensible à la pensée finie qui bute ici sur une limite « ontologique ».

Les philosophes des Lumières s'en prennent à l'« esprit de système » cartésien, rejettent ses présupposés et ses conclusions métaphysiques. Désireux de trancher le dernier lien institué entre la connaissance de la nature et quelque origine supranaturelle, ils croient pouvoir enrôler l'œuvre de Newton à ce combat. Plutôt que d'attribuer les progrès de l'esprit humain aux vertus d'une supposée « lumière naturelle », ils déclarent la nature elle-même lumineuse. Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) s'interroge à haute voix dans ses *Éléments de philosophie* : « Que nous importe au fond de pénétrer dans l'essence des corps (...) pourvu que le système général des phénomènes, toujours uniforme et continu, ne nous présente nulle part de contradiction ? » Ne cherchons pas à fonder l'unité de la nature sur l'unité de son origine divine ; contentons-nous de constater qu'elle présente un ordre constant et complet, intégralement intelligible comme un système parfaitement clos, un et uniforme en lui-même.

C'est ainsi autour de l'universalité de la loi de la gravitation que fut organisé le culte de Newton. Cette version du « newtonianisme » a donné lieu à une véritable tradition épistémologique qui commence, en France, avec les textes du grand astronome et mathématicien Pierre Simon Laplace (1749-1827), se prolonge dans l'œuvre

d'Auguste Comte et parvient jusqu'à nous dans les diverses variétés du positivisme philosophique : la science, dit-on, doit renoncer à s'interroger sur le « pourquoi » des phénomènes pour n'en étudier que le « comment » ; elle se contentera de formuler mathématiquement les régularités constatées entre des faits établis par l'observation. Une telle conception masque un embarras de la pensée qui n'avait pourtant échappé ni à Newton lui-même ni à quelques-uns de ses contemporains : comment priver l'idée de nature de l'appui jusque-là fourni par l'idée de Dieu sans perdre les moyens d'expliquer l'universalité, l'unité et l'éternité de ses lois ? Surtout si l'on veut éviter la solution avancée par Spinoza, dans un esprit, à certains égards, proche de celui de Bruno, d'une pure et simple identification de Dieu à la nature ? Dans le *Scholie général* qu'il avait cru nécessaire de rédiger en 1713 pour l'adjoindre à la deuxième édition des *Principia*, Newton avait abordé la question sans détours pour éclaircir quelques malentendus. Il n'y a pas, explique-t-il alors, de cause « mécanique » à l'ordre du monde. « Cet arrangement aussi extraordinaire du Soleil, des planètes et des comètes n'a pu avoir pour source que le dessein et la seigneurie d'un être intelligent et puissant. Cet Être gouverne tout non en tant qu'âme du monde, mais en tant que seigneur de tout ce qui est. » D'Alembert comme tant d'autres ont délibérément oublié cette profession de foi, laquelle renvoie à une tradition théologique qui lui est étrangère.

C'est le philosophe écossais David Hume (1711-1776) qui lèvera le lièvre : lorsque nous appuyons nos efforts de connaissance sur l'axiome de l'uniformité de la nature, nous avons recours à une simple croyance (« *belief* »)! Hume cherche dans une analyse de la « nature humaine » le fondement de cette croyance. Emmanuel Kant dira plus tard que cet argument l'a réveillé de son « sommeil dogmatique ». L'auteur de la « Théorie du Ciel » écrit la *Critique de la Raison pure* (1781) pour « sauver » l'objectivité de la science newtonienne minée par le raisonnement radicalement sceptique de Hume. Le destin de la philosophie occidentale s'en est trouvé bouleversé, car ce salut, ou ce sauvetage, n'a pu s'effectuer qu'en détachant l'espace et le temps absolus de la divinité des *Principia* pour les inscrire dans la structure même de l'esprit humain, à titre de « formes *a priori* de la sensibilité ».

Désormais la question des « limites » de la connaissance se formulera en ces termes : jamais l'être humain ne pourra connaître les choses en elles-mêmes; ce qu'on appellera plus tard sa « finitude » le condamne à ne construire, par le jeu de ses facultés, que des « objets » dont nous pouvons seulement dire qu'ils « correspondent » à l'existence de ces choses puisqu'ils sont élaborés à partir des données sensibles qui émanent d'elles. L'objectivité des connaissances produites par la physique apparaît donc comme l'horizon d'un processus d'objectivation réglé par une exigence

ininterrompue d'unification qui renvoie à l'unité du sujet pensant. Du point de vue de l'histoire des sciences, le trait le plus important de l'œuvre de Kant réside dans la sanction qu'elle apporte ainsi à la conception newtonienne du rapport entre matière et espace. L'espace, en tant que forme de l'intuition, n'est pas « dans les choses » ; il s'agit d'une réalité radicalement différente de la matière qui la remplit sans agir jamais sur elle.

Si prestigieux que devînt l'auteur de cette construction philosophique, on comprendrait mal l'empire qu'elle a pu garder sur les esprits jusqu'à la fin du XIX^e siècle si l'on n'avait égard aux succès accumulés et coordonnés de la mécanique rationnelle à laquelle elle se référait. De ces succès, Auguste Comte donnera le tableau encyclopédique dans son *Cours de philosophie positive* rédigé de 1830 à 1842 : de la « mécanique céleste » à la « théorie analytique de la chaleur » de Joseph Fourier (1768-1830), un même mode de penser manifeste en chaque cas son extraordinaire fécondité.

On comprend aisément dans ces conditions la gravité du trouble qui s'empara des physiciens lorsque le second principe de la thermodynamique redécouvert en 1850, tel qu'il avait été formulé par Sadi Carnot en 1824 dans son mémoire *Sur la puissance du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, fit apparaître un ordre de phénomènes qui ne s'inscri-

vaient nullement dans cet édifice. S'il est possible de transformer intégralement du travail en chaleur, l'inverse n'est pas vrai. Carnot donnait la formulation théorique de cette impossibilité pratique éprouvée par les ingénieurs dans la mise au point des machines à vapeur. Le physicien autrichien Ernst Mach (1838-1916) en tirera quelques décennies plus tard les leçons philosophiques dans son célèbre livre *La Mécanique* : l'irréversibilité des processus thermodynamiques doit conduire à réexaminer les présupposés du « mécanisme ». Vouloir tout expliquer par des « modèles mécaniques », c'est se soumettre à une véritable philosophie de la nature qui a commis l'erreur initiale d'absolutiser les schèmes de pensée de la mécanique rationnelle; qui a accordé ainsi un crédit excessif, à l'instar de Kant, aux notions d'espace et de temps absolus.

Ludwig Boltzmann (1844-1906) tentera de retrouver les lois macroscopiques de la thermodynamique et de rendre compte de l'irréversibilité de ces phénomènes en les interprétant comme l'effet apparent des interactions d'un très grand nombre de systèmes élémentaires constitués par des atomes et des molécules. Il utilise pour ce faire le calcul des probabilités. L'opposition de Mach et de ses disciples fut immédiate, violente et radicale : ils tinrent cet atomisme conjectural pour un nouvel avatar de la philosophie qu'ils combattaient. Ils rejetèrent l'idée d'atome, et ne surent pas apprécier à sa juste valeur l'intuition

statistique de leur adversaire. Une conviction épistémologique explicitée par Mach lui-même dans plusieurs ouvrages sous-tendait leur position : que les physiciens doivent s'abstenir de toute hypothèse sur le réel qu'ils étudient et se contenter d'établir une correspondance entre un formalisme mathématique et des données d'observation. L'« empirisme logique » du Cercle de Vienne (1929), créé d'abord sous le nom de Société Ernst Mach, reprit l'essentiel de ces thèses. De façon très cohérente, l'anti-kantisme de Mach reconduisait sa pensée à une position proche de celle de Hume, dès lors qu'il refusait aussi tout recours à la « métaphysique ».

Albert Einstein (1879-1955) a plus d'une fois souligné sa dette à l'endroit de l'auteur de *La Mécanique*. Il découvrit dans ce livre le caractère absurde de l'idée d'action immédiate à distance acceptée par Newton et le lien qui unissait à cette absurdité les notions d'espace et de temps absolus. Jamais cependant Einstein n'eut la moindre sympathie pour le positivisme de Mach. On en trouve les raisons dans l'admiration qu'il professa pour Newton lui-même. De son œuvre, il retenait l'idée que la vocation de la physique consiste à bâtir « une conception unifiée de l'univers » autour du plus petit nombre possible de formules mathématiques. Gilles Cohen-Tannoudji explique lumineusement la démarche qui a permis à l'inventeur de la théorie de la relativité restreinte (1905) puis générale (1915) de remplir ce pro-

gramme pour son compte. Les présupposés de la mécanique rationnelle une fois mis à jour, Einstein les refond dans une pensée qui les « comprend », au sens où elle les englobe tout en rendant mathématiquement compte de leur approximation. Mais le lecteur verra aussi comment, avant même d'être réalisée, l'unification ainsi projetée de la physique s'est trouvée minée par la « révolution des quanta ». Comment admettre que la matière obéisse à l'échelle subatomique à d'autres lois qu'à « notre » échelle macroscopique? Einstein ne s'y résigna jamais. Mais la question philosophique ainsi posée renvoie sans doute une dernière fois à Newton et à l'ambition qu'il a communiquée à des générations de physiciens de construire un « système du monde ». De ce système, Dieu, cet être tout-puissant qui ne réside jamais nulle part mais se trouve toujours et partout présent, assure la cohérence dans les *Principia*; le « sujet » connaissant tient sa place dans la philosophie kantienne. On a vu ce qu'il a pu en coûter à la physique. Contre la démission intellectuelle du positivisme qui veut borner la science au constat des mesures effectuées par les chercheurs, il arrivait à Einstein de se référer à Spinoza : c'est l'être de la nature qui se révèle dans les lois que nous formulons. Plus généralement, contre toutes les théologies, il avait recours aux « religions cosmiques » : l'élan de la connaissance se puise dans l'admiration que nous inspire le Tout de la nature. La mécanique quan-

tique met en évidence l'interaction des dispositifs de mesure avec les objets étudiés, elle oblige les physiciens qui travaillent à l'échelle de l'atome à intégrer dans la conceptualisation même les conditions de l'expérimentation. Cela signifierait-il que l'esprit se retrouverait inscrit au plus intime de la matière, et que la physique actuelle rejoindrait certaine vue religieuse du monde pour célébrer la souveraineté du premier sur la seconde? Certains le disent, qui se soucient visiblement plus du salut de Dieu que du progrès des sciences. Ne nous enjoint-elle pas plutôt de renoncer définitivement à occuper la place de Dieu? Le processus d'unification de la physique ne nous présente, en fait, jamais qu'une somme de « points de vue » sur le monde, tributaires des découpes que nous devons pratiquer sur le réel pour le connaître. Les constantes universelles, « pierres angulaires de la physique théorique », selon le mot de Max Planck, marquent, avec une prodigieuse précision, les limites de notre effort dans la direction de l'infiniment petit comme de l'infiniment grand.

Pour l'esprit scientifique, écrivait Gaston Bachelard, « tracer nettement une frontière, c'est déjà la dépasser ». Gilles Cohen-Tannoudji, loin de s'évader dans des spéculations finalistes qui croient pouvoir découvrir le doigt de Dieu dans le « réglage » minutieux des constantes, travaille la notion d' « horizon » jusqu'à en faire une véritable

catégorie philosophique. Il attire l'attention sur le mode singulier qu'ont les physiciens de jouer avec les limites de leur savoir. Il plaide pour l'humilité du savant ; mais il montre aussi comment les horizons, reculant toujours, ne cessent d' « appeler » le progrès des connaissances. Le lecteur découvrira sans aucun doute avec passion la nouvelle ligne qu'il trace aux confins des recherches en astrophysique et en physique des particules : la promesse d'une cosmogonie scientifique. Demain nous découvrirons peut-être de nouvelles constantes du même type, mais ne faudra-t-il pas une nouvelle fois refondre notre idée du cosmos ?

Dominique LECOURT

G et *c* : LA RELATIVITÉ

Les termes « constantes » et « universelles » suggèrent des vérités de toujours et de partout. Or le monde ne nous apparaît que dans le rapport que nous entretenons avec lui ici et maintenant. Comment la physique peut-elle ériger en vérités éternelles et universelles le résultat de ses observations locales et immédiates? C'est à tenter de répondre à cette question qu'est consacré le présent ouvrage.

Les constantes universelles que nous discuterons sont la constante de Newton *G*, la constante de Boltzmann *k*, la vitesse de la lumière *c* et la constante de Planck *h*. Ces constantes jouent un rôle fondamental dans la structuration de la physique, dans son organisation en disciplines autonomes quand elles sont prises en compte séparément et dans son unification quand deux, trois ou même les quatre sont prises en compte simultanément. Au cours de son histoire, la physique a pu introduire d'autres constantes, comme la constante diélectrique du vide, ou la constante de Hubble, mais je pense que seules *G*, *k*, *c* et *h* jouent un tel rôle. Cette thèse ne fait pas l'unanimité des physiciens, certains pensent que d'autres constantes sont tout aussi fondamentales, ou bien que toutes les quatre n'ont pas la même importance. Une telle diversité d'opinions ne doit pas

surprendre, car rien ne contraint les physiciens à être unanimes au sujet de l'épistémologie de la physique.

Pour l'essentiel, la réponse que je propose à la question posée ci-dessus réside dans la thèse que les constantes universelles exprimeraient des *limitations de principe de la connaissance humaine*, des limites aussi inévitables, inaliénables mais aussi déplaçables que le sont des *horizons*. Je me propose de montrer que les quatre constantes universelles traduisent l'existence de lignes d'horizons qui nous séparent de l'infiniment petit et de l'infiniment grand. Plus précisément, je partagerai les constantes en deux couples, G et c d'une part, h et k d'autre part. G et c , les constantes de la relativité, interviennent dans notre rapport à l'Univers dans sa globalité, elles sont liées au caractère relatif de la notion de simultanéité : il est impossible de définir un même « maintenant » partout. Quant à h et k , que l'on peut interpréter toutes les deux comme des *quanta*, on les rencontre lorsque l'on s'intéresse à la structure microscopique de la matière. Ces deux constantes délimitent un horizon temporel, elles traduisent que ce qui est « ici » maintenant ne l'a certainement pas toujours été, et ne le sera certainement pas toujours.

En fait, la vérité universelle et éternelle que traduisent les quatre constantes, c'est que l'Univers excédera éternellement notre capacité à le représenter. Grâce à ce parti pris d'humilité qui dissipe les illusions antiques de l'anthropocen-

trisme et modernes du réductionnisme et du scientisme, la physique, devenue plus lucide au travers de la *révolution des quanta*, a permis les grandes avancées scientifiques et technologiques du xx^e siècle.

Bien évidemment une telle interprétation des constantes universelles n'est pas apparue d'emblée, mais, selon une forte remarque de Gaston Bachelard, dans les sciences, l'ancien doit être pensé en fonction du nouveau; c'est le nouveau qui donne sens à l'ancien, en le renouvelant.

*LA LOI DE LA GRAVITATION UNIVERSELLE
ET LA CONSTANTE DE NEWTON*

Avant toute chose, il convient, me semble-t-il, de garder en mémoire le caractère expérimental des sciences physiques, même si les débats sur l'interprétation théorique de leurs résultats et sur l'élaboration de leurs hypothèses fascinent les esprits. De fait, l'énoncé des quatre constantes s'avère redevable d'expériences fondamentales. Il en est ainsi de la constante G de Newton : il fallut d'abord, pour qu'elle apparût dans le cadre de la théorie de la gravitation universelle, que l'expérience de Galilée eût établi l'indépendance de l'accélération que la pesanteur communique aux corps par rapport à la masse de ces corps; il fallut aussi qu'on pût bénéficier des patientes et méticuleuses observations du mouvement des planètes autour du Soleil par Tycho Brahé (1546-1601),

puis du modèle phénoménologique de l'astronome allemand Johannes Kepler qui, à partir de ces observations, a pu énoncer les fameuses lois qui portent son nom; qu'on sût donc que ces corps ne décrivaient pas des cercles, mais des ellipses; que les planètes balayent des aires égales en des temps égaux, et que la durée de leurs révolutions est fonction du grand axe de l'ellipse. Cette histoire, qui associe expérimentations, observations et interprétations, fut, bel et bien, le préalable indispensable à la formulation de la loi de Newton. Richard Feynman a très bien expliqué que Newton s'est contenté, si l'on peut dire, de rassembler toutes ces observations en une théorie unique sans finalement rien ajouter à ce que disaient déjà, mais séparément, Kepler et Galilée. Quelle était en effet l'idée essentielle de la « loi des aires »? Que la force qui lie une planète au Soleil relie le centre du Soleil à la planète (on dit qu'elle est « centrale »). Qu'affirmait la loi de Galilée? Que l'accélération de la gravitation est indépendante de la masse. Newton établit un rapport jusque-là inaperçu entre ces deux lois. La loi des aires s'explique aisément si l'on suppose que la planète éprouve une accélération constamment dirigée vers le Soleil; elle est donc une conséquence de l'hypothèse d'une accélération centrale qui soit en raison inverse du carré de la distance; il en déduit par voie mathématique la réciproque: cette accélération produit un mouvement dont la trajectoire est une ellipse. En termes modernes: la force de

gravitation est proportionnelle au produit des deux masses des corps en interaction et inversement proportionnelle au carré de leur distance.

