



Comment **EINSTEIN**
a changé le monde

JEAN-CLAUDE BOUDENOT
Préface de Claude Cohen-Tannoudji

Comment Einstein a changé le monde

Comment Einstein a changé le monde

Jean-Claude BOUDENOT

Préface de Claude COHEN-TANNOUDJI



7, avenue du Hoggar
Parc d'Activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Illustration de couverture : Photographie d'A. Einstein.
© Hulton Archive / Stringer.

ISBN : 2-86883-763-8

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

© EDP Sciences 2005



À la mémoire de mon père



Préface

C'est en 1905, son « année miraculeuse », qu'Einstein a publié plusieurs articles qui ont été à l'origine de pratiquement tous les développements de la physique du vingtième siècle. Pour célébrer cet anniversaire, l'année 2005 a été déclarée par l'ONU « année internationale de la physique ». L'œuvre d'Einstein, au cœur des bouleversements scientifiques et technologiques qui marquent l'histoire de l'humanité, sa fascinante personnalité, la haine dont il a été l'objet dans la tourmente des années trente et quarante en font une véritable figure emblématique : les physiciens, les historiens et les philosophes sont loin d'avoir dressé l'inventaire complet de l'immense héritage qu'il nous lègue. Plus modestement, l'intention de cette année internationale de la physique est de prendre appui sur le prestige qui s'attache au père de $E=mc^2$ pour s'adresser à un large public et l'amener à s'interroger sur les finalités et les enjeux, les difficultés, voire les risques de l'aventure scientifique. L'ouvrage de Jean-Claude Boudenot participe pleinement de cette intention. Après quelques rapides, mais précises indications sur la biographie d'Einstein, il s'attache à faire le point des trois domaines de la physique qui ont été profondément marqués par les contributions du jeune Einstein : la théorie de la relativité, celle des quanta et la conception atomique du monde. Pour chacun de ces domaines, Jean-Claude Boudenot retrace l'histoire des idées et des problématiques qui faisaient débat parmi les physiciens du début du vingtième siècle ; il met en évidence ce qui est la marque distinctive d'Einstein, l'audace avec laquelle il enchaîne ruptures épistémologiques et remises en causes fondamentales et enfin il montre l'immense fécondité de ces avancées,



une fécondité qui encore actuellement est riche de nouveaux développements. Dans le domaine qui est le mien, celui de la manipulation des atomes et des fondements de la théorie des quanta, cet ouvrage m'a permis de prendre la mesure du chemin parcouru, en particulier grâce à l'apport d'Einstein, depuis le temps où des physiciens et philosophes d'inspiration positiviste niaient l'existence même des atomes et où la découverte des quanta d'énergie ressemblait à un défi au bon sens, jusqu'aux perspectives qu'ouvrent aujourd'hui les recherches sur les condensats de Bose-Einstein, sur les lasers à atomes et sur l'information quantique.

Claude Cohen-Tannoudji



Sommaire

Préface	5
Introduction	9
1 – Einstein, l’homme du siècle	13
Enfance et années d’études	13
Premières recherches	16
1905 : l’année miraculeuse	18
Professeur à Berlin	23
Einstein médiatisé	26
Einstein, père de la bombe ?	28
Dernières années	30
2 – 1905 : un tournant décisif	33
L’héritage de Newton	33
XIX ^e siècle : le siècle de la science	38
La physique en révolution	41
Les premiers pas d’Einstein en physique	42
3 – $E = mc^2$, déjà un siècle	45
L’origine de l’équivalence masse-énergie	45
Einstein annonce l’équivalence masse-énergie	48
Première vérification de l’équivalence masse-énergie	50
Une conséquence surprenante : l’antimatière	53
$E = mc^2$ au quotidien : de l’énergie nucléaire à la médecine	57
4 – Des atomes à l’infiniment petit	63
Les atomes : une bataille de cent ans	63
Robert Brown, un botaniste au service de la physique	66
Einstein interprète le mouvement brownien	69
Vérifications expérimentales	73



Les atomes aujourd'hui	75
Des atomes aux particules fondamentales	78
5 – La relativité restreinte dans l'air du temps	83
Des faits troublants	83
Qu'est ce que la relativité ?	88
Le temps relatif !	93
La relativité : Einstein, Lorentz ou Poincaré ?	96
De riches applications	101
6 – La relativité générale et l'infiniment grand	103
Un coup de génie : la généralisation de la relativité	103
La relativité générale confirmée	108
La relativité générale au service de l'astrophysique	116
La relativité au service de la cosmologie	122
7 – Un siècle de quanta	135
Une constante encombrante	135
L'interprétation d'Einstein	138
Vers un monde discontinu	141
Vers un monde dual	143
Des usines à photons, les lasers	149
Un nouveau type de laser, le laser à atomes	155
Quelques autres conséquences de la mécanique quantique	158
8 – 2005, vers une nouvelle ère	163
Résumons-nous	163
Le modèle standard	167
Vers l'unification	172
Liste des noms cités	177
Prix Nobel de physique (1901-2004)	181
Remerciements	187



Introduction

Einstein, l'homme du siècle

Lorsque Albert Einstein rencontra Charlie Chaplin, il s'exclama : « *Vous êtes célèbre car tout le monde vous comprend, je le suis car personne ne me comprend !* » L'immense célébrité d'Einstein est en effet très surprenante en regard de ses travaux, certes fondamentaux, mais réservés a priori à un cercle restreint de physiciens théoriciens. La médiatisation d'Einstein est peut être liée à l'objet même de ses recherches : « *Je veux savoir comment Dieu a créé ce monde, je ne m'intéresse pas à tel ou tel phénomène, au spectre de tel ou tel élément : Je veux connaître Ses pensées, le reste n'est que détail.* » Ainsi peut-on suggérer que la célébrité d'Einstein est plus une affaire de religion que de science. Il s'est posé la question que tout le monde se pose ; pourquoi le monde existe t-il, d'où vient-il, pourquoi sommes-nous là pour poser ces questions ? Le magazine *Time* a fait une longue enquête pour savoir quel est la personne ayant le mieux personnifié le XX^e siècle ; Freud, Gandhi, Churchill, Hitler, Einstein, Mao, Picasso, Marilyn Monroe, le Ché, Roosevelt, Martin Luther King, mère Térésa, Jean-Paul II, Margaret Thatcher, l'Imam Khomeyni, Gorbatchev, Nelson Mandela, Bill Gates, la Princesse Diana ? Le résultat a été Einstein. Ce magazine s'est ensuite posé la question de savoir quelles auraient pu être les « personnes du siècle » pour chacun des siècles du deuxième millénaire. Il est intéressant d'examiner la liste proposée : William le conquérant (XI^e siècle) ; Saladin (XII^e siècle) ; Genghis Khan (XIII^e siècle) ; Giotto (XIV^e siècle) ; Gutenberg (XV^e siècle) ; la Reine Elizabeth I (XVI^e siècle) ; Newton



(XVII^e siècle) ; Jefferson (XVIII^e siècle) ; Edison (XIX^e siècle). Il est admirable d'y voir apparaître Newton ; ainsi les deux plus grands physiciens de tous les temps (qu'il serait difficile de départager) sont des « hommes du siècle ».

Des centaines de biographies ont été consacrées à Einstein, ses travaux, sa vie et sa pensée ont été analysés dans les moindres détails. Il faut toutefois savoir qu'une biographie d'Einstein écrite dans les années 60 n'est pas comparable à une biographie publiée dans les cinq dernières années. La raison en est simple ; à la mort d'Einstein ses archives ont été gérées par ses légataires ; Helen Dukas, sa fidèle secrétaire, et Otto Nathan, son ami proche. Les informations filtrées ont permis de construire patiemment une image légendaire et il était hors de question de laisser « transpirer » telle ou telle information qui aurait pu affecter l'aura du grand homme. C'est ainsi qu'il a fallu attendre 1986 pour découvrir, suite à la publication de la correspondance entre Albert Einstein et Mileva Maric (sa future femme), qu'ils avaient eu en janvier 1902 une fille, Lieserl, dont on a ensuite complètement perdu la trace. La dernière mention de Lieserl se trouve dans une lettre qu'Albert écrit à Mileva en septembre 1903 : « *Cela me fait de la peine de voir ce qu'il arrive à Lieserl. La scarlatine peut laisser si facilement des séquelles. Si seulement cela pouvait passer. Sous quel nom l'enfant est-elle enregistrée ? Il nous faut veiller à ce qu'elle ne rencontre pas de difficultés plus tard* ». Plus d'un siècle après, le mystère demeure entier ; aucun certificat, de naissance ou de décès, n'a été retrouvé ; est-elle morte en bas âge, a-t-elle été adoptée, ses parents l'ont-ils revue ? Personne ne le sait.

À la mort des légataires, les archives ont été transférées, suivant les vœux d'Einstein, à l'université hébraïque de Jérusalem. En 1981, plus de vingt-cinq ans après la mort d'Einstein, le travail historique a pu être approfondi ; plus de 50 000 documents sont maintenant rassemblés. Une partie de ce fond est en cours de publication, ce sont les *Collected Papers of Albert Einstein*, huit volumes ont déjà été édités, il en est prévu vingt-neuf au total. Peu de personnages historiques auront fait l'objet d'une analyse aussi détaillée, et une telle entreprise n'est réservée qu'à un homme ayant profondément marqué son siècle.