Mais si l'on veut exprimer mathématiquement cette loi, dans l'équation que l'on est amené à poser, à une force, d'un côté, correspond, de l'autre, le produit de deux masses divisé par le carré d'une longueur. Or la masse, la longueur et la durée désignent des grandeurs physiques fondamentales. On définit la masse par la quantité de matière contenue dans un volume donné, la longueur par la quantité d'espace entre deux points sur une ligne, la durée par la quantité de temps entre deux instants. A partir de ces quantités fondamentales s'expriment toutes les autres, qui en sont dérivées. On appelle « contenu dimensionnel » d'une quantité dérivée les proportions dans lesquelles les quantités fondamentales entrent dans sa définition. Par exemple, une vitesse a le contenu dimensionnel d'une longueur divisée par une durée, une accélération a le contenu dimensionnel d'une longueur divisée par le carré d'une durée, etc. Une loi physique exprime une relation entre des quantités physiques qui ont le même contenu dimensionnel. Or, si l'on considère précisément la loi de la gravitation, on voit que dans le rapport posé il n'y a pas, des deux côtés du signe =, le même contenu dimensionnel ! Quel est en effet le contenu dimensionnel d'une force ? Il s'agit, comme nous l'enseigne l'une des premières lois de Newton, du

produit d'une masse par une accélération; donc d'une masse que multiplie une longueur divisée par le carré d'un temps. Tel se présente donc le terme de gauche de l'équation newtonienne de la gravitation. Or, lorsque l'on considère le terme qui se trouve à droite, on voit qu'il s'agit d'une masse portée au carré, puisqu'on a affaire au produit de deux masses, que divise le carré d'une longueur. Il y manque donc du temps, des masses, etc. C'est pour annuler ce déséquilibre qu'on introduit la constante G que l'on attribue à Newton, alors qu'en fait il ne l'a jamais lui-même explicitée. Elle permet de rétablir l'homogénéité du contenu dimensionnel du côté gauche et du côté droit de l'équation qui exprime en langage mathématique moderne la loi de Newton : $F = G Mm/r^2$ (m est la masse du corps, M la masse de la Terre et r la distance du corps au centre de la Terre).

« Constante » : cela signifie que cette grandeur doit être indépendante du temps, de la position, de la masse et de la nature des corps. Si G n'était pas une *constante universelle*, la loi de la gravitation *universelle* ne serait pas ce qu'elle est : si G dépendait du temps, la force de gravitation varierait avec le temps, les planètes n'orbiteraient donc pas toujours de la même façon; si G dépendait de la position des corps en interaction gravitationnelle, la loi ne serait pas en inverse du carré de la distance.

Une telle constante, on le voit, n'a pas d'abord été pensée comme une caractéristique

essentielle de la nature, elle a, au stade où nous sommes de notre exposé, un contenu « utilitaire ». Elle apparaît seulement comme une quantité nécessaire à la formulation mathématiquement correcte de la loi; une quantité, de contenu dimensionnel étrange (le cube d'une longueur divisé par une masse et le carré d'un temps, $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s}^{-2}$, pour être précis) dont pour le moment nous ne comprenons pas bien la signification. A vrai dire, l'introduction de cette constante ne semble, à première vue, que perturber la beauté, l'harmonie et l'élégance de la loi qui depuis Newton, frappent tous les esprits et donnent lieu à l'essentiel des spéculations philosophiques. Un physicien n'aime guère introduire une grandeur que semblent lui imposer les seules nécessités du calcul. Plus tard, vers la fin de l'ouvrage, lorsque nous l'associerons à *c* et *h*, nous verrons que *G* acquiert une signification tout à fait surprenante, concernant la structure microscopique (c'est-à-dire lorsqu'il s'agit des réalités subatomiques) de l'espace et du temps.

LA RELATIVITÉ RESTREINTE
ET LA VITESSE DE LA LUMIÈRE c

L'œuvre de Newton a donné lieu à un imposant développement, celui de la « mécanique rationnelle », qui a pris forme achevée dans les œuvres du mathématicien français Joseph Louis Lagrange (1736-1813) et de l'Irlandais William

R. Hamilton (1805-1865). Ainsi que l'a souligné le physicien autrichien Ernst Mach (1838-1916), la mécanique de Newton restait géométrique; elle procédait par voie synthétique, en déduisant la démonstration des hypothèses à l'aide de constructions et de figures. Avec Lagrange et Hamilton, on procède désormais par voie « analytique » en appliquant l'algèbre à la géométrie pour rechercher les conditions d'existence des propriétés d'une figure. La physique dite « classique » qui s'appuie sur ce développement apparaît donc comme une mathématisation systématique de toute la mécanique des corps matériels. Survient alors, au beau milieu du XIX^e siècle, la synthèse réussie par James Clerk Maxwell (1831-1879), qui réunit, dans un même traitement théorique d'ensemble, les phénomènes électriques, magnétiques et optiques. Synthèse admirable qui apparaissait comme une nouvelle victoire de la physique! Or, Maxwell en arrivait à défendre une théorie *ondulatoire* de la lumière, alors que Newton s'était rallié à une conception *corpusculaire*! Il est intéressant de comparer la dynamique des ondes décrite par les équations de Maxwell à la dynamique des corps matériels décrite par les équations de Lagrange et Hamilton. Il semble en effet possible d'unifier les deux dynamiques, mais de sérieuses difficultés surgissent en liaison avec le temps nécessaire à la propagation de la lumière. De fait, les lois fondamentales de la mécanique rationnelle ne semblent pas vouloir

s'appliquer parfaitement à la propagation de la lumière.

L'expérience d'Albert Michelson et Edward William Morley intervient dans ce contexte en 1887. Répétée en 1902 et 1903, elle se présente comme une expérience très simple et très astucieuse d'interférométrie. Les deux physiciens américains essayèrent de voir s'il n'y avait pas des phénomènes d'interférence entre des faisceaux lumineux provenant de sources se déplaçant dans deux sens différents avec des vitesses différentes. Or, contrairement à toute attente, de telles interférences ne se produisirent pas ! Il fallait se rendre à l'évidence : la propagation de la lumière, décidément, présentait un cas particulier qui défiait les lois de la physique classique, et la mettait en échec. Seule la théorie de la relativité restreinte permettra de lever la difficulté.

Henri Poincaré (1854-1912), le grand mathématicien et physicien français, reprenant sur de nouvelles bases l'argumentation du physicien autrichien Ernst Mach, avait fait remarquer que l'idée d'« action immédiate à distance », admise par Newton pour rendre compte de l'attraction des corps dans un espace absolu supposé vide, n'avait rien d'évident, ni même de très raisonnable. Si l'on suppose, comme le fait résolument Einstein, qu'une telle action n'existe pas, cela signifie, grossièrement, que si l'on fait quelque chose en un point A, l'effet de ce que l'on fait

prend un temps fini non nul pour se transmettre à un point B situé à une distance finie non nulle. Mais qui dit temps fini, dit par là même qu'il n'y a pas de vitesse infinie. Rien donc ne peut se propager à une vitesse infinie. On en conclut aisément qu'il doit exister une vitesse qui représente la borne supérieure de toutes les vitesses, et ce dans tout l'Univers. Il apparaît évident également que cette vitesse doit être *invariante*; qu'elle ne doit donc pas changer par changement de « référentiel », terme que l'on emploie en physique pour désigner le système d'axes de coordonnées auquel on se « réfère » pour repérer le mouvement que l'on veut étudier. Si, en effet, une telle variation s'avérait possible, on pourrait dépasser la vitesse limite, ce qui est contradictoire!

Or, à ce jour – et encore aujourd'hui – on n'avait rien trouvé de plus rapide que la propagation de la lumière; et, d'autre part, l'expérience de Michelson et Morley montrait que la vitesse de la lumière était indépendante du référentiel. Il fallait en déduire que la vitesse de la lumière c , égale à $300\,000\text{ km s}^{-1}$, peut être effectivement tenue pour la borne supérieure de toutes les vitesses.

Ce raisonnement impeccable, Einstein le mène à son terme en 1905, et le prolonge en réexaminant tout ce qui, dans la physique classique, se trouve ébranlé par ses conclusions. C'est ainsi qu'il conserve certains principes, et en reformule d'autres. On peut définir la théorie

de la relativité restreinte comme le champ des remises en causes impliquées dans la physique classique par la découverte d'une vitesse limite supérieure affectant l'Univers entier. Einstein conserve le principe galiléen de relativité, celui qui avait permis à l'auteur des *Dialogues* (1632) de montrer que « des papillons embarqués à bord d'un navire volettent de-ci de-là de la même façon, que le navire soit immobile à quai, ou qu'il vogue entre Venise et Alep » et d'en conclure que si la Terre tourne, nous ne nous apercevons pas de son mouvement. Mais Einstein libère la physique du caractère absolu de la notion de « simultanéité » admis par Galilée, puis par Newton qui supposent l'un et l'autre que la simultanéité de deux événements ne se produisant pas au même endroit a un sens absolu, qu'elle est vraie pour tout observateur, où qu'il soit situé. Il lui faut donc reformuler ce principe même de la relativité, et constituer la première « théorie » de la relativité.

Dans la physique classique, l'espace et le temps se trouvent comme indépendants. L'espace a trois dimensions, et le temps ne dépend pas du référentiel spatial : on peut définir un même « maintenant » partout. On dit que le temps est un « scalaire spatial ». Avec Einstein, le temps apparaît au contraire comme la quatrième dimension de l'« espace-temps » ; il est donc relatif au référentiel d'espace-temps. Il convient donc de refor-

muler toute la mécanique, y compris le principe de la relativité. Ce qui apparaissait comme un point dans l'espace devient du coup un *événement* ponctuel dans l'espace-temps; événement indiqué par quatre nombres : la date et les trois coordonnées du lieu où il advient. On voit qu'il faut redéfinir les transformations des mouvements rectilignes uniformes telles qu'on les avait conçues depuis Galilée, en les insérant dans l'espace-temps, et non plus seulement dans l'espace. C'est donc par rapport à des transformations de l'espace-temps qu'il va falloir désormais parler de relativité; la relativité galiléenne se trouve ainsi généralisée. Le prix de cette innovation théorique, c'est d'abord que le temps ne joue plus, comme coordonnée, le rôle d'un invariant. Il en est de même de la *métrique spatiale* : la longueur d'une règle était tenue en physique classique pour un invariant, indépendant du référentiel; mais si, avec Einstein, on considère les trois composantes spatiales comme trois composantes d'un vecteur à quatre dimensions, il n'en va plus de même : désormais la métrique d'un vecteur qui relie deux points peut changer, si l'on change de référentiel d'espace-temps. La façon dont le temps et la métrique spatiale changent dans un changement de référentiel d'espace-temps se trouve ajustée de façon à ce que la vitesse de la lumière reste constante.

Einstein ne s'arrête pas en si bon chemin : la masse elle-même n'apparaît plus comme un inva-

riant. La loi de Newton qui relie force, masse et accélération, doit à son tour être reconsidérée. Cela peut se comprendre assez aisément. Partons, dit Einstein, de l'énoncé de cette loi : lorsqu'on exerce une force sur un corps massif, ce corps acquiert une accélération proportionnelle à cette force et inversement proportionnelle à sa masse. Cette loi newtonienne s'applique parfaitement, mais seulement tant que la vitesse du corps est petite devant la vitesse de la lumière. Comme aucun corps dans l'Univers n'est susceptible de dépasser cette vitesse, il faudra bien, lorsque la vitesse du corps approche celle de la lumière, que l'énergie communiquée au corps cesse de provoquer une accélération – par définition désormais impossible. Une seule solution : que cette énergie accroisse la masse du corps, si bien que la borne supérieure des vitesses ne soit jamais franchie. La formule bien connue d'Einstein : $E = mc^2$ (où il s'agit de l'énergie totale E d'un corps de masse m) exprime cette variation de la masse. La masse n'est plus un invariant, elle dépend de la vitesse du corps.

On peut, au demeurant, définir la « masse invariante » d'un corps : il s'agit de sa masse dans un référentiel où il est au repos. Pour des particules qui, comme les « photons », les « particules de lumière », ne sont jamais au repos et se déplacent toujours à la vitesse de la lumière, cette masse invariante est nulle. Les photons peuvent

toutefois être plus ou moins énergiques; ils ont dès lors une « masse effective » que l'équation d'Einstein égale à leur énergie divisée par le carré de la vitesse de la lumière ¹.

Comment ne pas admirer la puissance du raisonnement d'Einstein? Par une pure déduction logique, on le voit obtenir des résultats dont les implications expérimentales sont depuis testées et vérifiées tous les jours! Par exemple, on vérifie chaque jour que les particules ne peuvent dépasser la vitesse de la lumière lorsqu'on les « accélère » (en fait, on ne les accélère pas, on leur donne plus d'énergie) dans les grands accélérateurs. La précision avec laquelle on manipule les faisceaux de particules qui circulent dans ces appareils confirme qu'ils ne dépassent jamais la vitesse de la lumière.

Mais revenons à la théorie de la relativité restreinte en elle-même. Elle permet d'établir que le temps, la métrique spatiale et la masse ne sont pas des invariants; que ces grandeurs sont « relatives » au référentiel. Mais il n'y a dans cet énoncé nulle trace de *relativisme*; au contraire, comme l'a souligné Victor Weisskopf ²,

1. Certains auteurs, comme le physicien soviétique Lev Okun, que je remercie pour la remarque qu'il m'en a faite, pensent que seule la masse invariante a un sens physique précis et que l'on devrait éviter d'utiliser le terme de masse pour désigner quelque autre « masse » que ce soit.

2. *La Révolution des quanta*, coll. Questions de sciences, Hachette, 1989.

cette théorie permet, pour la première fois, de formuler les lois de la physique de manière indépendante du référentiel, donc de façon absolue.

LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE,

G et c

PRISES EN COMPTE

SIMULTANÉMENT

On présente souvent la relativité générale comme une « extension » de la relativité restreinte : Einstein aurait élargi la critique de Newton amorcée avec la théorie de 1905. La chronologie et le vocabulaire – quelques textes aussi – le suggèrent fortement : la relativité générale surgirait de la réfutation encore approfondie de l'idée d'« action immédiate à distance ». En fait, après avoir tenté d'emprunter cette voie, Einstein en suivit une autre.

Sa pensée apparaît en effet guidée par une autre préoccupation qui n'était évidemment pas absente de ses premiers travaux : un souci de simplicité. Il doit être, pense-t-il, possible de formuler les lois de toutes les interactions sans avoir à faire mention du référentiel que l'on utilise, c'est-à-dire, classiquement, du système de coordonnées comportant une origine et des axes permettant de repérer un point dans l'espace. En termes actuels, on dira qu'il a pensé qu'il existait une *invariance* par changement général de repères référentiels. Or, pour établir une telle invariance, il lui fallait

poser un principe d'équivalence entre la *masse d'inertie* déterminée en mesurant l'accélération que produit sur elle une force donnée et la *masse gravitationnelle* ou « masse pesante », celle qui intervient dans la loi de la gravitation; ce qui revenait à penser que l'accélération de la pesanteur était indépendante de la masse, donc que la constante G était indépendante de la masse. Bref, Einstein, pour remplir son programme, devait supposer que pour toute masse, ce soit la même constante de gravitation qui intervienne. Voilà qui modifie le statut de la constante de Newton, et qui commence à lui donner davantage de signification physique.

Se fiant à sa conception générale de la physique selon laquelle les lois de la nature doivent être aussi simples que possible, Einstein se demanda donc si l'on pourrait les formuler de manière totalement indépendante de tout référentiel. Voilà qui revenait à faire un pas de plus – mais d'une extrême audace – dans la démarche qui l'avait conduit à la théorie de la relativité restreinte. Dans le cadre de cette théorie, en effet, les lois avaient été formulées indépendamment de tout *référentiel d'inertie*, c'est-à-dire de tout repère en mouvement rectiligne uniforme.

Généralisons, propose Einstein, et admettons qu'il y ait équivalence entre la masse d'inertie et la masse gravitationnelle. On pourra alors imaginer par la pensée l'expérience suivante (appelée

l'expérience de l'« ascenseur d'Einstein¹ ») : un laboratoire serait enfermé dans une boîte se déplaçant dans l'espace vide, et une force constante, perpendiculaire à une face de la boîte, viendrait en accélérer le mouvement. Si vous vous trouvez installé dans ce laboratoire, la boîte, accélérée par l'application de la force, vous apparaîtra comme un référentiel uniformément accéléré, vous aurez l'impression d'être attiré par la face de la boîte perpendiculaire à la force et opposée à cette force; mais rien alors ne vous permettra de dire que vous n'êtes pas en train de tomber sur un astre qui vous attire avec une accélération égale et opposée à l'accélération communiquée à la boîte. Ici, il faut introduire la notion de « champ ». Elle a fait son entrée dans la physique avec les travaux de Michael Faraday et James Clerk Maxwell qui avancèrent le concept de « champ électromagnétique » pour lever la difficulté rencontrée pour expliquer les forces supposées agir entre des charges électriques en mouvement. C'est Hendrik Antoon Lorentz qui tenta le premier de réaliser la synthèse de la mécanique newtonienne et de la théorie du champ de Maxwell. Einstein y parvient au prix d'une remise en cause des fondements de la mécanique classique : la force cède la place au champ régi par des équations différentielles. La théorie de la relativité res-

1. Voir : Jean-Claude Boudenot, *Électromagnétisme et gravitation relativistes*, Paris, Ellipses, 1989.

treinte n'admet d'interaction que sous forme de champs. Elle appelle une théorie du champ de gravitation. Un champ de gravitation communique à tous les corps la même accélération, quelles que soient leurs masses. L'effet de tout champ de gravitation peut donc être remplacé par un changement de référentiel comportant une accélération uniforme. Mais réciproquement tout changement de référentiel de cette sorte peut être remplacé par un champ de gravitation. Il apparaît donc possible de formuler une théorie de la gravitation qui soit invariante par changement de coordonnées impliquant une accélération. Et tel est le cœur de la théorie de la relativité dite « générale ».