L'année miraculeuse 1905 toujours d'actualité

L'UNESCO (Organisation des Nations unies pour l'éducation, la science et la culture) a déclaré l'année 2005 « année mondiale de la physique » car elle correspond au centenaire de « l'année miraculeuse » d'Einstein. Albert Einstein a en effet annoncé, en 1905, trois découvertes majeures qui étaient destinées à modifier profondément cette science. Cette année 1905 a marqué une rupture dans notre façon de voir le



monde, c'est la fin d'une période – qui a commencé avec Galilée et Newton – et le début d'une nouvelle ère. En physique lorsque l'on se réfère à l'époque pré 1905 on parle de « physique classique » sans pour autant donner de qualitatif aussi net pour la période suivante (le terme de « physique moderne » vieillit mal). Disons que les trois points majeurs de cette nouvelle physique sont l'abandon de l'espace et du temps absolus, l'abandon de la continuité et la découverte de l'aspect dual de la nature (la nature nous apparaît sous deux aspects antagonistes et complémentaires : l'aspect ondulatoire et l'aspect corpusculaire). L'objectif de ce livre est de présenter cette triple rupture et de montrer comment ces nouvelles idées se prolongent un siècle plus tard.

Il nous faut d'abord découvrir Einstein, l'auteur de cette triple révolution. Nous retracerons au premier chapitre les principales étapes de la vie du grand savant en insistant naturellement sur son année miraculeuse. Pour bien comprendre en quoi les idées qu'il a introduit en 1905 sont « révolutionnaires », il nous faut connaître les idées physique de l'époque, fondées sur l'héritage de Newton, ce sera l'objet du second chapitre. Nous commencerons alors notre voyage vers une terre miraculeuse. La première étape (chapitre 3) sera consacrée à la formule la plus connue au monde, $E = mc^2$: la fameuse équivalence entre la masse et l'énergie. Nous verrons l'histoire tourmentée de la naissance de cette formule, puis une de ses conséquences les plus étranges : l'existence d'anti-matière, avant de faire découvrir quelques unes des innombrables applications de cette formule mythique, en particulier celle de pouvoir lire ce texte grâce à un éclairage électrique d'origine nucléaire ! Dans le chapitre suivant (chapitre 4) nous découvrirons la lente émergence de la notion d'atome et sa consécration par l'interprétation d'Einstein d'une observation faite trois quart de siècle plus tôt par un botaniste écossais. Nous verrons également que nous sommes aujourd'hui capables non seulement de voir les atomes mais aussi de les manipuler, ce qui ouvre d'immenses horizons pour les nouvelles technologies, justement appelées nanotechnologies. Nous explorerons enfin la matière du côté de l'infiniment petit et ce voyage nous entraînera à la découverte du confin de nos connaissances actuelles dans ce domaine : les particules élémentaires ... un milliard de fois plus petites que l'atome. Il sera alors grand temps d'aborder la fameuse théorie de la relativité. Nous présenterons au chapitre 5 la relativité dite restreinte. Nous verrons que cette théorie était dans l'air du temps : la physique voyait depuis près d'une quarantaine d'années les difficultés s'amonceler, elles étaient liées à ce que l'on appelait « la crise de l'éther ». Nous découvrirons l'apport essentiel de deux autres physiciens : Lorentz et Poincaré, puis nous voguerons vers les flots des conséquences étranges, comme la dilatation du temps, ou pratiques de

cette théorie. À peine la théorie de la relativité restreinte achevée, Einstein s'est mis en quête de sa généralisation qui allait le conduire à l'élaboration de la plus belle des théories de la physique, la relativité générale. Nous la découvrirons au chapitre 6 : d'abord sa naissance, ensuite sa confirmation, qui allait propulser Einstein au sommet de sa gloire, et enfin son utilisation pour comprendre l'infiniment grand, pour essayer de connaître l'Univers dans son entier, sa naissance et bien sûr son avenir. Un autre volet de la physique nous attend, tout aussi riche, mais très différent : celui des quanta, ces petits grains de lumière qui allaient enrayer toute la physique classique d'une manière beaucoup plus profonde et, disons-le, beaucoup plus gênante. Nous plongerons donc au chapitre 7 dans l'univers impitoyable des quantas. Nous découvrirons leur introduction par un autre très grand physicien allemand, Max Planck, leur interprétation par Einstein et leur innombrables conséquences à l'origine, selon le physicien John Wheeler du tiers du produit national brut des États-Unis. Le chapitre 8 est le dernier, il marque la fin du voyage, ou plutôt le début d'un autre. Nous ferons le point sur l'état actuel de la physique, son « modèle standard », le paysage officiel de la physique en quelque sorte, et sur les enjeux de ce nouveau siècle. Ces dernières années ont été très riches avec des découvertes spectaculaires, comme celle de la masse des neutrinos ou de l'accélération de l'expansion de l'Univers qui constituent autant de faille dans ce modèle standard et autant d'espoir pour une nouvelle physique pleine de surprise. Cette physique se construira probablement autour du mariage tant attendu entre les quanta et la relativité générale, ces deux enfants d'Einstein.



1

Einstein, l'homme du siècle

Enfance et années d'études

Les origines et la petite enfance d'Einstein nous sont décrites dans une courte biographie (dont seuls des extraits ont été publiés dans les *Collected Papers*)¹ que Maja Winteler-Einstein a écrite sur son frère : « *Albert Einstein est né de parents juifs allemands, il était donc citoyen allemand, comme tous ses ancêtres connus. La famille Einstein est assez dispersée dans le sud de l'Allemagne, principalement dans le Wurtemberg et la Bavière, et par conséquent, comme c'est bien connu, les israélites se marient souvent avec des parents plus ou moins proches, les Einstein avaient des liens avec d'autres familles israélites du sud de l'Allemagne* ». Albert Einstein naît le 14 mars 1879 à Ulm et sa petite sœur Maja, deux ans plus tard, le 18 novembre 1881. Leur père, Hermann Einstein est décrit comme un homme calme et généreux, passionné de littérature et leur mère, née Pauline Koch, excellente pianiste, donna à ses enfants le goût de la musique ; Albert jouera du violon toute sa vie, et Maja du piano. « *Il régnait dans la famille un climat libéral, tolérant au niveau religieux. Les deux parents avaient eux-mêmes été élevés dans cet esprit. On ne parlait ni de problèmes ni de préceptes religieux* ».

¹ Les « *Collected Papers* » ont été rapidement présentés en introduction, huit volumes ont déjà été édités, il en est prévu vingt-neuf au total.



Le jeune Albert est profondément impressionné par le comportement de l'aiguille aimantée d'une boussole ; il dira plus tard *qu'il vécut un miracle... lorsqu'à quatre ou cinq ans son père lui montra une boussole*. Plus tard, son oncle Caesar Koch lui fait découvrir les mathématiques de façon amusante. Tandis qu'à 12 ans il dévore un vieux livre de géométrie, son séjour au lycée Luitpold, où règne la stricte discipline allemande de cette époque, se termine par un renvoi. Voici comment Einstein, dans une lettre datant de 1940, retrace cet événement : « *En terminale au Luitpold Gymnasium mon professeur de grec me convoqua pour exprimer son désir de me voir quitter le lycée. Comme je lui faisais remarquer que je n'avais rien fait de mal, il se contenta de me répondre « vous altérez le respect de la classe à mon égard par votre seule présence ». Assurément, j'avais moi-même une furieuse envie de quitter le lycée pour suivre mes parents en Italie* ». (Le Luitpold Gymnasium a été détruit pendant la seconde guerre mondiale, puis reconstruit et rebaptisé Albert Einstein Gymnasium !) Les parents du jeune Albert avaient quitté en 1894 l'Allemagne pour l'Italie, à la recherche d'affaires plus florissantes. Einstein décide alors, au printemps 1895, de rejoindre sa famille à Pavie.

À l'automne, il se présente au Polytechnikum (ETH) de Zurich, mais malgré d'excellentes notes en mathématiques et en physique, il échoue à l'examen d'entrée. Il décide alors de passer un an à l'École Cantonale d'Aarau (Suisse) et habite pendant cette période chez l'un de ses professeurs, Jost Winteler. Sa sœur Maja rapporte qu'Albert considérait que son séjour à Aarau avait non seulement été très instructif, mais aussi qu'il avait été une des plus heureuses périodes de sa vie. Einstein y a en effet trouvé un climat intellectuel favorable, ouvert, où les étudiants, contrairement à ce qu'il avait connu en Allemagne, étaient inciter à penser et à travailler par eux-mêmes. De plus c'est à Aarau que le jeune Albert connu sa première idylle amoureuse en la personne de Marie Winteler, la fille de son professeur.

C'est au Polytechnicum de Zurich qu'Einstein fera ses études d'octobre 1896 à juillet 1900.
© Image Archive ETH-Bibliothek, Zurich.



Muni de son diplôme d'Aarau, il entre – sans examen cette fois – au Polytechnikum et s'installe fin octobre 1896 à Zurich. Cette ville accueillait alors une foule cosmopolite d'étudiants, de révolutionnaires émigrés et de jeunes gens qui avaient fui l'oppression nationale ou sociale qui régnait dans leur pays. Citons parmi eux Rosa Luxembourg, Mussolini et Lénine. C'est dans cette ville qu'Einstein rencontrera sa future femme, Mileva Maric, jeune Slave révoltée contre la domination magyare en Hongrie ainsi que Friederich Adler, fils du leader de la « Sociale-Démocratie » à Vienne et d'autres étudiants qui deviendront des amis pour la vie, comme Conrad Habicht et Marcel Grossmann. Einstein est bien sûr content d'entrer à l'ETH, mais il redoute un peu ce qui l'attend. Durant l'été 1896, il se confie à son oncle Caesar Koch : « *Comme tu le sais, je dois maintenant entrer au Polytechnikum de Zurich. Je crains de rencontrer d'énormes difficultés car je devrais avoir au moins deux ans de plus pour cela. Je t'indiquerai dans ma prochaine lettre la façon dont cela se passe* ». Einstein n'apprécie pas son professeur de physique, Heinrich Friedrich Weber, qui le lui rend bien (Einstein écrira plus tard à un ami, sur un ton tout à fait inhabituel chez lui : « *La mort de Weber est un bienfait pour l'ETH.* ») et préférera étudier la physique par lui-même et avec ses amis. Ses professeurs de mathématiques sont des savants reconnus : Adolf Hurwitz et Hermann Minkowski. Ce dernier jouera d'ailleurs plus tard un rôle important en relativité, puisque c'est à lui que l'on doit la notion d'*espace-temps* à quatre dimensions. Mais l'étudiant Einstein ne suit qu'« irrégulièrement » ses cours, et Minkowski le considère à l'époque comme un « je-m'en-foutiste ». Einstein indique lui-même dans ses notes autobiographiques qu'il « *séçait beaucoup et étudiait chez lui, avec un zèle religieux, les maîtres de la physique théorique* ».