Ayons recours à une nouvelle « expérience de pensée » pour préciser la portée immense de cette théorie. Imaginons ainsi un laboratoire en chute libre sur un astre extrêmement massif. Organisons une expérience très simple dans ce laboratoire : nous y ferons se propager, à l'horizontale, un faisceau laser. La situation est donc la suivante : dans le laboratoire, tous les appareils se trouvent en état d'apesanteur puisque la gravitation compense très exactement l'inertie. Plus aucune force ne s'exerce. La théorie de la relativité restreinte s'applique donc dans un référentiel lié au laboratoire ; la lumière s'y propage en ligne droite. Mais tel n'est pas le cas, en revanche, dans un référentiel lié à l'astre : entre le moment où les photons sont partis et le moment où ils sont arri-

vés, le laboratoire est tombé. La lumière a ainsi suivi une trajectoire parabolique. On peut donc dire que « la lumière tombe » ; ce qui ne surprend pas Einstein dès lors qu'il a établi que la lumière porte de l'énergie, et que l'énergie est équivalente à la masse. La masse d'inertie étant équivalente à la masse gravitationnelle, l'énergie de la lumière subit l'attraction gravitationnelle.

Mais, ajoute Einstein, la vitesse de la lumière est une constante universelle, la lumière doit toujours se propager à la même vitesse quel que soit le référentiel. Or, si sa trajectoire est courbe, ainsi que nous le supposons dans l'expérience de pensée que je viens de rappeler, la vitesse de la lumière ne peut pas être invariante ! Einstein résout la difficulté de la façon suivante : non, dit-il, il faut s'en tenir à l'invariance de la vitesse de la lumière ! Ce qui change avec l'altitude, ce n'est pas la vitesse de la lumière, c'est la métrique de l'espace et la métrique du temps (ou encore la métrique de l'espace-temps) : la longueur d'une règle et la marche des horloges dépendent de l'altitude de telle sorte que la vitesse de la lumière n'en dépende pas !

Le raisonnement apparaît aussi limpide qu'audacieux : si la gravitation est équivalente à des forces d'inertie, nous pouvons l'oublier – donc oublier l'astre – et considérer que le seul effet de la présence de l'astre est constitué par une modification de la métrique de l'espace-temps. D'où la formulation géométrique qu'Einstein propose de

la gravitation : il l'assimile à la courbure de l'espace-temps.

C'est alors que resurgit le problème de l'absence d'action instantanée à distance. La courbure de l'espace-temps qui est équivalente à la gravitation est *variable* : on ne peut remplacer un champ de gravitation par des forces d'inertie que *localement*. Il n'y a aucune raison d'extrapoler d'ici à partout, car il y a incompatibilité entre maintenant et partout. Les interactions, les forces exercées par l'intermédiaire des champs, prennent physiquement, réellement, du temps pour se propager. Une illustration célèbre a été donnée de ce fait par Ernst Mach. Si vous tournez sur vous-même, vos bras vont s'écarter ; et si vous tournez ainsi sous un ciel étoilé, vous faites tourner tout le ciel. Vous serez tenté de dire alors, puisque les étoiles tournent, que ce sont elles qui attirent vos bras. Vous êtes alors dans l'erreur, parce que ce n'est pas ce que vous avez fait localement qui a fait réellement tourner les étoiles !

Einstein reprend cette illustration pour établir qu'il est *toujours et partout possible de compenser la gravitation par un changement de référentiel, mais seulement localement*.

Suivons encore un instant Einstein sur la voie qu'il s'est tracée en vue de formuler les lois de la physique de manière totalement invariante par un changement général de coordonnées. Il ne faut pas manquer de souligner ce qui a pu apparaître

aux yeux d'Einstein lui-même comme une véritable surprise. Son ambition constante et affichée était, avons-nous dit, de faire totalement, absolument, abstraction des conditions d'observation. Il y parvient avec la théorie de la relativité générale et, en prime, il découvre une théorie relativiste de la gravitation universelle ! Une approximation de cette théorie, qui prend en compte les deux constantes universelles G et c , consistera par exemple à négliger G : on retrouvera ainsi la relativité restreinte ; une autre approximation consistera à faire tendre c vers l'infini, on obtiendra ainsi la théorie newtonienne de la gravitation. La relativité générale peut être caractérisée comme la théorie dans laquelle G n'est pas nul et c n'est pas infini.

Tournons-nous vers cette « chute de lumière » dont je viens de parler à titre d'expérience de pensée. Le plus extraordinaire, c'est que cette chute ait pu être vérifiée expérimentalement, dès 1919, lors de l'éclipse de Soleil qui s'est produite alors. Des étoiles qui, selon les calculs classiques, auraient dû être occultées par le Soleil, ne l'ont pas été ! La déflexion de la lumière en provenance de ces étoiles par le champ de gravitation du Soleil permet d'expliquer cette observation.

Depuis, on a mis au point des tests de la relativité générale. Par exemple, on peut montrer que le temps ne se déroule pas de la même façon au premier et au dernier étage d'un immeuble, puisqu'il dépend du champ gravitationnel. Bien

entendu, il s'agit d'un effet extrêmement fin – il faut atteindre la quinzième décimale! – mais cet effet est réel, décelable et mesurable. Il serait évidemment beaucoup plus sensible (un facteur deux environ) si l'on pouvait comparer l'écoulement du temps à la surface de la Terre et à la surface d'une étoile à neutrons!

Ainsi la théorie de la relativité générale nous apprend que le temps dépend du champ gravitationnel. Imaginons alors un astre très massif mais très petit, produisant un champ gravitationnel extrêmement intense. Supposons que cette intensité soit telle que la vitesse de la lumière soit inférieure à la vitesse de libération; piégée, la lumière ne pourra donc s'en échapper; l'astre sera ce qu'on appelle un « trou noir ». Un photon émis vers nous par le trou noir « retombe » vers le centre du trou noir qui apparaît comme une singularité dans l'espace-temps, c'est-à-dire un point où les équations de la relativité générale ne peuvent plus s'appliquer. Il y a donc une surface d'espace-temps, que l'on peut désigner comme l'« horizon » du trou noir, sur laquelle la vitesse de la lumière nous semble s'annuler (puisque les photons y rebroussent chemin). Comme, encore une fois, on doit traiter la vitesse de la lumière comme un invariant, comme cette vitesse ne doit pas varier et encore moins s'annuler, il nous faut admettre que, sur l'horizon d'un trou noir, le temps, celui qui est relatif à notre référentiel,

s'arrête ou cesse de s'écouler! Comme la théorie de la relativité générale n'interdit pas l'existence de trous noirs, elle autorise l'existence de tels *horizons où le temps s'arrête*.

La théorie d'Einstein peut être appliquée à l'Univers livré à sa propre gravitation. Einstein lui-même s'y était essayé; comme il voulait un Univers stable, que ses équations n'autorisaient pas, il a rajouté à son modèle une « constante cosmologique » ad hoc, lui permettant de stabiliser son Univers. Par la suite, on a découvert, par l'observation, l'expansion de l'Univers, et l'on a pu lui appliquer la théorie d'Einstein, sans la « constante cosmologique », qu'il a alors qualifiée de « plus grande erreur de sa vie ». C'est ainsi qu'est né le modèle cosmologique du « Big Bang », aujourd'hui devenu le « modèle standard » de la cosmologie. Le plus intéressant dans ce modèle, c'est qu'il comporte une singularité, qui apparaît très analogue à celle qu'on découvre au centre d'un trou noir, à la différence près que, dans le cas d'un trou noir, la singularité se trouve dans le futur de l'horizon, alors que pour le Big Bang elle se trouve dans le passé de l'horizon.

Quoi qu'il en soit, entre une singularité et nous, il y a toujours un horizon. L'univers « gonfle » dans son ensemble, et les galaxies nous fuient d'autant plus vite qu'elles sont lointaines. A une certaine distance, leur vitesse de fuite se trouve égale à celle de la lumière. Cela signifie que la lumière en provenance de ces galaxies ne peut

LES CONSTANTES UNIVERSELLES

pas nous atteindre : une surface d'espace-temps va donc se dessiner où cette vitesse sera en apparence, pour nous, annulée, et donc sur laquelle il faudra encore que le temps s'arrête...

Voilà qui illustrera très bien ce que j'avais : les deux constantes universelles G et c marquent des limites absolues : on ne peut, on ne pourra jamais, définir un même maintenant partout.

II

h ET *k* : LES QUANTA

Les constantes G et c nous permettent de penser notre rapport à l'infiniment grand, c'est-à-dire à l'Univers dans son ensemble. Mais cet Univers se présente à nous comme un gigantesque emboîtement de structures dont les tailles s'étalent sur plus de quarante ordres de grandeur. Si nous nous tournons maintenant vers l'infiniment petit, la question se pose évidemment de déterminer les limites de cet emboîtement. Y a-t-il une limite à la divisibilité de la matière? Antique question que renouvelle la pensée physique contemporaine.

LA THERMODYNAMIQUE STATISTIQUE ET LA CONSTANTE DE BOLTZMANN k

On sait que l'une des plus grandes avancées de la pensée humaine réside dans l'« hypothèse atomique » qui a posé, depuis Leucippe de Milet et Démocrite d'Abdère, au v^e siècle avant J.-C., l'existence d'une telle limite. Les grands travaux du physicien autrichien, Ludwig Boltzmann (1844-1906) s'inscrivent dans le cadre de cette hypothèse et en poussent les conséquences à l'extrême. Une nouvelle constante, dite de Boltzmann, va surgir de l'effort des chercheurs pour appliquer les lois de la mécanique à un très grand nombre d'atomes. Or, ici on découvre que l'énormité du nombre des « degrés de liberté » qui

règnent dans le système considéré, loin d'être comme on pourrait le croire un obstacle à la théorie, ouvre la voie à une remarquable simplification. De façon générale, un degré de liberté peut être défini comme un paramètre dont dépend la capacité de varier d'un système donné. Il peut s'agir aussi bien de la position d'un point sur un axe, d'une coordonnée spatiale, d'un angle définissant une orientation... Un système à zéro degré de liberté serait constitué par un point isolé immobile; cas « idéal » puisqu'un tel objet ne saurait exister concrètement. Un système à un degré de liberté serait un objet ponctuel se déplaçant sur une ligne. Imaginons maintenant un système constitué par un gaz enfermé dans une boîte. Si l'on admet l'hypothèse atomique, on dira que ce gaz est formé par un nombre énorme de molécules. La position de chaque molécule, déterminée par trois coordonnées, représente trois degrés de liberté. On sait que le nombre typique de molécules contenues dans une boîte macroscopique a été donné par le physicien et chimiste turinois Amedeo Avogadro (1776-1856) : il s'élève, pour des conditions normalisées de volume, pression et température, à $6,022 \cdot 10^{23}$. On peut ainsi fixer l'ordre de grandeur du nombre de degrés de liberté que comporte un tel système : il est énorme. Mais ce système, qui dépend d'une quantité si élevée de degrés de liberté, présente néanmoins des propriétés macroscopiques qualitatives compréhensibles et descriptibles.

L'idée majeure de Boltzmann fut de s'inspirer des démarches de la mécanique rationnelle pour rendre compte de ces propriétés. Il eut recours à l'idée d'« espace de phases » : un espace abstrait où un système se trouve représenté par un point. On joue alors sur le nombre de dimensions : il existe dans l'espace de phases autant de dimensions qu'il y a de degrés de liberté dans le système. En réalité, il en existe deux fois plus, parce que l'espace de phases comporte à la fois les degrés de liberté et leurs vitesses, c'est-à-dire les dérivées de ces degrés par rapport au temps. L'idée mise en œuvre par la « mécanique rationnelle », c'est-à-dire par la mécanique telle qu'elle a été mathématisée, comme nous l'avons mentionné plus haut, par Lagrange et Hamilton, a été de remplacer les problèmes posés par la description de l'évolution d'un système par l'étude de la trajectoire d'un point représentant ce système dans cet espace abstrait qu'est l'espace de phases.

On représente donc un système très complexe par un seul point, mais dans un espace qui pourra avoir un nombre énorme de dimensions. En mécanique, on établira ainsi les équations du mouvement de ce point représentatif. Ce mouvement est déterminé par ces équations et par les conditions initiales ou conditions aux limites.

Envisageons maintenant le cas qui nous occupe : celui d'un gaz enfermé dans une boîte, donc d'un système dépendant d'un très grand nombre de degrés de liberté. Il faudra des équations

tions en très grand nombre pour rendre compte de son évolution, mais elles seront fondamentalement de même nature que celles qui régissent l'évolution de n'importe quel autre système mécanique. Toute la difficulté viendra de ce qu'il s'avérera extrêmement difficile de préciser les conditions initiales. On ne résoudra cette difficulté qu'en considérant des régions dans l'espace de phases, puis en employant un raisonnement statistique, probabiliste. On définira ainsi ce qu'on appelle la « densité en phases », c'est-à-dire la probabilité que le point représentatif du système se trouve localisé en un certain point de l'espace de phases avec une certaine précision dans un certain « volume » infinitésimal (comme l'espace de phases a un nombre de dimensions qui n'est pas égal à 3, il s'agit de ce qu'on appelle un « hypervolume »). On obtiendra ainsi toute l'information qu'il est humainement possible d'acquérir sur le système en question. La « densité en phases » représente ainsi la distribution de probabilités dans l'espace de phases.

L'idée se dégage alors grâce à Boltzmann, puis à Willard Gibbs (1839-1903) et à Albert Einstein qu'il suffit d'un petit nombre de quantités physiques, comme l'énergie totale, la température ou la pression, pour caractériser complètement les propriétés macroscopiques du système, alors qu'un nombre inimaginablement grand de configurations microscopiques, que l'on appelle

des « complexions », donnent lieu au même état macroscopique.

Admettons que le nombre des degrés de liberté soit énorme, et qu'on ait affaire à des molécules qui s'agitent dans tous les sens, l'énergie cinétique totale du système va s'annuler; cependant il gardera une énergie interne : la chaleur liée à la température. Toujours est-il qu'en raison même du nombre très élevé de degrés de liberté, des moyennes vont pouvoir être établies. Quelles quantités physiques vont-elles se trouver adaptées à la description de ces systèmes? Au premier chef : l'énergie, puisqu'il s'agit d'un concept qui fonctionne aussi bien au niveau macroscopique qu'au niveau microscopique. Ensuite, on va définir une quantité physique qui permette de rendre compte du nombre de complexions aboutissant au même état macroscopique. Cette quantité, aujourd'hui bien connue, porte le nom d'*entropie*. Il s'agit d'une quantité physique d'un type nouveau car elle ne peut pas s'exprimer à partir des grandeurs physiques fondamentales (la longueur, la durée et la masse). Son contenu dimensionnel se trouve en réalité défini par une énergie divisée par une température; laquelle est une quantité physique qui n'a de sens qu'au niveau macroscopique, et que, pour cette raison, nombre de physiciens refusent de considérer comme une quantité fondamentale. Cette réticence reflète les débats que la notion d'entropie continue à soulever à cause de son

arrière-goût subjectiviste. Comme le contenu dimensionnel de la constante de Boltzmann k est précisément celui d'une entropie (la constante de Boltzmann intervient dans la relation $E = kT$, où E est l'énergie et T la température, sa valeur est $1,380 \cdot 10^{23}$ joule par kelvin), on peut comprendre la réticence qu'ont certains à considérer k comme une constante universelle aussi fondamentale que les autres.

Lorsque Boltzmann intervient, on connaît le second principe de la thermodynamique dit de « Carnot-Clausius ». Ce principe a surgi dans la science comme la traduction d'une impossibilité pratique : celle de construire un moteur thermique de rendement supérieur ou égal à 100 %. Sadi Carnot avait en effet découvert qu'on ne pouvait transformer sans coût énergétique de la chaleur en énergie. Ses *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance* (1824) avancent que, dans tout processus mécanique, se produit une perte d'énergie sous forme de chaleur. Ce principe brise la symétrie temporelle admise par la mécanique classique; il oriente le temps. Le temps a maintenant une flèche, il s'écoule dans la direction de l'accroissement de l'entropie. Ce que Boltzmann réussit à formaliser, à traduire en termes quantitatifs et précis, c'est que cet accroissement inévitable de l'entropie est dû à ce que l'on perd de l'information lorsqu'on décrit un système à l'aide de quantités physiques de nature

macroscopique. Cela s'explique puisqu'il existe, lorsque le nombre de degrés de liberté microscopiques est élevé, un nombre énorme de complexions qui donnent lieu à la même propriété macroscopique et que l'on ne détermine pas. L'entropie apparaît donc comme de l'information perdue.

Mais ce langage « moderne » ne doit pas abuser : l'interprétation informationnelle de l'entropie n'a pu être formulée que longtemps après Boltzmann, dans le cadre d'une théorie qui, au départ, n'avait rien à voir avec la thermodynamique, la théorie de l'information fondée par Claude E. Shannon, ingénieur à la Bell Telephone en 1948. Selon cette célèbre théorie, on peut définir le contenu d'information d'un certain message à l'aide de l'« entropie statistique ». Si l'on veut donner à cette information le contenu dimensionnel de l'entropie définie par les thermodynamiciens, on dira que l'entropie statistique correspond à une certaine probabilité. Mais la probabilité est un nombre sans dimensions ; il faut donc lui adjoindre une constante. Cette constante est la « constante de Boltzmann » k . Autrement dit : si l'on utilise la constante de Boltzmann dans l'énoncé de la loi qui définit l'entropie statistique à partir de la probabilité, alors l'entropie statistique coïncide avec l'entropie de la thermodynamique. Il faut, je le répète, se garder de tout anachronisme : si Boltzmann avait bien l'idée d'une entropie statistique, il ne disposait pas de la théo-

rie de l'information. On voit que l'œuvre de Boltzmann s'est trouvée comme en attente d'une reformulation, qui nous permet aujourd'hui, comme nous le verrons plus bas, d'interpréter sa constante comme un *quantum d'information*.

Retenons seulement pour l'heure qu'à partir de l'hypothèse atomique, on peut rendre compatible la thermodynamique telle qu'elle s'était développée avec Carnot et Clausius avec la mécanique rationnelle, à l'aide du concept d'entropie dont on peut donner une interprétation statistique. Comme autrefois dans son domaine la constante newtonienne, la constante k de Boltzmann apparaît n'avoir dans cette première perspective qu'un contenu utilitaire : elle n'a d'autre fonction que d'assurer cette compatibilité.