Parmi ses condisciples se trouvent Marcel Grossmann (qui deviendra mathématicien et qui, des années plus tard, aidera Einstein dans la formalisation de la relativité générale) et Mileva Maric. Mileva est l'une des premières femmes à être admises au Polytechnicum² ; étrangère de surcroît, elle doit à son excellent parcours scolaire et à sa ténacité cette réussite exemplaire. Née en 1875 à Titel (au sud de la Hongrie), elle obtient une dispense spéciale pour assister aux cours de mathématiques et de physique dans un lycée de garçons de Zagreb, puis commence son cursus universitaire par des études médicales à Heidelberg avant de rejoindre la Suisse. Mileva souffre d'un handicap ; elle claudique et en souffre. Elle parle de son *insatisfaction que lui inspire son apparence, qui suscite tantôt une pitié blessante, tantôt la raillerie*. Son visage doux, son sourire énigmatique, son intelligence et sa passion pour les mathématiques, séduisent Einstein. En 1899, la complicité

² La cinquième.



intellectuelle se transforme en liaison amoureuse. C'est également à cette époque qu'Einstein rencontre Michele Besso (la seule personne qui sera citée par Einstein dans l'article fondateur de la relativité). Leur amitié durera toute leur vie. La correspondance d'Einstein avec Mileva d'une part, Michele Besso d'autre part se révélera précieuse car elle a permis de reconstruire partiellement le cheminement intellectuel qui a conduit Einstein à son année miraculeuse de 1905, nous y reviendrons plus bas ainsi qu'au chapitre 2.

Einstein obtient son diplôme de l'ETH en 1900, mais malgré ses excellentes notes et ses efforts, il n'obtient pas de poste d'assistant (contrairement à ses autres camarades), il semble que son professeur de physique Weber y ait été pour quelque chose. Mileva, quant à elle, échoue de peu en 1900 à son concours de fin d'études. Quand Einstein revient chez ses parents, sa mère lui demande : *Bon et Dockerl* (le surnom de Mileva) *que devient-elle ?* Albert répond du tac au tac : *ma femme*. Einstein subit alors une « scène » à laquelle il s'attendait, car depuis le début, ses parents voyaient d'un très mauvais œil sa liaison avec cette jeune progressiste serbe, qui boitait et qui, de surcroît, n'était pas juive. Sa mère ajoute : « *Si elle a un enfant, tu seras dans de beaux draps* ». Mais Albert ne se laisse pas impressionné, il écrit à Mileva : « *Comme je suis heureux d'avoir trouvé en toi mon égal, aussi forte et indépendante que moi !* » L'année suivante, Mileva repasse l'examen, mais c'est de nouveau l'échec, elle ne sera jamais diplômée. Pourquoi un tel échec pour cette jeune fille brillante et déterminée ? Il faut, sans doute, en rechercher la cause dans le fait qu'elle s'aperçoit, peu avant ses examens, en mai 1901, qu'elle attend un enfant.

Premières recherches

Début 1901, Einstein est sans emploi, mais malgré la situation très précaire du jeune couple officieux, Albert et Mileva se passionnent pour la physique. C'est à cette époque qu'Einstein publie son premier article (sur la capillarité) et devient citoyen Suisse – nationalité qu'il gardera toute sa vie – il parlera toujours de la Suisse comme « *du plus beau coin qu'il connaisse sur terre* ». En physique, son intérêt se tourne rapidement vers la physique statistique³. Il écrira lui-même plus tard, au sujet de ses

³ Le but de la physique statistique est d'expliquer les propriétés macroscopiques (i.e. à grande échelle) de la matière à partir des lois de la physique appliquées à l'échelle des atomes et des molécules. Compte tenu des nombres énormes qui entrent en jeu (il y a environ mille milliards de milliards de molécules dans un gramme d'eau), il faut avoir recours à des techniques statistiques, d'où le nom de cette branche de la physique.