LA CONSTANTE DE PLANCK h , LE QUANTUM D'ACTION

On dit souvent que la constante de Planck a fait apparaître du discontinu dans la matière; en quoi elle aurait subitement et durablement dérouté les physiciens. En réalité, le discontinu que découvre le physicien allemand affecte non la matière mais les interactions, les forces. Et voilà la surprise la plus considérable! Car enfin, même si elle suscitait au début de ce siècle encore bien des débats, l'hypothèse atomique, qui n'est rien d'autre que celle de la discontinuité de la matière, ne présentait pas un caractère de nouveauté radicale; elle

était déjà sous-jacente à la thermodynamique, et l'on vient de rappeler comment elle avait déjà guidé bien des physiciens parmi les plus éminents et permis d'obtenir des résultats remarquables.

Mais une discontinuité logée dans ce que nous appelons aujourd'hui les interactions, c'est-à-dire dans les forces, voilà qui apparaissait beaucoup plus difficile à admettre et qui provoqua une véritable « crise » de la pensée physique ! Quelle idée se faisait-on alors en effet de ce qu'est une force ? Une idée, héritée de Newton, selon laquelle on peut toujours faire tendre une force vers zéro ; le caractère continu de la force semblait faire partie de sa définition même. Telle apparaissait, par exemple, la force de gravitation que l'on connaissait fort bien, mais aussi la force électromagnétique que James Clerk Maxwell (1831 - 1879) avait mise en équations en 1865. Voilà donc qu'avec l'Allemand Max Planck, les physiciens se trouvaient contraints de rouvrir des questions qu'on croyait résolues depuis qu'elles avaient opposé au XVII^e siècle Newton, Leibniz et les disciples de Descartes !

Pour mettre en pleine lumière la difficulté de la question – et l'exploit intellectuel qui seul a permis de la lever – exprimons-nous dans le langage employé aujourd'hui par les physiciens. Disons donc qu'on découvrait la nécessité d'introduire le discontinu dans une « interaction ». Il s'agit là non d'un concept, mais de ce que j'appel-

lerais une « catégorie » qui désigne, « à vide », tout ce qui concourt à la formation d'une structure, à son évolution, à sa stabilité ou à sa disparition.

Cette notion est utilisée dans un sens tellement large que si l'on peut dire que tout l'Univers est un emboîtement de structures, on peut dire aussi que tout y est affaire d'interactions. Ainsi le rayonnement électromagnétique relève de la catégorie d'interaction. Et c'est au problème de la thermodynamique du rayonnement que s'est attaqué Max Planck. On sait qu'il a soudain buté sur un problème, une anomalie surprenante : celle que présente le « rayonnement du corps noir ». Selon la physique classique, l'émission et l'absorption de la lumière par la matière s'effectuent de manière absolument continue. La quantité d'énergie lumineuse doit donc s'écouler, tel un fluide, continûment. Or, Planck s'aperçut que le rayonnement émis par une enceinte fermée, capable d'absorber de façon égale toutes les radiations qu'elle qu'en soit la fréquence, lorsqu'on la porte à une certaine température, s'effectue de façon *discontinue*, par valeurs « discrètes », par « quanta ». Une interaction particulière, en l'occurrence un rayonnement, de caractère ondulatoire, s'avérait dotée de propriétés qui semblaient jusque-là réservées aux phénomènes thermodynamiques ! On ne pouvait résoudre cette contradiction qu'en imaginant l'énergie électromagnétique portée par des « grains », de telle façon que l'énergie soit proportionnelle à la fréquence du rayonnement. Tel

s'avère le rôle théorique de la constante formulée par Max Planck : relier énergie et fréquence, selon la célèbre équation : $E = hv$, où E représente l'énergie, v la fréquence et h la « constante de Planck », qui vaut $6,622 \cdot 10^{-34}$ joule seconde.

Il s'agissait d'une révolution si radicale dans la pensée physique que Planck a d'abord reculé devant ses conséquences, et qu'il a fallu toute l'audace du jeune Albert Einstein pour interpréter h comme introduisant du discontinu dans les interactions. De 1900 à 1905, on le voit en effet tenter de traiter le rayonnement électromagnétique comme une *matière* dont la divisibilité aurait des limites. La difficulté qu'il y avait à interpréter mécaniquement la théorie ondulatoire de l'électromagnétisme, il la traite en proposant un calcul statistique du rayonnement. Mais comment appliquer un tel calcul à des ondes ? Cela apparaît tout simplement impossible, sauf si l'on suppose l'existence de « grains » de lumière : les photons.

Ici l'expérimentation prend le relais de la spéculation, et vient en confirmer les conclusions « logiques ». Car, en même temps que les théoriciens butaient sur le rayonnement du corps noir, se posait la question de ce qu'on appelle l'« effet photoélectrique » ; lequel apparaît comme un seuil de fréquence. Un corps photoélectrique émet du courant lorsqu'il est irradié par un rayonnement lumineux ; mais, au-dessous d'une certaine fréquence, on aura beau augmenter l'intensité du

rayonnement, on n'obtiendra aucun courant. Au-dessus de cette fréquence – de ce seuil – ce courant se maintiendra en revanche même lorsqu'on diminuera l'intensité. Einstein avance, le premier en 1905, l'idée que l'énergie du rayonnement électromagnétique est portée par ces grains qu'il appelle « photons » et que la relation $E = h\nu$ relie la fréquence à l'énergie. Le seuil de fréquence correspond alors à un seuil d'énergie : pour que les photons puissent produire un courant en arrachant des électrons, il faut que leur énergie soit suffisante. A cet « effet », il faut en ajouter un autre non moins célèbre : l'« effet Compton », du nom du physicien américain Arthur Holly Compton (1892-1962) qui le mit en évidence une vingtaine d'années plus tard : cet « effet » montre qu'un électron recule lorsqu'il subit le choc d'un photon, et que ce recul obéit aux lois de la mécanique, ce qui prouve que l'on a affaire à une collision entre un électron et une vraie particule. La réalité du photon s'avérait désormais ainsi incontestable, dès lors qu'on pouvait en quelque manière l'observer, même si cette observation n'était pas directe.

Toujours est-il qu'on découvrait en quelques années d'une histoire haletante, au début de ce siècle, que dans toute interaction il y a échange, et, de plus, qu'il existe un échange minimum au-dessous duquel il n'y a plus d'interaction ; ou, pour dire les choses autrement, on avançait vers l'idée

qu'il n'existe pas d'interaction entre deux structures ou deux systèmes, s'ils ne s'échangent pas quelque chose; qu'il existe un plus petit « quelque chose », un *quantum d'interaction* qui doit s'échanger pour que l'on puisse parler d'interaction.

Imaginons donc que nous disposions d'un appareil qui nous permettrait de « voir » – observer et expérimenter – des atomes. Voilà qui n'apparaît plus aujourd'hui comme ce qu'Einstein appelait une simple « expérience de pensée » : nous disposons de « détecteurs », au sens où l'on en parle, par exemple, à propos d'un compteur Geiger, du nom du physicien allemand Hans Geiger qui l'a inventé en 1912. Un détecteur d'atomes se présentera comme un appareil dont au moins une des parties est en état d'équilibre hyperinstable, tellement instable que la perturbation d'un seul de ses atomes suffira à la destabiliser; il sera donc capable de transformer cette perturbation « microscopique » en un signal macroscopique. Un très bel exemple en est ce qu'on appelle une « chambre de Wilson », du nom du physicien écossais Charles Thomson Rees Wilson (1869-1959) qui l'a inventée. Les lecteurs français pourront en voir un exemplaire au Palais de la Découverte : ils y verront le « tracé » des particules... Ils admireront l'extrême ingéniosité du dispositif et son admirable simplicité. Dans une vapeur qui se trouve presque à la limite de la condensation, des particules chargées électrique-

ment se déplacent, elles ionisent les atomes tout le long de leur passage; si bien qu'au voisinage de ces atomes ainsi ionisés le liquide commence à se condenser; de petites gouttelettes se forment qui matérialisent la trace des particules et offrent un spectacle de toute beauté!

Supposons donc qu'un appareil de ce type ait permis d'observer un atome et ait donc produit un effet macroscopique, réponse à une perturbation microscopique. Comment interpréter cette réponse? En toute cohérence avec l'hypothèse atomique, cet instrument se trouve lui-même constitué d'atomes. Pour qu'il fournisse une réponse macroscopique, il faut qu'au moins un de ces atomes ait reçu un signal de l'objet étudié, disons de l'atome émetteur – celui que l'on désignera comme l'« objet ». Admettons que le détecteur soit suffisamment efficace, précis et délicat, pour que le processus d'amplification du signal conduisant à sa « traduction » macroscopique s'effectue sans perturber davantage l'atome émetteur, il n'en reste pas moins qu'un signal a dû être émis, reçu puis amplifié pour devenir macroscopique. Mais ce n'est pas une raison pour croire que le signal ait été, à l'échelle des atomes, marginal ou insignifiant. Au contraire, l'atome émetteur ne va pas se retrouver, après avoir émis son signal, dans l'état où il était avant cette émission. Autrement dit, pour obtenir un résultat de mesure, il faut établir un couplage minimal entre l'objet et

l'appareil, un couplage non marginal à l'échelle des atomes qui perturbe donc inévitablement et irrémédiablement l'objet. On ne peut faire tendre vers zéro cette perturbation, et continuer à obtenir un résultat de mesure ! Le physicien peut donc faire apparaître le quantum d'interaction dans un acte pratique essentiel à l'activité scientifique : l'acte expérimental. On peut même aller plus loin et affirmer qu'une expérimentation n'est jamais qu'une interaction, et qu'il existe toujours un « couplage » minimum entre l'objet et l'appareil ; ce que l'idéal « classique » de la science avait par trop oublié ou délibérément « négligé ».

Peut-on donner une détermination quantitative d'une telle notion ? On le peut, si l'on se réfère à un concept qui s'est révélé d'une grande utilité aussi bien en mécanique des systèmes dotés de petits nombres de degrés de liberté qu'en thermodynamique : le concept d'« action ». L'action se définit comme le produit d'une énergie par une durée ; et, en fait, toutes les lois de la mécanique classique peuvent s'expliquer par le principe dit « de moindre action » avancé, pour la première fois, en optique, par le mathématicien français Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759). « Dans tout changement qui arrive, la quantité d'action nécessaire pour ce changement est la plus petite qu'il soit possible », écrivait Maupertuis en 1746 après avoir défini l'action deux ans

plus tôt comme « le produit de la masse par l'espace parcouru et la vitesse ».

Pour comprendre l'importance de ce principe en termes contemporains, il faut se reporter à la notion d'« espace de phases » : la trajectoire d'un point représentatif d'un système dans un tel espace a la propriété de minimiser une quantité qui a le contenu dimensionnel d'une action, appelée l'intégrale d'action. Il est possible de montrer que ce principe de moindre action est rigoureusement équivalent aux équations de Lagrange et Hamilton de la mécanique rationnelle. Remarquons que l'action se distingue de la puissance. La puissance se présente comme de l'énergie divisée par un temps; l'action comme de l'énergie que multiplie un temps. Le lecteur vérifie par lui-même tous les jours, pour peu qu'il ait à transporter une charge un peu lourde sur une certaine distance, que le produit d'une masse par une vitesse et une longueur est bien homogène à une énergie que multiplie un temps! Maupertuis utilisait volontiers un vocabulaire emprunté à l'économie. On le peut encore aujourd'hui en disant que l'action se définit par un temps de travail. Un temps de travail, c'est-à-dire une énergie, un travail, que multiplie un temps.

Revenons donc au couplage entre notre « détecteur » et l'objet microscopique qu'il nous permet d'observer. On peut mesurer la perturbation apportée à l'objet à l'aide d'une énergie. Appelons ΔE l'énergie qu'il aura été nécessaire

de fournir à l'atome émetteur pour obtenir le résultat de la mesure. ΔE peut être positif ou négatif. La question se pose de savoir si l'on peut faire tendre ΔE vers zéro tout en continuant à obtenir un résultat. Sans doute, mais à condition de faire une expérience durant un temps infini! L'action ΔA , produit de la valeur absolue de la perturbation énergétique ΔE par la durée ΔT de l'expérience, ne peut être rendue arbitrairement petite. Disons que le temps de travail nécessaire à l'obtention de la réponse ne peut être réduit à zéro. Interprétons cette impossibilité : il doit exister une action qui représente une borne inférieure de toute action dans tout l'Univers, un peu comme l'absence d'interaction instantanée traduit l'existence d'une borne supérieure à toute vitesse (la vitesse de la lumière). Voilà ce qu'on appelle le « quantum d'action », égal à la constante h découverte par Planck¹. Ce quantum est inscrit dans ce qu'on désigne comme la première inégalité de Heisenberg ($\Delta A = \Delta E \Delta T \geq h$) qui traduit l'existence d'un couplage inévitable entre l'objet et l'appareil de mesure.

Cette formulation m'a été suggérée aussi bien par les travaux du physicien soviétique Lev Landau que par les réflexions de Niels Bohr dans les nombreux textes qu'il a consacrés à la théorie des quanta qu'il a si puissamment contribué à

1. Comme une fréquence est l'inverse d'un temps, la relation $E = h\nu$ implique que h a le contenu dimensionnel d'une action.

mettre sur pied; je l'ai moi-même développée avec Michel Spiro dans *La Matière-Espace-Temps* et avec Jean Pierre Baton dans *L'Horizon des particules*. Il importe de souligner ses conséquences épistémologiques. Puisqu'en effet il existe un tel quantum d'interaction, il se trouve présent dans toutes les interactions expérimentales : on ne peut plus donc admettre de faire abstraction des conditions de l'observation. Un des grands dogmes de la physique classique s'écroule; ce dogme qui voulait qu'il n'y ait pas de « sujet » de la connaissance scientifique, comme continuent à le soutenir certains physiciens.

A la vérité, les classiques contrevenaient à ce dogme dans leur pratique même. Et Einstein à qui l'on a voulu obstinément le faire endosser n'y soumettait pas du tout sa pensée. Il avait certes l'ambition déclarée et répétée d'arriver à une description entièrement intrinsèque de la réalité; mais, comme on l'a vu, il a bien dû, pratiquement, y renoncer lorsqu'il a constaté, dans sa théorie de la relativité générale, que si l'on peut trouver un référentiel qui compense exactement la gravitation, ce ne peut être que localement.

Aujourd'hui, en tous les cas, on ne peut plus faire mine de faire abstraction, en physique, des conditions de l'observation. Telle était bien l'opinion de Bohr qui disait : avec la nouvelle physique, on ne peut plus prétendre décrire la réalité elle-même, directement; les physiciens décrivent ce qu'il propose d'appeler un *phénomène*, un élé-

ment ou un moment de la réalité, placé dans des conditions d'observation aussi bien définies que possible. Cette position, mûrement réfléchie et prudemment exprimée, ne revient pas du tout à nier l'existence d'une réalité indépendante de l'observation comme bien des philosophes pressés ont voulu le comprendre.

La thèse de Bohr, à laquelle j'adhère pleinement, laisse ainsi la méthodologie de la mécanique quantique entièrement ouverte. Si l'on tient compte désormais des conditions de l'observation, on pourra en effet faire varier de façon maîtrisée ces conditions pour affiner la représentation de la réalité. Il n'en reste pas moins que la prise en compte des conditions de l'observation dans le formalisme même de la physique a nécessité un travail considérable, des débats et controverses qui ne sont pas encore, presque cent ans après la découverte de Planck, complètement apaisés.

La difficulté de cette prise en compte tient à ce qu'elle ne doit pas entraver la maniabilité des concepts physiques : il est évident que si un concept, censé décrire, par exemple, le comportement d'une particule élémentaire, devait contenir des références *explicites* au dispositif expérimental qui sert à l'observer, le concept serait totalement inutilisable. L'extraordinaire efficacité du formalisme quantique tient au fait que la référence aux conditions d'observation est maintenue *implicite* et qu'elle n'entrave en aucune façon l'utilisation des concepts.

Les concepts quantiques, avons-nous dit, sont relatifs aux « phénomènes », si l'on entend par ce mot la réalité « en situation ». Mais les conditions d'observation font corps avec des appareils macroscopiques qui comportent des nombres énormes d'atomes et de particules de la même taille que l'objet qu'il s'agit de décrire. En conséquence de quoi, lesdites « conditions d'observation » ne peuvent être mieux déterminées que *statistiquement*. L'idée proprement « géniale » consiste alors à renoncer, pour la description de la réalité microphysique, à la prédictibilité dite « déterministe » de la physique classique, au profit d'une *prédictibilité probabiliste*.

Cette innovation radicale a suscité (et continue de susciter) des incompréhensions, voire des résistances acharnées. Pourtant, elle ne fait que traduire le fait que *des concepts déterministes ne seraient pas crédibles*, du moment que les conditions de l'observation, que l'existence du quantum d'action nous contraint à prendre en compte, ne peuvent pas être mieux déterminées que statistiquement. De toute façon, comme le dit Léon Rosenfeld ¹, le recours aux probabilités n'implique en rien un quelconque renoncement à l'objectivité scientifique : « Probabilité ne veut pas dire hasard sans règle, mais juste l'inverse : ce qu'il y a de réglé dans le hasard. Une loi statistique est avant

1. A. George, *Louis de Broglie, physicien et penseur*, Paris, Albin Michel, 1953, p. 58.

tout une loi, l'expression d'une régularité, un instrument de prévision. »

*LA CONSTANTE DE BOLTZMANN
COMME UN QUANTUM D'INFORMATION*

On ne peut lever ces difficultés, me semble-t-il, qu'en invoquant la constante *k* de Boltzmann qui se trouve nécessairement quoique implicitement incluse dans la détermination des conditions de l'observation. Le physicien français Léon Brillouin (1889-1969) a ici ouvert la voie en proposant une interprétation de la constante de Boltzmann comme « quantum d'information » ; mais il n'a pu le faire que grâce aux développements de la théorie quantique. Sa démarche a consisté à exorciser le « démon de Maxwell ». Concrètement, il s'en est pris à cette allégorie qui prétendait montrer que le second principe de la thermodynamique n'a aucun contenu objectif et n'exprime qu'une limitation, qui ne serait pas de principe, de nos moyens de connaissance. Maxwell imaginait une enceinte fermée contenant un gaz en équilibre thermique. Cette enceinte, il la supposait divisée par un mur pourvu d'un petit trou. Imaginez, disait-il, dans cette enceinte la présence d'un démon qui s'y déplace et sait le moyen d'ouvrir et de fermer le petit trou sans dépense d'énergie. Chaque fois qu'il verra une molécule rapide, il la fera passer dans la partie gauche ; lorsqu'une molécule lente se présentera, il la réservera à la

partie droite. Au bout d'un certain temps, le démon aura ainsi créé entre les deux parties de l'enceinte une différence de température. Il pourra donc en extraire une énergie mécanique.

Brillouin intervient pour dire : si ce supposé démon ne fait rien, il ne peut pas voir les molécules. Ce que Maxwell ne pouvait savoir, la théorie du rayonnement du corps noir l'a établi depuis : dans l'enceinte, on ne peut pas voir les molécules parce que l'on est aveuglé par le rayonnement. Mais, ajoute Brillouin, accordons à Maxwell le bénéfice de son ignorance historiquement inévitable et essayons de pousser plus loin son idée ; pour permettre à son démon de voir les molécules une à une, voici donc qu'il l'équipe d'une torche électrique ! Brillouin montre que le démon va alors buter sur le quantum d'action : il ne pourra pas voir une molécule sans modifier son énergie et donc sans agir sur la totalité du système. Si donc il est vrai qu'il pourra gagner de l'information sur une molécule, il va accroître l'entropie du reste. Or, l'entropie équivaut à de l'information perdue ; on dira aussi que l'information consiste en « néguentropie » (rappelons qu'entropie et information ont même contenu dimensionnel). Ainsi, en voulant faire baisser l'entropie par la mesure de la position d'une molécule, le démon, pris au piège, crée de l'entropie ! Et même, lorsque l'information est égale à k (ou plus exactement, comme le montre Brillouin dans une analyse plus précise, à k multipliée par le

logarithme de 2), le démon crée plus d'entropie qu'il ne gagne d'information! Bien que Brillouin ne prononce jamais le terme, il interprète donc la constante de Boltzmann comme un *quantum d'information*. Il s'agit bien de la plus petite quantité d'information attachée à un degré de liberté microscopique; bref, une quantité en dessous de laquelle il n'y a pas d'information, une quantité d'information que l'on perd irrémédiablement et qui devient un quantum d'entropie si on ne détermine pas ce degré de liberté.

En quoi l'existence d'un tel quantum d'entropie donne-t-elle au second principe un caractère fondamental? C'est, me semble-t-il, dans la relation subtile qui s'établit entre le quantum d'entropie et le quantum d'action. Le quantum d'action apparaît comme le *coût du quantum d'information*, ce qui, d'ailleurs, est compatible avec l'interprétation « économiste » que nous avons donnée plus haut au concept d'action. Rappelons-nous l'argumentation présentée plus haut pour introduire le quantum d'action : pour que le détecteur donne une réponse macroscopique, il faut qu'au moins l'un de ses atomes ait reçu, en provenance de l'objet, un certain signal. Le contenu d'information de ce signal est un quantum d'information. Le coût de ce quantum d'information est le quantum d'action. Le second principe de la thermodynamique, qui interdit de pouvoir réaliser des machines thermiques de rendement strictement égal à 100 %, de réaliser des moteurs sans friction

et à mouvement perpétuel, traduit l'existence de ce quantum de coût. En effet, d'après l'hypothèse atomique, tout système macroscopique comporte un très grand nombre de degrés de liberté, et l'élimination de toute friction, qui supposerait de distinguer une à une toutes les complexions qui sont en nombre inimaginablement grand, aurait un coût quasiment infini.

Mais Brillouin fait remarquer que si, pour exorciser le démon de Maxwell, il a dû faire appel au quantum d'action, dans l'expression du quantum d'information, la constante de Planck n'y apparaît pas explicitement.

Ainsi voyons-nous la subtile dialectique de h et de k . La théorie quantique des systèmes à petit nombre de degrés de liberté consiste à prendre en compte la constante universelle h . Cette prise en compte suppose celle des conditions de l'observation avec des éventuels appareils macroscopiques. Mais l'existence du quantum d'entropie implique que ces conditions d'observation ne peuvent pas, par principe, être mieux prises en compte que statistiquement. On tourne la difficulté en ayant la prudence de reconnaître que la prédictibilité des concepts quantiques, même quand ils sont relatifs à des systèmes à petit nombre de degrés de liberté, ne peut être que probabiliste. Pour fonder le formalisme quantique on a donc eu besoin de k , même si cette constante n'est présente qu'*implicitement*. Réciproquement, nous venons de voir que pour donner un contenu fondamental au

second principe de la thermodynamique, on a besoin du quantum d'action, même si la constante de Planck disparaît du formalisme; la théorie quantique n'est qu'*implicitement* sous-jacente à une formalisation rigoureuse de la thermodynamique statistique, mais elle lui est absolument nécessaire. En fait, le « troisième principe » de la thermodynamique, qui fixe à zéro l'entropie d'un système à température absolue égale à zéro, est strictement d'origine quantique.

Avec Jean Pierre Baton, nous avons émis l'hypothèse, dans *L'Horizon des Particules*, que la relation entre les deux constantes universelles h et k pourrait s'exprimer à l'aide d'une nouvelle constante égale au rapport des deux, que nous proposons d'appeler b en hommage à Brillouin : $b = h/k$. Cette constante aurait le contenu dimensionnel d'une température multipliée par un temps. Une telle quantité physique exprimerait le coût en action de l'information. Mais si action et information ont toutes les deux un quantum, b serait alors un véritable *quantum de coût*. Une physique dans laquelle existerait un tel quantum de coût serait nécessairement probabiliste : en effet une précision infinie, nécessaire à une prédictibilité déterministe, y serait impossible, car infiniment coûteuse. Cette caractérisation s'appliquerait, comme nous venons de le voir, à la thermodynamique statistique et à la mécanique quantique, qui tiennent compte, même si ce n'est qu'*implicitement* pour l'une ou l'autre, des deux

constantes h et k , et évidemment de leur rapport. Mais cette caractérisation pourrait aussi s'appliquer à la description des processus chaotiques que l'on a découverts dans la dynamique de systèmes non quantiques et non thermodynamiques, car macroscopiques et ne dépendant que d'un petit nombre de degrés de liberté : pendules couplés et entretenus, etc. L'évolution de ces systèmes est chaotique car elle est *sensible aux conditions initiales* : si proches soient-elles, des conditions initiales non strictement identiques conduisent à des évolutions qui divergent inévitablement. L'évolution ne peut donc être prédite, pendant une durée infinie, qu'au prix d'une précision infinie dans la détermination des conditions initiales. Mais le quantum de coût rend cette précision infinie impossible. Il est intéressant de noter qu'une telle physique chaotique s'obtiendrait à la limite où h et k tendent vers zéro (une limite qui n'est ni quantique, ni thermodynamique) mais avec un quotient b fini.

Ainsi voyons-nous se dégager la signification des deux constantes h et k . Toutes les deux témoignent d'une limitation de principe de la connaissance humaine : *toute connaissance a un coût*. Le temps pendant lequel il est possible de prédire l'évolution d'un système s'avère nécessairement limité. Se trouve ainsi exorcisé un autre « démon », celui de Laplace qui, connaissant à un moment donné la position et la vitesse de toutes

les particules de l'Univers, était supposé capable de prédire *toute* son évolution subséquente. Les physiciens contemporains ont détrôné cette « intelligence » souveraine qu'évoque le début de l'*Essai philosophique sur les probabilités* où l'on a voulu lire le premier énoncé de la vision « déterministe » de la science. Les constantes universelles h et k délimitent un horizon temporel, elles traduisent l'incompatibilité d'*ici* et *toujours*.

On aura noté que la présentation que nous avons faite, jusqu'à présent, des quatre constantes universelles est essentiellement négative. Ces constantes traduisent des limitations de principe de la connaissance humaine, des impossibilités d'extrapoler d'*ici* et maintenant à partout et toujours. Cela signifierait-il que toute science est désormais impossible ? La vivacité des débats qui traversent la physique depuis le début du xx^e siècle montre que la question a été prise au sérieux, et qu'il ne va pas de soi d'y répondre par la négative. La révolution des quanta a permis d'opérer un formidable retournement que nous allons maintenant décrire : les limitations de principe de la connaissance sont, grâce à elle, devenues des points d'appui pour de nouvelles avancées scientifiques.

*LES AMPLITUDES DE PROBABILITÉ
ET LA COMPLÉMENTARITÉ ONDE-CORPUSCULE*

Nous avons déjà évoqué le principe de ce retournement : puisqu'on ne peut plus faire abstraction des conditions de l'observation, il convient de les inclure dans le contenu même des concepts. Tout le problème sera que cette prise en compte ne nuise pas à la maniabilité des concepts.

Il me semble possible, sans trahir en quoi que ce soit la pensée de Niels Bohr (1885-1962), de formuler dans des termes nouveaux l'exigence de la prise en compte des conditions de l'observation qu'il incluait dans la notion de *phénomène*. Je propose d'utiliser la notion d'*horizon* qui partage avec le phénomène de Bohr la propriété d'unir « subjectif » et « objectif ». Un horizon est objectif, puisque s'il n'y avait pas de monde il n'y aurait évidemment pas d'horizon ; mais il est aussi subjectif, puisqu'il dépend de la position de l'observateur dont il est l'horizon. La ligne d'horizon sépare le monde en deux parties : celle qui se trouve du côté de l'observateur, nous pouvons l'appeler le « monde propre de l'observateur », ou domaine de *l'actualité*, celle qui est au-delà de ce monde propre, ou domaine de la *potentialité*. La ligne d'horizon apparaît fictive, virtuelle, immatérielle ; elle n'existe que par rapport à l'observateur. Elle est inaccessible, car elle fuit toujours ;

elle est mobile, et son mouvement obéit à celui de l'observateur. *Elle peut se déplacer à la vitesse de la lumière ou au prix d'un simple quantum d'action.* Pourtant nous disposons à propos de la ligne d'horizon d'une certitude : nous savons que *c'est bien sur le monde que nous la traçons.* Or c'est précisément sur cette certitude que s'appuie le retournement fondamental opéré par la théorie quantique : le monde réel est maintenant pensé comme *le lieu de toutes les lignes d'horizon possibles*; la théorie quantique s'avère ainsi être la théorie du mouvement des lignes d'horizon. Je qualifierai d'« horizontaux » les concepts quantiques pour signifier qu'ils décrivent non pas le « monde réel » au sens où l'on entend d'ordinaire cette expression conformément à une longue tradition philosophique qui « chosifie » ou « substantialise » le réel, mais ses lignes d'horizon.

On a vu que la théorie quantique a dû renoncer à la prédictibilité déterministe, au profit d'une prédictibilité probabiliste. Mais la prise en compte du quantum d'action n'a pu se satisfaire de la théorie classique des probabilités; il a fallu construire un concept probabiliste horizontal. Tel se présente le concept d'*amplitude de probabilité*. Il s'agit d'un « nombre complexe », qui comporte dans sa définition une partie réelle et une partie imaginaire, ou qui est défini par un module et une phase, dont le carré du module (ou bien la somme des carrés de la partie réelle et de la partie imaginaire) est une probabilité (c'est-à-dire un nombre

réel, positif et inférieur à 1). Pour dire les choses autrement, une amplitude de probabilité est la « racine carrée complexe » d'une probabilité. Elle réalise donc l'unité d'une *actualité* et d'une *potentialité* : le pôle actuel est situé dans le module, directement lié à la probabilité, qui est mesurable à l'aide d'expériences répétables, et le pôle potentiel est dans la phase, laquelle n'est pas mesurable, mais permet de faire correspondre à une probabilité donnée toute une classe d'amplitudes, potentiellement équivalentes, ne différant que par leurs phases.

L'horizon dont les amplitudes de probabilité décrivent les lignes est celui de la *discernabilité quantique*. Deux états d'un système, ou deux voies de transition, sont dites quantiquement indiscernables, si, pour les distinguer, il en coûte au moins un quantum d'action. L'essentiel du formalisme de la théorie quantique consiste en un mode d'emploi strict des amplitudes de probabilité. La règle d'or qui le résume peut être énoncée comme suit : dans le domaine de l'indiscernabilité, les amplitudes de probabilité sont additionnées comme des nombres complexes (somme algébrique des parties réelles et des parties imaginaires), dans le domaine de la discernabilité, ce sont les probabilités que l'on ajoute.

La règle d'additivité complexe des amplitudes de probabilité dans le domaine de l'indiscernabilité permet au nouveau formalisme de s'adapter à la dualité onde-corpuscule qui est l'une des

caractéristiques les plus déroutantes de l'univers quantique.

Nous avons vu que, classiquement, l'interaction électromagnétique est décrite à l'aide des équations de Maxwell qui régissent une dynamique ondulatoire. Or les descriptions du rayonnement du corps noir, de l'effet photo-électrique et de l'effet Compton requièrent une représentation *corpusculaire* de l'interaction électromagnétique. L'idée majeure de Niels Bohr et de l'École de Copenhague est celle de la *complémentarité* des points de vues ondulatoire et corpusculaire : c'est une même réalité quantique qui, selon les conditions de l'observation (encore elles!), révèle à l'observateur des aspects ondulatoires ou corpusculaires. Cette complémentarité soulève des paradoxes extrêmement troublants. Considérons, par exemple, l'expérience classique des trous d'Young¹ qui fait apparaître des *interférences*, c'est-à-dire un effet spécifique de la dynamique ondulatoire : il est bien connu en effet que les ondes de champ électromagnétique peuvent interférer, c'est-à-dire donner sur l'écran une alternance de zones sombres et éclairées. Mais si l'interaction électromagnétique exige une interprétation corpusculaire, comment établir une compatibilité entre cette interprétation et les effets d'interférences? Si on assimile le rayonne-

1. On intercale, entre une source lumineuse ponctuelle et un écran, un masque percé de deux trous.

ment électromagnétique à un flux de photons, comment ces photons peuvent-ils interférer à la manière d'ondes?! Si l'onde électromagnétique peut être partagée en deux parties qui passent chacune par un trou, puis interfèrent, les photons étant insécables doivent passer chacun soit par un trou, soit par l'autre. Ils ne peuvent pas interférer!

Mais justement les amplitudes de probabilité peuvent interférer. Quantiquement, les voies de passage d'un photon par l'un ou l'autre des deux trous sont des voies *indiscernables*, au sens que nous venons de rappeler, parce que pour savoir par quel trou est passé un photon, il faudrait faire une expérience qui coûterait au moins un quantum d'action. Les deux voies étant ainsi indiscernables, les amplitudes de probabilité qui leur correspondent doivent être additionnées comme des nombres complexes pour donner l'amplitude totale de probabilité d'impact d'un photon sur un point de l'écran. Comme des nombres complexes peuvent « interférer » constructivement ou destructivement, on peut donc découvrir sur l'écran une alternance de zones de grande et de petite probabilité d'impacts de photons, c'est-à-dire de grand et de petit éclaircissement.

Mais les amplitudes de probabilité peuvent aussi servir à étudier les voies discernables. Une expérience permet de le confirmer. On peut en effet imaginer et construire des dispositifs pour déceler par quel trou passent les photons, en ne comptant les impacts de photons que si l'on sait

par quel trou ils sont passés. Et l'on découvre alors que les interférences disparaissent! Cette disparition signifie que, pour des voies discernables, il faut ajouter les probabilités, sans possibilités d'interférences.

BOSONS ET FERMIONS

Louis de Broglie (1892-1987) a été encore plus loin sur la voie de la complémentarité quantique des dynamiques corpusculaire et ondulatoire. Puisque, dit-il, des phénomènes classiquement ondulatoires ont une représentation corpusculaire dans le domaine quantique, pourquoi ne pas rechercher, pour des phénomènes classiquement corpusculaires, une représentation qui s'avérerait ondulatoire dans le domaine quantique? C'est ainsi qu'il propose d'associer à un flux d'électrons un faisceau d'ondes. Les caractéristiques cinématiques des particules, l'énergie E et l'impulsion (ou quantité de mouvement) p , sont reliées à celles des ondes, la fréquence ν et la longueur d'onde λ , par les équations d'Einstein $E = h\nu$ et de De Broglie $p = h/(2\pi\lambda)$, où h est la constante de Planck. Le formalisme des amplitudes de probabilité, décrit ci-dessus, permet de donner une forme quantitative à cette association. Ainsi, le raisonnement que nous avons esquissé à propos de la représentation de l'expérience d'Young en termes de photons peut se reprendre mot pour mot pour une « expérience d'Young avec élec-

trons ». On a maintenant pu réaliser de telles expériences; elles valident pleinement la généralisation de la complémentarité onde-corpuscule opérée par de Broglie.

On commence à entrevoir comment une certaine lucidité à propos des limitations qui affectent, par principe, la connaissance, permet sans aucun paradoxe d'affiner la connaissance que nous prenons du réel. Pour penser l'au-delà de l'horizon de discernabilité, on a forgé le concept d'amplitude de probabilité. A l'aide de ce concept, les physiciens peuvent, sans éliminer cet horizon, le faire bouger, et donc découvrir des propriétés insoupçonnées du monde réel : par exemple, des aspects corpusculaires dans les interactions ou des aspects ondulatoires dans la matière; ils enrichissent et précisent ainsi leur représentation de ce monde réel, puisqu'ils disposent désormais de deux représentations qui, chacune, unifient la matière et les interactions, les représentations ondulatoire et corpusculaire.