premières recherches (celles d'avant 1905) : « *Ne connaissant pas les recherches de Boltzmann et de Gibbs, qui avaient été effectuées plus tôt et avaient littéralement épuisé le sujet, j'entrepris de développer la mécanique statistique et, à partir d'elle, la théorie cinétique moléculaire de la thermodynamique. Mon but principal était de trouver des faits prouvant autant que possible l'existence d'atomes de dimension précise et finie* » (cette quête de la notion d'atomes est au cœur de l'actualité physique du début du XX^e siècle, nous reviendrons sur les contributions essentielles d'Einstein dans ce domaine au chapitre 4). Toujours à la recherche d'un poste, Einstein écrit en avril 1901 au physicien hollandais Heike Kamerlingh Onnes à Leyde (c'est lui qui réussira à liquéfier l'hélium – le dernier des gaz rares – et qui découvrira la supraconduction), mais n'obtient pas de réponse. Einstein n'a que vingt deux ans et profite de son temps libre pour poser les premières pierres aux travaux qui feront sa gloire. Il écrit à la fin de l'année 1901 à Mileva (qui était retournée chez ses parents) qu'il lui « *est venu une autre idée, d'une grande importance scientifique, sur les forces moléculaires* ». Ses réflexions sur ce qui allait devenir la théorie de la relativité date également de cette époque ; il indique à Mileva – toujours en 1901 – qu'il « *travaille d'arrache-pied à une électrodynamique des corps en mouvement qui promet de devenir un article capital et qu'il a maintenant l'intention d'étudier ce que Lorentz et Drude ont écrit sur ce sujet* ».

En janvier 1902, Mileva donne naissance à la petite Lieserl. Einstein qui est à Berne a hâte de prendre sa fille dans ses bras et confie à Mileva : « *Je l'aime tant et je ne la connais pas encore !* » La situation est précaire, Albert vit de quelques suppléances dans des lycées. Finalement, grâce au père de son camarade Marcel Grossmann, il obtient en juin 1902 un poste à l'Office Fédéral des Brevets à Berne et, le 6 janvier 1903, malgré la forte opposition des parents respectifs, Albert Einstein épouse Mileva Maric. À Berne, le jeune couple parle physique et philosophie lors de dîners avec leurs amis : Michelle Besso et sa femme, Maurice Solovine et Conrad Habicht. Mileva participe aux travaux scientifiques, et à l'un des frères Habicht qui lui demande pourquoi elle n'a pas mentionné son nom à une demande de brevet, elle répond : « *A quoi bon ? nous ne faisons plus, tous les deux, qu'une seule pierre (« Ein Stein »).* » Le trio formé par Albert Einstein, Maurice Solovine et Conrad Habicht baptise par dérision leurs réunions *Académie Olympia*. Cinquante ans plus tard, Einstein dira de cette Académie Olympia : « *Vos membres vous ont créée pour moquer vos sœurs bien assises. Combien cette moquerie visait juste, c'est ce que de longues années d'observation attentive m'ont permis d'apprécier pleinement !* » Le travail d'Einstein au bureau des brevets ne le détourne pas de ses préoccupations scientifiques, il écrit au début 1904 une lettre à son ami Grossmann : « *Il y a entre nous une étrange ressemblance. Nous aussi nous*



aurons le mois prochain de la progéniture. Et tu recevras un texte de moi que j'ai envoyé il y a une semaine à Wiedemann pour ses annales (annalen der physik⁴). Tu travailles à une géométrie sans axiome des parallèles, moi à une chaleur atomique sans hypothèse cinétique... » Hans Albert Einstein naîtra cette même année, le 14 mai, quant au texte évoqué par Einstein, il lui servira de mémoire de thèse.

Albert Einstein, sa femme Mileva et leur fils Hans Albert (né en 1904) dans leur appartement de Berne.

© Courtesy of The Albert Einstein Archives, The Hebrew University of Jerusalem.



1905 : l'année miraculeuse

1905 est véritablement l'*annus mirabilis* d'Albert Einstein ; sur les six articles qu'il publie cette année-là, quatre vont devenir immortels. Einstein écrit à son collègue Conrad Habicht en début d'année : « Je te promets en échange quatre articles dont le premier est très révolutionnaire. »

Ce premier article, envoyé le 17 mars 1905 à l'éditeur (et publié le 9 juin), est intitulé : « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. » En y donnant l'interprétation quantique de l'effet photoélectrique, Einstein introduit une véritable révolution en physique : il introduit l'idée que l'énergie a une structure granulaire, quantifiée. Einstein ose l'incroyable ; les ondes elles-mêmes seraient quantifiées. Après les succès remportés par la théorie ondulatoire de la lumière par Young, Fresnel, Arago, Fizeau depuis un siècle et depuis l'admirable synthèse de Maxwell entre l'optique

⁴ Les *Annalen der physik* sont une revue très renommée qui a été fondée en 1790. Wiedemann en a été le responsable entre 1877 et 1899, de sorte que pendant cette période elles se sont également appelées *Annales de Wiedemann*. Paul Drude a pris sa succession de 1900 à 1906, puis les annales ont été dirigées par Wilhelm Wien et Max Planck de 1907 à 1928.