Mais s'il est vrai qu'existe une représentation corpusculaire des interactions, on a toutes les raisons de penser aussi que les particules d'interaction ne sont pas complètement identiques aux particules de matière. On cherchera donc un critère qui permette de faire la distinction entre une particule associée à une interaction et une particule associée à la matière. Le formalisme des amplitudes de probabilité nous fournit un tel critère; grâce à lui on distingue les « bosons » des

« fermions ». On appelle « bosons » les particules d'interaction; elles obéissent à la statistique dite de Bose et Einstein. Un nombre arbitraire d'entre elles peuvent se trouver rigoureusement dans le même état quantique. En revanche les « fermions », particules de matière, obéissent à la statistique dite de Fermi et Dirac. Leur comportement est tel qu'il ne peut y en avoir qu'une seule dans un état quantique donné. Elles sont régies par le « principe d'exclusion » de Pauli. Ce principe reprend en un sens, mais sous une forme toute nouvelle, l'idée classique, et même antique, selon laquelle les particules de matière sont impénétrables; il fournit une explication satisfaisante du fait que la matière ne s'effondre pas sur elle-même sous l'effet de la gravitation. Les ondes d'interaction quant à elles sont superposables. Cette caractéristique est parfaitement classique, elle se traduit quantiquement dans le fait qu'on peut empiler autant de particules d'interaction que l'on veut lorsqu'elles sont dans le même état; et il faut noter que plus grand se trouve être le nombre de bosons dans le même état, plus forte est la probabilité de l'état. On peut dire, dans un langage imagé, que si les fermions sont « individualistes », les bosons présentent un comportement « grégaire ». Les « lasers » bien connus du grand public aujourd'hui utilisent cette « grégarité » pour produire de la lumière très cohérente.

Mais nous n'avons pas encore envisagé qu'on puisse prendre en compte simultanément et *expli-*

citement les deux constantes universelles h et k . C'est ce que fait aussi la physique actuelle : traiter en même temps h et k , en les coordonnant rationnellement, c'est faire ce que l'on appelle de la « statistique quantique » ; on délimite ainsi le domaine et les objectifs d'un domaine de la physique où l'on s'intéresse à des systèmes dotés d'un grand nombre de degrés de liberté et dans lesquels il existe des effets quantiques. Ces recherches donnent des résultats extrêmement spectaculaires et très riches d'implications technologiques : physique des très basses températures, de la superfluidité, de la supraconductivité, etc.

La théorie quantique est probablement l'une des caractéristiques les plus marquantes de la pensée théorique du xx^e siècle. Pour essayer de faire apprécier son contenu, sans trop entrer dans des développements techniques inévitablement ésotériques, je me suis appuyé systématiquement sur l'idée d'horizon, que je n'ai utilisée ni comme une simple métaphore ni comme un concept scientifique à proprement parler, mais comme un « paradigme ». Or il semble bien, comme en témoignent les trois textes qui suivent, que ce paradigme puisse jouer un rôle décisif aussi bien dans la philosophie que dans la poésie du xx^e siècle.

Ainsi, dans *La Géométrie et le problème de l'espace*, qui est l'une de ses œuvres majeures, le

philosophe suisse d'expression française, Ferdinand Gonseth, écrit, à la suite d'un développement sur l'articulation entre intuition, axiomatisation et expérience dans la géométrie moderne : « Les résultats précédents ont une valeur qui dépasse le cadre de la géométrie. Ils concernent l'ensemble de la connaissance, nous voulons dire l'état dans lequel toute connaissance se présente à nous, à un instant déterminé : rien ne nous autorise à penser que notre connaissance, même à ses dernières frontières, soit davantage qu'un *horizon de connaissance*; que les dernières *réalités* que nous avons conçues soient davantage qu'un *horizon de réalité* ¹. »

Pour sa part, Maurice Merleau-Ponty, l'un des représentants les plus éminents de la *phénoménologie*, un courant majeur de la philosophie du ^{xx}e siècle, écrit : « C'est dans l'épreuve que je fais d'un corps explorateur voué aux choses et au monde, d'un sensible qui m'investit jusqu'au plus individuel de moi-même et m'attire aussitôt de la qualité à l'espace, de l'espace à la chose et de la chose à l'horizon des choses, c'est-à-dire à un monde déjà là, que se noue ma relation avec l'être ². »

Le livre de Michel Collot, *La Poésie*

1. Ferdinand Gonseth, *La Géométrie et le problème de l'espace*, Neuchâtel, Éd. Le Griffon, 1945/1955, p. 310.

2. Maurice Merleau-Ponty, rapport sur ses travaux présenté au Collège de France en 1951, citation, en quatrième de couverture de *Phénoménologie de la perception*, Paris, Gallimard, coll. Tel.

moderne et la structure d'horizon, rejoint ces préoccupations philosophiques. Il m'a amené à approfondir en retour ma réflexion sur l'horizon. J'ai pu y lire ceci : « La réalité à laquelle renvoie le poème n'est pas celle de l'univers objectif que s'efforcent de constituer les sciences, mais celle du monde perçu et vécu. Or celui-ci ne se donne jamais que comme *horizon*, c'est-à-dire selon le point de vue particulier d'un sujet, et selon une articulation mobile entre ce qui est perçu et ce qui ne l'est pas, entre l'élaboration d'une structure, et l'ouverture d'une marge inépuisable d'indétermination¹. » J'ai l'impression que je pourrais signer ces lignes en remplaçant le poème par la pensée physique...

1. Michel Collot, *La Poésie moderne et la structure d'horizon*, Paris, PUF, 1989, p. 7.

III

LE MARIAGE

DE LA RELATIVITÉ

ET DES QUANTA

Depuis que sont apparus la relativité et les quanta, le problème du mariage de ces deux théories majeures s'est posé aux physiciens comme un véritable défi qui allait décider de l'avenir de leur discipline. Le débat serré qui a opposé pendant plusieurs dizaines d'années Einstein et Bohr concerne ce difficile mariage. Où en sommes-nous aujourd'hui ?

On peut dire que le défi a été en partie relevé. Pour l'essentiel, on a en effet réussi à unifier la théorie de la relativité *restreinte* et la théorie des quanta, c'est-à-dire à tenir compte simultanément de h et c . Le fruit de cette union est le *modèle standard de la physique des particules élémentaires et des interactions fondamentales*, dont on a achevé l'élaboration au cours des années soixante-dix. On sait qu'il existe quatre interactions « fondamentales », c'est-à-dire qu'on ne peut pas expliquer à partir d'une autre interaction. Après avoir pensé que les forces électriques et magnétiques étaient distinctes, on a pu établir qu'il ne s'agissait que de deux aspects d'un même phénomène : l'interaction électromagné-

tique qui retient les électrons autour du noyau. L'interaction forte est responsable de la cohésion des constituants du noyau atomique; l'interaction faible, de très faible intensité et de très courte portée (moins d'un centième de la taille d'un noyau atomique), ne se manifeste que dans la collision de certaines particules et dans certaines réactions ou désintégrations nucléaires. On désigne par « particules élémentaires » les plus petits constituants de la matière qu'on puisse isoler, et on les classe en fonction de leurs interactions, c'est-à-dire du type de forces qu'elles exercent et auxquelles elles sont sensibles. Ce modèle obtient des succès remarquables lorsqu'on le confronte à l'expérience. Il nous permet d'observer et de manipuler ces objets si petits et si fuyants que sont les particules élémentaires.

La théorie de la relativité *générale* a fourni, quant à elle, le fondement du modèle standard de la cosmologie, le modèle du Big Bang, évoqué plus haut. Mais si, à l'aide de ce modèle, on tente, par la pensée, de se rapprocher de l'explosion primordiale, on rencontre inévitablement le problème de la quantification de l'interaction gravitationnelle qui domine la dynamique de l'univers, c'est-à-dire le problème du mariage de la relativité générale et de la théorie des quanta, ou encore, dans notre langage, celui de la prise en compte simultanée de G , h et c . Par un autre itinéraire, la physique des particules se heurte au même problème : comment continuer à tenir l'interaction gravita-

tionnelle à l'écart de nos tentatives d'unification des interactions fondamentales, sous prétexte qu'elle serait négligeable à l'échelle élémentaire! Il apparaît en effet très vraisemblable qu'à l'échelle ultramicroscopique où les effets quantiques ne peuvent plus être négligés, l'interaction gravitationnelle ait une intensité tout à fait comparable à celle des autres interactions.

LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS, h ET c PRISES EN COMPTE SIMULTANÉMENT

Le nouveau domaine qui s'ouvre avec la prise en compte des deux constantes h et c qui, cette fois, n'appartiennent pas à un couple « naturellement » lié, présente des difficultés nouvelles. Ce que « produit » une telle association, c'est la « théorie quantique des champs » que l'on peut, grossièrement parlant, identifier à la théorie des particules élémentaires. Lorsque nous avons décrit le quantum d'action, nous avons évoqué les célèbres inégalités de Heisenberg; lesquelles font apparaître qu'à moins de faire une expérience durant un temps infini, on ne peut pas observer une particule sans modifier un tant soit peu son énergie. Mais ces inégalités de Heisenberg peuvent être lues dans l'autre sens : lorsqu'on veut sonder une structure avec une très grande précision temporelle ou spatiale, on doit lui communiquer une très grande énergie. Or la théorie de la relativité restreinte nous dit que l'énergie de mouvement

peut se transformer en énergie de masse, par la production de nouvelles particules. L'énergie que nous devons injecter pour pouvoir sonder une structure à haute résolution spatio-temporelle peut donc non seulement faire bouger les particules mais en créer de nouvelles! La physique des particules élémentaires, qui vise à déterminer les constituants ultimes de la matière, apparaît ainsi comme une physique où le nombre des particules n'est pas conservé. Par là, elle s'apparente plus à la chimie qu'à la mécanique des boules de billard; il s'agit d'une physique « ouverte » où toutes les réactions entre les particules élémentaires se trouvent toutes reliées les unes aux autres; si bien qu'on doit considérer qu'elle traite de systèmes quantiques à nombres infinis de degrés de liberté. On appelle *champs quantiques* de tels systèmes.

Pour préciser le concept essentiel de champ, considérons-le d'abord tel qu'il apparaît en électromagnétisme *classique*. La loi de Coulomb, du nom du physicien français Charles Coulomb (1736-1806), définit la force qui s'établit entre deux charges électriques. Supposons qu'un ensemble de charges ponctuelles se trouvent réparties dans l'espace. On peut décrire la force qu'exerce cet ensemble de charges sur une charge test située en un point quelconque de l'espace. Le champ électrique sera alors défini par la somme vectorielle, en chaque point de l'espace, de toutes les forces exercées par les charges ponctuelles de l'ensemble. La donnée du champ électrique, c'est-

à-dire la donnée, en chaque point de l'espace, de la force électrique s'exerçant sur une charge test, est complètement équivalente à la donnée des charges de l'ensemble. Lorsqu'on a voulu tenir compte des effets relativistes en électromagnétisme, il a fallu définir, de la même façon, le champ *électromagnétique* (avec ses composantes électriques et magnétiques) comme une structure infinie étendue à l'ensemble de *l'espace-temps*. Si l'on considère non seulement c mais aussi h , c'est-à-dire si l'on veut tenir compte des effets quantiques, on aboutit au concept extraordinairement riche de « champ quantique ».

L'INTÉGRALE DE CHEMINS DE FEYNMAN

La théorie des particules élémentaires et des interactions auxquelles elles participent consiste essentiellement à modéliser les amplitudes de probabilité de toutes les réactions possibles entre particules élémentaires. Il s'agit d'un programme qui peut paraître d'une ambition totalement démesurée, et pourtant la réalisation de ce programme a été largement engagée et, dans certains cas, achevée avec de remarquables succès. A l'origine de tous les progrès qui ont été accomplis dans ce domaine, se trouve la méthode de quantification proposée par le prix Nobel Richard Feynman, que l'on appelle la méthode de l'intégrale de chemins. Malheureusement, pour pouvoir apprécier pleinement la richesse de cette méthode, il faut

drait avoir une certaine familiarité avec les outils techniques de la théorie quantique. Il est hors de question, dans un ouvrage aussi succinct, d'entrer dans de tels détails, mais je voudrais néanmoins consacrer quelques développements à la signification de cette méthode, en m'appuyant, comme je l'ai fait au chapitre précédent, sur le paradigme de l'horizon et sur l'articulation réel-potentiel-actuel.

Je pense que l'intégrale de chemins de Feynman correspond bien à ce que j'appelais plus haut « la pensée du monde comme lieu de toutes les lignes d'horizons possibles ». Considérons, dit Feynman, une certaine transition d'un système, d'un état initial à un état final. Pour savoir quelle est l'amplitude de probabilité de cette transition, nous allons tout d'abord essayer de déterminer toutes les voies indiscernables que peut emprunter cette transition, puis écrire son amplitude de probabilité comme somme complexe de toutes les amplitudes de probabilité associées à chacune de ces voies indiscernables. Une telle démarche s'apparente à celle que décrit ainsi François Jacob dans *Le Jeu des possibles* : « La démarche scientifique confronte sans relâche ce qui pourrait être et ce qui est. C'est le moyen de construire une représentation du monde toujours plus proche de ce que nous appelons la réalité ¹ ». L'intérêt philo-

1. François Jacob, *Le Jeu des possibles*, Paris, Fayard, 1983, p.30.

sophique de la méthode de Feynman doit être apprécié à sa juste valeur, qui m'apparaît immense.

La méthode de l'intégrale de chemins évite l'impasse du face-à-face philosophique entre le sujet et l'objet. Le réel microphysique y est considéré comme le pôle d'une triade dont les deux autres pôles sont le potentiel et l'actuel. Le réel est indéterminé a priori, il ne fait l'objet d'aucun critère, ni d'aucune hypothèse a priori, à l'exception évidemment de l'hypothèse de son existence indépendante de la pensée. Pour tenter de déterminer, a posteriori, ce réel on commence par envisager l'ensemble de toutes ses déterminations possibles, qui forment ce que nous appelons le pôle *potentiel* de la triade. Cet espace de potentialités qui rassemble tous les modes envisageables d'existence du réel, ou toutes les voies indiscernables de transitions, est déterminé par les propriétés de symétrie qui sont équivalentes aux *lois de conservation*, lesquelles définissent les variables dynamiques (énergie, impulsion, nombres quantiques des particules identifiables dans des détecteurs), c'est-à-dire les attributs du pôle *actuel* de la triade.

LE PARADIGME DE L'ÉLECTRODYNAMIQUE QUANTIQUE

Le premier résultat concret de la méthode de l'intégrale de chemins de Feynman est la

construction d'une théorie quantique de l'interaction électromagnétique. Il est possible de déduire les équations de Maxwell qui décrivent cette interaction, à l'approximation classique, d'un principe de moindre action établi à partir de l'hypothèse de certaines propriétés de symétrie. Il apparaît commode, pour représenter l'interaction électromagnétique, de considérer, plutôt que le champ électromagnétique, qui en lui-même serait suffisant, le « potentiel électromagnétique », c'est-à-dire un ensemble de quatre fonctions définies en chaque point de l'espace-temps, dont dérive ce champ (les composantes des champs électrique et magnétique s'obtiennent à partir des dérivées des composantes du potentiel). L'intérêt de cette présentation n'a rien d'académique; elle permet, selon moi, d'ouvrir une certaine marge d'indétermination dans la représentation de l'interaction électromagnétique, même au niveau classique, une marge qui s'avérera très utile lors de la quantification. Il existe en effet, pour un champ électromagnétique donné, une classe infinie de potentiels électromagnétiques dont dérive ce champ. Je trouve d'ailleurs le terme de potentiel particulièrement bien adapté, car si on peut considérer le champ électromagnétique, qui est expérimentalement mesurable comme relevant de la catégorie de l'actualité, l'indétermination du « potentiel » suggère, au sens propre du terme, son appartenance à la catégorie de la *potentialité*. En tous les cas cette indétermination du potentiel est

ce que l'on appelle une propriété de symétrie (on dit aussi une *invariance*) de l'interaction électromagnétique : l'interaction est invariante par transformation du potentiel en un autre potentiel donnant lieu au même champ électromagnétique. Une telle transformation est ce que l'on appelle une transformation de *jauge*, et l'invariance à laquelle elle correspond est appelée *invariance de jauge*.

Lorsque l'on veut quantifier l'interaction électromagnétique, il convient d'abord de traiter quantiquement la matière en interaction. Considérons l'exemple le plus simple où le champ de matière est un champ quantique d'électrons. Dans la représentation ondulatoire, ce champ est une amplitude de probabilité, dépendant de l'espace et du temps, dont le module au carré est la probabilité de trouver un électron en chaque point de l'espace-temps. Rappelons que seul le module d'une amplitude de probabilité est mesurable, alors que sa phase est indéterminée. L'électrodynamique quantique a donc une nouvelle propriété de symétrie ou d'invariance, spécifiquement quantique, l'*invariance par changement, à module constant, de la phase du champ d'électrons*. Cette invariance de phase est équivalente à la loi de conservation de la charge électrique des électrons. Se produit alors un « miracle » : cette invariance par changement de la phase du champ d'électrons peut être imposée comme une invariance *locale*, c'est-à-dire comme

une invariance par un changement de phase, *dépendant du point d'espace-temps où il s'effectue*, si, et seulement si, le champ quantique d'électrons est couplé à un champ quantique d'interaction obéissant à la même invariance de jauge que le potentiel électromagnétique classique. Ainsi il apparaît que les invariances « horizontales », que sont, d'une part, l'invariance de phase du champ quantique de matière et, d'autre part, l'invariance de jauge du champ quantique d'interaction, sont parfaitement adéquates l'une à l'autre. C'est de cette adéquation que résulte l'élaboration de la théorie de l'*électrodynamique quantique*, dont on dit que c'est une « théorie à invariance de jauge ».