et l'électromagnétisme confirmée vingt ans plus tard par Hertz, un jeune inconnu peut-il remettre en question tous ces résultats fondamentaux et revenir deux siècles en arrière, c'est-à-dire à l'hypothèse corpusculaire de la lumière évoquée par Newton dans son *Optics* de 1704 ? Non pas tout à fait. C'est pourquoi Einstein parle d'un *point de vue heuristique*. En un mot, son approche est utilitaire, sa démarche permet simplement d'expliquer les phénomènes décrits de façon synthétique. Pourtant, au fond de lui-même, Einstein sait qu'il introduit un concept *révolutionnaire*. Ce mot n'est pas trop fort quand on sait la réticence que les physiciens auront à adopter cette idée. Le grand Max Planck, celui-là même qui a introduit à la fin de l'année 1900 la notion de quanta en physique par l'étude du rayonnement du corps noir, écrira huit ans plus tard, en 1913, dans une lettre appuyant la candidature d'Einstein à l'Académie des sciences de Berlin : « *En bref, on peut dire que, parmi les grands problèmes dont la physique moderne abonde, il n'en est guère qu'Einstein n'ait marqué de sa contribution. Il est vrai qu'il a parfois manqué le but lors de ses spéculations, par exemple avec son hypothèse des quanta lumineux ; mais on ne saurait lui en faire le reproche...* » Cette notion de quanta de lumière ne sera finalement vraiment admise dans la communauté des physiciens qu'au début des années 1920. C'est d'ailleurs pour cette découverte fondamentale, et non pour la relativité restreinte, qu'Einstein recevra, en 1922 (au titre de l'année 1921), le prix Nobel de physique : « *Pour ses contributions à la physique théorique et particulièrement pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique.* » Nous reviendrons sur les quanta et leur immense domaine d'application au chapitre 6.

Le deuxième article est prêt fin avril, il s'intitule : « *Une nouvelle détermination des dimensions moléculaires.* » Il porte sur l'obtention du nombre d'Avogadro, c'est-à-dire sur le dénombrement du nombre d'atomes, ou de molécules, dans un volume donné. Cet article va lui servir de mémoire de thèse. L'histoire de la thèse d'Einstein commence en 1901 et mérite d'être contée. Cette année-là, Einstein rédige un mémoire de recherche en thermodynamique, mais le Professeur Kleiner le refuse comme thèse. En 1903, il écrit à son ami Michele Besso : « *Je ne préparerai pas le doctorat toute cette comédie m'est devenue fastidieuse.* » Toutefois, Einstein transmet, le 20 juillet 1905, à l'université de Zurich un mémoire dont il a complété la rédaction entre 1904 et avril 1905, en espérant qu'il sera cette fois accepté, mais Kleiner le jugeant trop court, le refuse de nouveau. Finalement, Einstein le lui re-soumet allongé d'une phrase, et cette fois son mémoire est accepté ! D'un point de vue scientifique, sa valeur est considérable et ce mémoire de thèse sera la publication écrite par Einstein la plus citée.

Le troisième article est consacré au mouvement brownien, c'est-à-dire à une manifestation macroscopique de l'existence des atomes. Il est



enregistré aux *Annalen der Physik* le 11 mai, et s'intitule : « *Sur le mouvement de particules en suspension dans les fluides au repos requis par la théorie cinétique moléculaire de la chaleur* ». Le terme, mouvement brownien, ne figure pas dans le titre et Einstein s'en explique dans son introduction : « *Il est possible que les mouvements examinés ici soient identiques au mouvement moléculaire dit brownien mais les références dont je dispose sur ce dernier sujet sont cependant trop imprécises pour que je puisse me former une opinion sur cette question.* » Cet article sera complété par un second mémoire, transmis à l'éditeur en décembre 1905, mais publié en 1906, sur la théorie statistique du mouvement brownien. Il faut retenir que le mouvement brownien est l'une des meilleures preuves directes de la réalité moléculaire et que les observations suggérées par Einstein seront effectivement réalisées avec une précision étonnante par le français Jean Perrin. Nous reviendrons au chapitre 4 sur cette naissance du concept d'atomes et de son prolongement actuel.