De plus le miracle que nous avons évoqué semble avoir une portée qui déborde le cadre de l'interaction électromagnétique et concerne les trois autres interactions fondamentales, l'interaction gravitationnelle, et les deux interactions de portées microscopiques, l'interaction nucléaire forte et l'interaction nucléaire faible. L'interaction gravitationnelle, décrite au niveau classique par la théorie de la relativité générale, est en effet invariante par changement local de référentiel, et cette *localité* de l'invariance, sur laquelle nous avons insisté au premier chapitre, n'est pas sans analogie avec la localité de l'invariance de jauge de l'interaction électromagnétique. D'ailleurs, dans les années vingt, Hermann Weyl (1885-1955) avait proposé une tentative de

théorie géométrique de l'électrodynamique quantique, analogue à la relativité générale; c'est à l'occasion de cette tentative qu'il avait introduit le concept d'invariance de jauge, et lui avait donné ce nom. Mais cette tentative avait alors avorté, car la théorie quantique n'était pas encore suffisamment développée. D'autre part, la quantification de la relativité générale a soulevé d'autres difficiles problèmes sur lesquels nous reviendrons plus bas. Par contre, pour l'élaboration de théories des interactions nucléaires, l'électrodynamique quantique a joué le rôle d'un authentique paradigme: pour les deux interactions nucléaires, en effet, il existe une symétrie horizontale locale des champs de matière qui s'articule à une symétrie de jauge des champs d'interactions; il est donc raisonnable d'essayer, pour ces deux interactions, des théories à invariance de jauge.

La construction d'une théorie quantique des champs qui fût cohérente, et son application à la description des interactions électromagnétique, nucléaire faible et nucléaire forte, a été en chantier pendant une cinquantaine d'années. A d'abord été achevée l'élaboration de l'électrodynamique quantique (aussi appelée *QED*, abréviation du terme anglais de *Quantum ElectroDynamics*), qui est la théorie quantique et relativiste de l'interaction électromagnétique.

Cette théorie a servi de banc d'essai à tout l'appareil conceptuel de la théorie quantique des

champs qui permettait de concrétiser de manière quantitative les avancées de la méthode de l'intégrale de chemins (diagrammes de Feynman, développement perturbatif, corrections radiatives, procédure de renormalisation, etc.)

On a ainsi réussi à trouver des effets de la quantification à la fois calculables théoriquement et mesurables expérimentalement. Or la comparaison de la théorie et de l'expérience s'est révélée extrêmement satisfaisante : ainsi, le « moment magnétique de l'électron », qui, à l'approximation classique, est égal à 2, a été mesuré à $2,00231930482 \pm (40)$ (l'erreur porte sur les deux derniers chiffres) et prédit à $2,00231930476 \pm (52)$ (l'erreur, encore une fois, porte sur les deux derniers chiffres). On a pu dire de cet accord de la théorie à l'expérience qu'il était le meilleur jamais obtenu dans toute l'histoire des sciences !

DES QUARKS AU MODÈLE STANDARD

L'électrodynamique quantique est ainsi devenue la théorie de référence sur le modèle de laquelle se sont construites les théories des interactions nucléaires. Il a fallu d'abord accumuler des données expérimentales concernant ces interactions et en échafauder une phénoménologie. Cette phase d'accumulation, qui s'est déroulée essentiellement pendant les années cinquante et soixante, a été marquée par la découverte d'une famille de particules que l'on a appelées des

hadrons qui, à l'instar du proton, peuvent participer à toutes les interactions fondamentales, et donc en particulier à l'interaction nucléaire forte. Or, dans les années soixante, cette famille des hadrons s'est mise à proliférer au point que l'élémentarité de tous ses membres a commencé à apparaître douteuse : comment imaginer que le nombre de briques fondamentales de la matière approche les trois cents?!

Le tournant décisif de la physique des particules élémentaires et des interactions fondamentales a été la mise en évidence d'un *nouveau niveau d'élémentarité*, sous-jacent au niveau des hadrons, qu'on peut appeler *sub-hadronique*. On a appelé *quark* (par allusion à des personnages de James Joyce dans *Finnegans Wake* qui vont par trois, car le proton serait constitué de trois « quarks ») les particules élémentaires de ce monde sub-hadronique.

Ce mot est bien fait pour séduire, pour entretenir le mystère et la curiosité autour de la réalité de son objet. L'échelle des quarks représente ce qui est considéré aujourd'hui comme le niveau ultime dans la chaîne de l'infiniment petit. On désigne donc par quarks les constituants des protons et des neutrons, et plus généralement de l'ensemble des hadrons. Lorsqu'on a commencé à en parler dans les années soixante, à la suite de Murray Gell-Mann en 1964 on les avait présentés comme un simple modèle mathématique, purement « abstrait ». Mais, petit à petit, ces parti-

cules ont acquis un statut plus fort et plus précis. Pourtant, elles soulèvent encore une sérieuse difficulté : elles présentent en effet la propriété bizarre de n'être libres qu'à l'intérieur des hadrons. Ce qui signifie qu'on n'arrive pas à les isoler hors des hadrons. Le prix Nobel 1990 a, certes, récompensé des travaux – l'expérience dite de Stanford – qui ont permis de mettre en évidence la structure granulaire des protons et des neutrons ; donc de confirmer la pertinence du modèle des quarks. Mais, hors des hadrons, on n'a encore jamais vu de quarks !

La théorie de l'interaction nucléaire forte au niveau des quarks constitue ce qu'on appelle la *chromodynamique quantique*, (ou *QCD*, pour *Quantum ChromoDynamics*). Cette théorie a quinze ans d'existence, les physiciens la maîtrisent très bien pour l'essentiel. On l'appelle ainsi parce qu'y entre en jeu la « couleur » (en grec : « chromos ») des quarks et que, par ailleurs, elle ressemble beaucoup à l'électrodynamique quantique. De même que les électrons interagissent en échangeant des photons, les quarks interagissent en échangeant des bosons – appelés des « gluons » – qui agissent sur la couleur des quarks.

Je pense que la terminologie de la couleur traduit la prégnance du paradigme de l'horizon. On peut dire en effet qu'une ligne d'horizon sépare le monde hadronique du monde subhadronique. Si le monde hadronique est de notre côté de cette ligne, puisque nous pouvons détecter

expérimentalement des hadrons, on doit imaginer les quarks et les gluons, qui ne sont jamais détectables directement, situés au-delà de l'horizon. Comment alors trouver une terminologie mieux adaptée que celle de la couleur, qui serait réservée au monde sub-hadronique alors que le monde hadronique ne serait qu'en noir et blanc?

La construction de la théorie de l'interaction nucléaire faible présente certaines analogies avec celle que nous venons de décrire. En plus des quarks qui participent à toutes les interactions, il existe une famille de particules de matière, la famille des *leptons*, à laquelle appartient l'électron, qui participent à l'interaction faible mais sans participer à l'interaction forte. Les quarks participent à l'interaction faible par une autre de leur caractéristique, que l'on a appelée, cette fois, je crois, sans la moindre arrière-pensée, la *saveur* (à moins qu'on se soit rendu compte que le mot « quark » signifie, en allemand, « fromage blanc »)! Toujours est-il qu'en complète analogie avec les interactions électrodynamique et chromodynamique, les quarks interagissent dans l'interaction faible, par échange de nouveaux bosons, que l'on appelle les *bosons intermédiaires*, qui agissent sur leurs saveurs. Pour les leptons, l'équivalent de la saveur des quarks est appelé « isospin faible ».

Pendant plus de vingt ans, l'élaboration d'une théorie de l'interaction faible s'est focalisée sur la question des bosons intermédiaires, avec

d'abord l'hypothèse de leur existence, puis avec leur découverte expérimentale, au CERN en 1983, au terme d'une extraordinaire aventure scientifique qui a été maintes fois contée, et maintenant avec leur étude systématique à l'aide de l'« usine à bosons intermédiaires » qu'est le grand collisionneur LEP du CERN. Cette dernière machine, qui a commencé à fonctionner en 1989, donne entière satisfaction; toutes les prédictions du modèle standard (qui rassemble l'électrodynamique quantique, la chromodynamique quantique et la théorie de l'interaction faible) se trouvent confirmées avec une très grande précision. Dans *La Matière-Espace-Temps*, nous disions, avec Michel Spiro, à propos de ce modèle standard : « L'avenir dira peut-être qu'il s'agit d'une *véritable révolution scientifique*. » Aujourd'hui, avec la moisson de résultats du LEP, je crois qu'on peut affirmer que le modèle standard constitue une révolution scientifique, qui concrétise le mariage de la relativité restreinte et de la théorie des quanta.

LA COSMOLOGIE ET L'UNIFICATION DES INTERACTIONS FONDAMENTALES

Au vu des succès de ce modèle standard, il est tentant d'aller au-delà de l'analogie et d'essayer d'*unifier* les interactions fondamentales, c'est-à-dire de les intégrer dans une synthèse théorique

d'ensemble, un peu comme les équations de Maxwell avaient unifié les phénomènes électriques, magnétiques et optiques. Cette recherche de l'unification se trouve d'ailleurs constamment au cœur de la démarche scientifique, et l'histoire des sciences atteste que toute révolution scientifique s'accompagne d'une certaine unification. Or l'histoire récente de la physique des particules, qui date des vingt dernières années tout au plus, montre que la tendance à l'unification a revêtu, dans cette discipline, un caractère dominant. De plus, en procédant ainsi, la physique des particules s'est rapprochée de manière tout à fait spectaculaire d'une autre branche de la physique de frontière, la cosmologie. C'est à décrire ce rapprochement qu'est consacrée la fin de cet ouvrage.

Pour comprendre le cheminement de la démarche d'unification, il faut faire appel à des concepts malheureusement très difficiles à expliquer, la *renormalisation* et la *brisure de symétrie*. Je vais néanmoins, sans entrer dans le détail technique, essayer de dégager la signification essentielle de ces développements.

La procédure de la renormalisation a été développée en réponse à un problème technique qui a surgi lors de l'exploitation de la méthode de l'intégrale de chemins. Le développement d'une amplitude de probabilité d'une certaine transition, en somme d'amplitudes associées à toutes les

voies indiscernables par lesquelles peut s'opérer la transition considérée, fait intervenir les « diagrammes » et « amplitudes » de Feynman. Or il arrive que certaines amplitudes associées à certaines voies ne sont calculables qu'à partir d'intégrales qui « divergent », c'est-à-dire qui sont égales à l'infini. Ces divergences sont liées au comportement à très haute énergie des amplitudes de transition, c'est-à-dire du fait des inégalités de Heisenberg, à leur comportement à très petite distance. Il s'agit évidemment d'une difficulté majeure, car on n'a jamais vu une probabilité infinie ! La procédure de renormalisation permet de se sortir de cette difficulté : on extrait la « partie finie » de ces intégrales en introduisant dans la théorie des paramètres ad hoc. La valeur de ces paramètres ad hoc peut être fixée expérimentalement. Une théorie est dite *renormalisable* si le nombre de paramètres ad hoc, nécessaires à l'élimination de toutes les divergences possibles, n'est pas infini. Une théorie renormalisable peut donc être comparée à l'expérience, elle est réfutable, elle peut donc, en suivant Karl Popper, être considérée comme une véritable théorie scientifique. C'est pourquoi le critère de renormalisabilité a été retenu comme un critère décisif de la physique théorique des particules. Or, nouveau miracle de l'invariance de jauge, les théories à invariance de jauge *sont renormalisables*, alors que les tentatives précédentes d'interpréter l'interaction faible comme une interaction de

contact étaient vouées à l'échec car elles conduisaient à une théorie non renormalisable. Il s'est trouvé d'autre part que la théorie à invariance de jauge adaptée à l'interaction faible pouvait s'inscrire très naturellement dans un schéma susceptible d'unifier cette interaction avec l'interaction électromagnétique dans une même « interaction électrofaible ».

La renormalisabilité d'une théorie entraîne une propriété extrêmement intéressante, qui, à mon avis, n'est pas sans rapport avec le point de vue « horizontal » qui a été développé tout au long de cet ouvrage. L'élimination des divergences, dans la procédure de renormalisation, consiste à absorber les infinis dans une redéfinition des paramètres dont dépend la théorie, tant et si bien que, par exemple, la constante qui mesure l'intensité de l'interaction, que l'on appelle la constante de couplage ou la charge associée à l'interaction, est une constante... variable, qui dépend de la précision avec laquelle l'interaction est décrite. Pour utiliser le paradigme de l'horizon, on peut dire qu'on a tracé un horizon de précision au-delà duquel sont renvoyées les divergences, et qu'on modélise la ligne de cet horizon à l'aide de quantités effectives, dépendant des conditions de l'observation. Retenons donc que, dans une théorie renormalisable, comme le sont les théories à invariance de jauge que l'on utilise pour les interactions électromagnétiques et nucléaires, les constantes de couplages doivent être considérées

comme des constantes effectives, dépendant de la précision, c'est-à-dire de l'énergie. La façon dont ces constantes dépendent de l'énergie est complètement prédite par la théorie. Pour l'interaction électromagnétique, l'effet de la renormalisation est à peine perceptible, la charge de l'électron est presque complètement indépendante de l'énergie. Ce n'est pas le cas de l'interaction forte : la constante de couplage de l'interaction forte, que l'on appelle aussi la « charge de couleur », décroît sensiblement lorsque croît l'énergie, si bien qu'à haute énergie, l'interaction « forte » est faible ! Par la théorie, on prédit même qu'il existe une énergie, certes énorme, totalement inaccessible à l'expérience, où les interactions faible et forte sont d'intensités comparables. Comme, par ailleurs, ainsi que nous l'avons dit plus haut, il semble possible d'unifier les interactions électromagnétique et faible, on voit se dessiner la perspective d'une grandiose unification *électronucléaire*.

Survient alors le rapprochement avec la cosmologie qui provoque un profond changement de perspective. L'astrophysique, avons-nous dit, a intégré la donnée observationnelle de l'expansion de l'Univers dans le modèle cosmologique du Big Bang, selon lequel l'Univers est en expansion et en refroidissement depuis une explosion primordiale survenue il y a une quinzaine de milliards d'années. La température de l'Univers décroît à

raison inverse de la racine carrée du temps écoulé depuis le Big Bang. Comme la température n'est rien d'autre que l'énergie cinétique moyenne des particules qui constituent l'Univers primordial, on peut dire que le modèle cosmologique standard comporte lui aussi une relation temps-énergie, analogue à celle déduite, en théorie quantique, de l'inégalité de Heisenberg. Dès lors, utiliser une sonde de haute énergie pour analyser une structure avec une haute résolution spatio-temporelle revient en quelque sorte à *remonter le temps*, à tenter de reproduire, en laboratoire, les conditions de l'Univers primordial, tel qu'il était lorsque sa température correspondait à l'énergie de la sonde. Voilà qui confère à la physique des particules une surprenante dimension temporelle.

Comme la théorie de la renormalisation suggère que l'unification des interactions s'opère à très haute énergie, l'image que produit le rapprochement de la physique des particules et de la cosmologie est celle d'un Univers qui est non seulement en expansion et en refroidissement, mais aussi en *devenir*, en *évolution*, depuis une phase dense et chaude où toutes les particules et interactions étaient indifférenciées, jusqu'à son état actuel, en passant par une série de *transitions de phases*, au cours desquelles se différencient les interactions et se produisent les intégrations successives conduisant à l'emboîtement de structures que nous constatons.

C'est tout naturellement vers la physique sta-

tistique, dont la théorie des transitions de phases est précisément l'un des objectifs majeurs, qu'on s'est tourné pour essayer de comprendre les phénomènes de différenciation des interactions et d'intégration de structures complexes. C'est ainsi que le mécanisme de *brisure spontanée de symétrie*, emprunté pour l'essentiel à la physique de la supraconductivité, est devenu un élément constitutif du modèle standard de l'interaction électrofaible. Ce mécanisme pourrait permettre de rendre compte de la différenciation des interactions électromagnétique et faible, un milliardième de seconde après le Big Bang. Ce mécanisme suppose l'existence d'un nouveau champ quantique, appelé *champ de Higgs*. Le modèle minimal de brisure spontanée de la symétrie électrofaible suppose l'existence d'au moins une particule nouvelle, le *boson de Higgs*. C'est à la recherche de cette nouvelle particule, ou de tout autre effet lié à la brisure de la symétrie électrofaible, que seront consacrées, pour l'essentiel, les gigantesques machines qui devraient entrer en fonctionnement à l'orée du xxi^{e} siècle, le grand collisionneur européen (LHC) et le supercollisionneur américain (SSC).

Lorsque nous avons évoqué la chromodynamique quantique et le modèle des quarks, nous avons discuté la propriété caractéristique des quarks et des gluons de ne pouvoir jamais être isolés des hadrons auxquels ils appartiennent. On a

donné le nom de *confinement* à cette propriété. Or l'analogie avec l'électrodynamique quantique suggère fortement qu'il puisse exister, en chromodynamique quantique, une phase « déconfinée » dans laquelle les quarks et gluons seraient libres, analogue à la phase *plasma* de l'électrodynamique dans laquelle sont libres les ions et les électrons. L'étude expérimentale de ce nouvel état de la matière que serait un tel *plasma de quarks et gluons*, aussi appelé « quagma », se situe à la frontière de la physique des particules et de la physique nucléaire. On provoque des collisions de noyaux lourds à très haute énergie, et on espère ainsi réaliser des conditions de densité et température permettant une transition de déconfinement. La difficulté de ce genre d'expériences qui donnent lieu à des événements très spectaculaires, comme la production de milliers de particules dans une seule collision, réside dans l'extraction d'informations significatives concernant une éventuelle transition, à partir de données expérimentales d'une extrême complexité. Les estimations théoriques concernant les conditions de densité et de température de cette transition situeraient, dans le cadre de la cosmologie primordiale, la formation des hadrons à partir de quarks et gluons précédemment libres aux environs d'un cent millième de seconde après le Big Bang. Le cadre théorique de telles estimations est une physique qui n'est pas seulement quantique et relativiste, mais aussi statistique, prenant donc en

compte explicitement h , c et k . Ce nouveau cadre, qui commence à être exploré, est celui de la théorie quantique des champs à température, ou densité, finie.

L'HORIZON DE LA GRAVITATION QUANTIQUE

Voilà qui nous ramène à ce qui est la problématique de cet ouvrage, la prise en compte des constantes universelles. On aura noté que, jusqu'à présent, l'une des quatre interactions fondamentales – la gravitation – a été laissée de côté. Or l'étude de la gravitation, dans le domaine de la physique des particules, ou celui de la cosmologie primordiale, suppose la prise en compte simultanée de trois constantes universelles, h , c et G , et peut-être même des quatre constantes universelles, si l'on inclut k pour tenir compte des effets de température ou densité finie. C'est pourquoi la gravitation quantique apparaît comme une sorte de défi ultime lancé à la physique dans sa globalité.

Avant d'aller plus loin, il convient de faire apprécier au lecteur que les problèmes de la gravitation quantique ne se profilent que sur un horizon extrêmement lointain. Pour apprécier les ordres de grandeur, il convient toujours d'utiliser des unités adaptées. En physique des particules le système d'unités dites naturelles est celui dans

lequel \hbar ¹ et c valent exactement 1. Ces unités sont naturelles dans une physique relativiste (les vitesses des particules sont très proches de celle de la lumière) et quantique (les actions en jeu sont toujours de l'ordre du quantum d'action). Tout se passe, dans ce système d'unités, comme s'il n'y avait plus trois quantités physiques fondamentales, mais seulement une, puisque deux constantes universelles faisant intervenir les quantités fondamentales sont posées égales à 1. On peut choisir comme quantité fondamentale, par exemple, l'énergie, et dans ce cas, longueur, durée et masse deviennent des quantités dérivées, s'exprimant à partir de l'énergie : la masse a le contenu dimensionnel d'une énergie, la longueur et la durée celui de l'inverse d'une énergie. L'unité d'énergie adoptée est le GeV, ou gigaélectronvolt, qui est l'énergie communiquée à un électron par une différence de potentiel d'un milliard de volts. Une masse égale à 1 GeV est à peu près égale à la masse invariante du proton (qui vaut exactement 0,938 GeV). Une longueur égale à 1 GeV⁻¹ vaut une fraction de *fermi* soit 10⁻¹³ cm, une longueur comparable au rayon d'un noyau. Un temps égal à 1 GeV⁻¹ vaut environ 10⁻²⁵ seconde, durée typique d'une interaction nucléaire, qui est le temps que met la lumière à parcourir 1 fermi.

Le contenu dimensionnel de la constante de la gravitation est celui du produit d'une action par

1. En réalité il s'agit de \hbar divisé par 2π .

une vitesse divisé par le carré d'une masse. Dans le système d'unités naturelles, G vaut alors environ $10^{-38} \text{ GeV}^{-2}$; on peut donc légitimement négliger la gravitation en physique des particules. Néanmoins, l'existence des trois constantes universelles implique l'existence d'une masse fondamentale appelée masse de Planck valant 10^{-19} GeV , d'une longueur fondamentale, appelée longueur de Planck, valant $10^{-19} \text{ GeV}^{-1}$, soit 10^{-33} cm , d'un temps fondamental, appelé « temps de Planck », valant $10^{-19} \text{ GeV}^{-1}$, soit 10^{-44} seconde; échelles d'énergie, de longueur et de temps, auxquelles la gravitation, nécessairement quantique, ne peut plus être négligée.

Or le modèle classique du Big Bang ne tient pas compte des effets quantiques dans les équations de la gravitation. Le Big Bang est alors une singularité correspondant à une valeur infinie de la température et de la densité au temps zéro. Mais au temps de Planck, soit 10^{-44} seconde après le Big Bang, un modèle classique est certainement faux. Comme on ne sait pas encore traiter quantiquement la gravitation, on considère le temps de Planck comme un horizon de la cosmologie primordiale, et en somme on appelle « Big Bang » l'état de l'Univers au temps de Planck, sans nécessairement faire l'hypothèse d'une « singularité originelle ».

L'interaction gravitationnelle est extraordinairement faible aux énergies qui sont en jeu en physique des particules. Elle n'est intense, à

l'échelle macroscopique, que parce que sa portée est infinie et qu'elle est attractive pour toutes les particules constitutives de la matière (à la différence de l'interaction électromagnétique qui est attractive ou répulsive selon le signe de la charge électrique). Si donc, la gravitation ne peut pas être négligée dans le monde macroscopique, et apparaît même dominante dans l'Univers à très grande échelle, elle semble totalement négligeable à l'échelle des particules élémentaires. D'ailleurs, l'hypothétique boson de la gravitation quantique, le *graviton*, interagit si faiblement qu'il n'a pas encore été possible de le mettre en évidence expérimentalement. Les *ondes gravitationnelles*, prédites par la théorie de la relativité générale, n'ont pas non plus été mises en évidence (leur détection, il est vrai, est l'un des défis lancés à l'astrophysique du xxi^{e} siècle).

Mais alors, dira le lecteur, pourquoi se préoccuper des problèmes de la gravitation quantique? Mais je pourrais lui retourner la question : s'il a déjà entendu parler du Big Bang, ne s'est-il jamais interrogé sur la signification de cette mystérieuse « explosion primordiale », ne s'est-il jamais interrogé sur ce qu'il y avait « avant le Big Bang »? Or, nous venons de dire qu'on appelle « Big Bang » l'état de l'Univers au temps de Planck, le temps auquel la gravitation est quantique. On ne peut donc s'intéresser à l'énigmatique et fascinante dynamique du Big Bang sans se préoccuper de la gravitation quantique.

La nouvelle interprétation de la constante de la gravitation, lorsqu'on l'associe à h et c , ouvre des perspectives stupéfiantes : ainsi la longueur et le temps de Planck suggèrent une structure quantique de l'espace-temps lui-même. Imagine-t-on les fantastiques implications d'une limite à la divisibilité de l'espace et surtout à la *divisibilité du temps*!?

Quelques mots seulement pour évoquer l'intense bouillonnement intellectuel provoqué par la quantification de la gravitation. Si l'on voulait généraliser à la gravitation la méthode de l'intégrale de chemins de Feynman, il faudrait sommer sur toutes les métriques d'espace-temps possibles! On a bien essayé de formaliser cette problématique, mais on a buté sur l'obstacle de la non-renormalisabilité de la théorie. Des progrès ont toutefois été accomplis avec la théorie dite des « super-cordes », qui s'avère très prometteuse, quelles que soient les réserves que de nombreux physiciens et astrophysiciens puissent faire devant des schémas qui relèvent pour l'instant de la plus pure spéculation. Dans une telle théorie, les objets fondamentaux ne sont pas des particules ponctuelles, mais des objets unidimensionnels, appelés cordes. Alors que des particules ponctuelles parcourent des lignes d'univers, les « chemins » de l'intégrale de Feynman, les cordes balayent une « surface d'univers », à deux dimensions. Quantifier une théorie de cordes revient à sommer toutes

les surfaces d'univers possibles Voilà qui s'apparente à un problème de gravitation quantique, et qui est même stricto sensu, un problème de gravitation quantique, mais dans un espace-temps à deux dimensions. Or il a été remarqué qu'à deux dimensions d'espace-temps, la relativité générale pourrait être quantifiée en une théorie *renormalisable*!

La théorie des cordes a été formulée pour la première fois au début des années soixante-dix pour les besoins de la phénoménologie de l'interaction forte. Il s'agissait alors d'un modèle destiné à expliquer le confinement des quarks; lesquels apparaissaient comme des extrémités de cordes, ou des pôles d'aimant. On a vu qu'on ne pouvait pas les isoler, pas plus qu'on ne peut isoler l'extrémité d'une corde quand on la coupe. Dans ce cas-là, en effet, on a deux cordes!

Mais le statut de la théorie des cordes a changé lorsqu'on s'est avisé qu'elle pourrait jouer un autre rôle : celui d'une approche de la gravitation quantique faisant intervenir la longueur de Planck comme longueur fondamentale. Cette révolution, qu'a opérée en 1974 notre regretté collègue et ami Joël Scherk, a trouvé un aboutissement extraordinaire en 1984 avec l'explosion des « super-cordes », lorsque l'on a cru avoir découvert un critère permettant de choisir une théorie de super-cordes complètement contrainte, qui serait capable d'unifier toutes les interactions fondamentales, y compris la gravitation, dans un

espace-temps comportant 10 dimensions dont six seraient pliées sur elles-mêmes...

On est revenu depuis à une bien plus grande modestie, car on a trouvé que le critère évoqué ci-dessus n'était pas aussi contraignant qu'on le croyait. Les investigations vont néanmoins toujours bon train : l'invariance *conforme*, qui est la propriété de symétrie « horizontale » des théories de super-cordes, est d'une richesse conceptuelle extraordinaire; elle englobe et généralise l'invariance de jauge; grâce à la *super-symétrie* qui relie bosons et fermions, il devient possible d'unifier, plus profondément qu'on n'a jamais pu le faire, matière et interactions. Le fait que les théories de cordes aient émergé de la physique de l'interaction forte me fait penser que le « paradigme électrofaible », qui commence à s'épuiser, pourrait être relayé par un « paradigme gravito-fort », ouvrant une nouvelle voie vers l'unification des interactions fondamentales.

VERS UNE COSMOGONIE SCIENTIFIQUE?

Ainsi les théoriciens des particules se sont-ils convaincus que la voie du dépassement du modèle standard de leur discipline passe par la quantification de la gravitation. Il semble bien que ce soit aussi la clé du dépassement du modèle standard de la cosmologie. Le modèle classique du Big Bang rencontre en effet certaines difficultés, que l'on a proposé de lever en imaginant, dans l'uni-

vers primordial, une phase d'expansion exponentielle, appelée *inflation*. Une inflation, liée à la gravitation quantique, intervenant au temps de Planck, pourrait, selon des cosmologistes comme Andreï Linde, permettre de résoudre les difficultés du modèle standard du Big Bang et d'en sauvegarder les acquis. Une autre école de pensée, animée à Bruxelles par Ilya Prigogine, interprète le big bang, non plus comme une singularité, mais comme une *instabilité quantique de l'espace-temps*. Au temps de Planck, l'espace-temps plat, vide de toute matière, aurait été quantiquement instable, il se serait effondré en se courbant et en produisant toute la matière qui porte l'entropie primordiale, sous forme de trous noirs quantiques...

De tels scénarios sont fascinants, mais ils ne vont pas sans provoquer de fortes réticences chez de nombreux scientifiques qui souhaitent laisser la cosmogonie hors du champ de la science. Ces réticences sont aussi alimentées par ce que l'on appelle le *principe anthropique fort* : « L'Univers doit être tel qu'il admette la création d'observateurs en son sein, à quelque stade de son évolution » (B. Carter), qui a en effet un « fort » arrière-goût téléologique et suscite des spéculations d'ordre religieux !

Mais je voudrais, en conclusion de cet ouvrage, donner ma position personnelle dans ce débat. Je crois que c'est un des rôles de la science

que d'apporter un éclairage nouveau et pertinent au débat cosmogonique. La science appartient à la culture, et la recherche fondamentale vise à apporter des éléments de réponse aux questions philosophiques qui hantent l'humanité depuis la nuit des temps. Mais c'est précisément à ce propos que le parti pris d'humilité, que j'évoquais au début de l'ouvrage, prend tout son sens : il serait dramatique que la science, sous le prétexte qu'elle s'intéresse aussi aux problèmes des origines de l'Univers, serve de justification à des pseudo-philosophies normatives, obscurantistes ou scientistes.

Après avoir été formulées comme purement utilitaires, les constantes universelles que nous connaissons ont pu passer pour fondées en nature – on a pu parler à leur propos de « constantes de la nature ». Aujourd'hui, nous sommes contraints d'en revenir, mais en un sens nouveau, à une interprétation utilitaire : les constantes ne sont pas les constantes physiques de l'Univers, mais des constantes universelles de la physique; elles expriment une « autodiscipline » nécessaire à notre pensée dans ses rapports à la nature. On peut les tenir comme autant de « garde-fous » que la physique s'impose à elle-même. C'est le cas en premier lieu de c , la limite supérieure de toute vitesse, qui traduit l'impossibilité d'interaction instantanée à distance : une impossibilité qu'il serait finalement tout à fait déraisonnable de ne pas admettre. Nous avons vu comment Einstein a

pu procéder à des remises en cause d'une extraordinaire audace, parce qu'il s'est interdit d'imaginer qu'une vitesse puisse dépasser celle de la lumière. Les constantes de Boltzmann et de Planck traduisent aussi des impossibilités, des limites, des contraintes qu'il serait déraisonnable de ne pas admettre : toute connaissance a un coût ; le moteur à mouvement perpétuel n'existe pas ; il est impossible d'influer sur le passé. C'est en assumant pleinement ces contraintes que la théorie quantique a permis les prodigieuses avancées scientifiques et technologiques du xx^e siècle.

A première vue, la constante de Newton G ne semble pas devoir s'interpréter comme traduisant aussi une certaine impossibilité. La théorie de la gravitation élaborée par Newton semble au contraire marquer une libération, un affranchissement des illusions de l'anthropocentrisme, une fenêtre sur une pensée globale de l'Univers. Pourtant nous avons vu que, quand on l'associe à h et c , la constante de Newton pourrait s'interpréter comme une limite à la divisibilité de l'espace et du temps. Mais cette limite est tellement lointaine, qu'elle ne paraît que très peu contraignante. Mais quelle stimulation pour l'imagination des physiciens, à condition qu'ils sachent raison garder !

Telle est la leçon de cet ouvrage : les constantes universelles, nos constantes, nous empêchent de divaguer, mais elles ouvrent des

LES CONSTANTES UNIVERSELLES

horizons. S'il apparaissait d'autres constantes, nous savons déjà qu'elles ne ruinaient pas la physique telle que nous la connaissons. Elles viendraient s'inscrire à côté de nos quatre jalons déjà très solides pour guider notre démarche d'exploration de la nature. D'autres « garde-fous » viendront peut-être, mais ils ouvriront aussi de nouveaux horizons qui reculeront sans cesse.

BIBLIOGRAPHIE

- J.P. BATON et G. COHEN-TANNOUJJI, *L'Horizon des particules. Complexité et élémentarité dans l'Univers quantique*, Paris, Gallimard, 1989.
- J.-C. BOUDENOT, *Électromagnétique et gravitation relativistes*, Paris, Ellipses, 1989.
- L. BRILLOUIN, *Science and Information Theory*, New York, Academic Press, 1962.
- G. COHEN-TANNOUJJI et M. SPIRO, *La Matière-Espace-Temps. La logique des particules élémentaires*, Paris, Fayard, 1986.
- R. FEYNMAN, *Lumière et Matière : une étrange histoire*, Paris, Interéditions, 1987.
- S. HAWKING, *Brève Histoire du Temps. Du Big Bang aux trous noirs*, Paris, Flammarion, 1989.
- A. KASTLER, *Cette étrange matière*, Paris, Stock, 1976.
- I. NEWTON, *Principia Mathematica* (extraits), Paris, Christian Bourgois, 1985.
- I. PRIGOGINE et I. STENGERS, *Entre le Temps et l'Éternité*, Paris, Fayard, 1988.
- H. REEVES, *L'Heure de s'enivrer. L'Univers a-t-il un sens?* Paris, Le Seuil, 1986.
- Trinh X'THUAN, *La Mélodie secrète : Et l'homme créa l'Univers*, Paris, Fayard, 1988.
- V. WEISSKOPF, *La Révolution des quanta*, Paris, Hachette, coll. Questions de science, 1989.

TABLE DES MATIÈRES

<i>Introduction de Dominique Lecourt</i>	7
I. G et c : la relativité	23
<i>La loi de la gravitation universelle et la constante de Newton</i>	25
<i>La relativité restreinte et la vitesse de la lumière c</i>	29
<i>La relativité générale, G et c prises en compte simultanément</i>	37
II. h et k : les quanta	47
<i>La thermodynamique statistique et la constante de Boltzmann k</i>	47
<i>La constante de Planck h, le quantum d'action</i>	54
<i>La constante de Boltzmann comme un quantum d'information</i>	67
<i>Les amplitudes de probabilité et la complémentarité onde-corpuscule</i>	74
<i>Bosons et fermions</i>	79
III. Le mariage de la relativité et des quanta	85
<i>La théorie quantique des champs, h et c prises en compte simultanément</i>	87
<i>L'intégrale de chemins de Feynman</i>	89

<i>Le paradigme de l'électrodynamique quantique</i>	91
<i>Des quarks au modèle standard</i>	96
<i>La cosmologie et l'unification des interactions fondamentales</i>	100
<i>L'horizon de la gravitation quantique</i>	108
<i>Vers une cosmogonie scientifique?</i>	114
<i>Bibliographie</i>	119

QUESTIONS DE SCIENCE

Collection dirigée par
DOMINIQUE LECOURT

La réalité du monde exploré par les physiciens reste aujourd'hui nimbée de mystère. Quatre « constantes universelles », attachées à quatre des plus grands noms de la science moderne, permettent pourtant de la cerner avec une précision stupéfiante.

Depuis Einstein, nous savons qu'il existe dans l'Univers une vitesse-limite, celle de la lumière ; Planck nous a appris qu'un « quantum » d'action marque la borne inférieure de toute action ;

Boltzmann avait pressenti qu'il existe de même un quantum d'information. Ces constantes imposent à la physique une auto-discipline et assignent à son monde des « lignes d'horizon ».

Elles sollicitent l'imagination et appellent le progrès de la connaissance. Reste à intégrer dans la pensée des physiciens celle de la théorie quantique de la gravitation que découvrit Newton pour dessiner une véritable cosmogonie scientifique. Découvrons-nous demain de nouvelles constantes du même type ? Rien n'interdit de le penser, mais alors ce monde, « notre » monde, changera une nouvelle fois de visage.

Physicien au département de physique des particules élémentaires du CEA (Saclay), Gilles Cohen-Tannoudji est le co-auteur de deux livres de vulgarisation qui ont connu un grand succès : *La Matière-espace-temps* en collaboration avec Michel Spiro et *L'Horizon des particules* en collaboration avec Jean Pierre Baton.

23-4685-6

91-X

79,00 FF TTC



9 782010 172854