Le quatrième article est de loin le plus connu puisqu'il est considéré comme le texte fondateur de la relativité. Sous le titre très technique : « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* » se cache en effet l'une des théories les plus célèbres de la physique. Le texte d'Einstein parvient aux *Annalen der Physik* le 30 juin 1905. À la demande de Röntgen (découvreur des rayons X, premier prix Nobel de physique de l'Histoire et membre du *Kuratorium des Annalen der Physik*) Abram Ioffé examine l'article soumis et recommande sa publication. Notons que Ioffé rapporte dans ses souvenirs d'Albert Einstein que l'original, détruit depuis, était signé Einstein-Maric⁵. Pour la première fois depuis le début de son histoire, qui remonte à Galilée et Newton, les principes fondateurs de la physique sont remis en cause. La théorie d'Einstein se fonde sur deux postulats, c'est-à-dire sur deux hypothèses réputées fondamentalement vraies. Le premier est le postulat de relativité énoncé par Galilée au début du XVII^e siècle et suivant lequel « *le mouvement (rectiligne et uniforme) est comme rien* », le second est l'hypothèse de la constance de la vitesse de la lumière. Le problème est lié au fait que la juxtaposition de ces deux postulats entrent en conflit avec la mécanique classique bien établie depuis plus de deux siècles. Là où Poincaré prédit « *une mécanique entièrement nouvelle que nous avons seulement réussi à apercevoir* », Einstein crée cette mécanique.

⁵ Mileva Maric a t-elle contribué à l'élaboration de la relativité restreinte ? Nous n'en saurons probablement jamais rien. Ce qui est sûr, d'après la correspondance retrouvée entre Einstein et Mileva de 1897 à 1903, c'est que durant cette période ils ont échangé des idées sur les problèmes de physique de l'époque et, en particulier sur l'électrodynamique des corps en mouvement. Toutefois, on possède beaucoup plus de lettres d'Einstein à Mileva que de lettres de Mileva à Einstein (ce dernier ne les ayant probablement pas gardées), il n'est donc pas possible de se faire une opinion de la contribution de Mileva.

Nous examinerons au chapitre 5 les conséquences de la relativité sur notre perception du monde.

Trois mois après ce texte historique, Einstein transmet un cinquième article aux *Annalen der Physik*. Dans cet article intitulé : « *L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ?* » (reçu par l'éditeur le 27 septembre), il montre que si un corps libère une quantité E d'énergie sous forme de lumière, sa masse diminue d'une quantité E/c^2 : il s'agit donc de l'équivalence entre masse et énergie. Cette égalité $E = mc^2$ est universellement connue, Einstein ne pouvait pas imaginer en écrivant cet article, qu'un siècle plus tard, cette équation se retrouverait sur les tee-shirt des jeunes du monde entier, que l'on en ferait des films, des pièces de théâtre et qu'elle serait utilisée pour la publicité des choses les plus diverses (en général en concomitance avec la célèbre photo où il tire la langue) ! Cette équation a, du point de vue scientifique comme du point de vue pratique, de nombreuses applications que nous examinerons au chapitre 3.

Quant au sixième article publié par Einstein en 1905 (le second sur le mouvement brownien), nous l'avons déjà cité. À l'évocation de ces publications mémorables, on pourrait croire aujourd'hui que les articles d'Einstein de 1905 ont fait l'effet d'une bombe dans le monde de la physique. Il n'en est rien. Maja Einstein, dans sa petite biographie consacrée à son frère, évoquée plus haut, nous indique comment Albert a vécu les mois suivant l'acceptation de son article (le plus en vue de 1905) sur l'électrodynamique des corps en mouvement : « *Le jeune savant pensait que sa publication dans cette revue illustre, connaissant une large audience, attirerait immédiatement l'attention. Il s'attendait à une vive opposition et aux critiques les plus sévères. Il fut très déçu. La parution de son article fut suivie d'un silence glacial. Les numéros suivants de la revue n'en firent aucune mention. Les milieux professionnels se cantonnèrent dans l'expectative. Quelques temps plus tard, Albert Einstein reçut une lettre de Berlin. Elle était envoyée par le célèbre professeur Planck qui demandait des éclaircissements sur certains points lui semblant obscurs. Après une longue attente, ce fut le premier signe indiquant que son article avait été lu. Le jeune scientifique éprouva une joie particulièrement grande du fait que la reconnaissance de ses travaux provenait de l'un des plus éminents physiciens de l'époque.* »

Durant l'été 1907, Max Planck passe ses vacances dans l'Oberland bernois et décide d'aller rencontrer Einstein chez lui. Il lui écrit, le 6 juillet 1907 : « *Je me réjouis à l'idée que j'aurai peut-être alors le plaisir de faire votre connaissance.* » Les « relativistes » sont à cette époque très peu nombreux, c'est pourquoi Planck ajoute dans cette même lettre : « *Tant que les défenseurs du principe de relativité formeront un cercle aussi réduit,*



Années miraculeuses : le parallèle Einstein-Newton

Comme Einstein, Newton a connu des années miraculeuses. Les *anni mirabiles* de Newton sont celles de 1665 et 1666.

Tandis que c'est à Berne qu'Einstein a développé en 1905 la théorie du photon, celle du mouvement brownien et la relativité restreinte, c'est à Woolsthorpe, petit hameau du Lincolnshire où il est né, que Newton développa ses idées sur le calcul différentiel, la décomposition de la lumière blanche, et la théorie de la gravitation universelle. Il en fait lui-même le récit :

« Au début de l'année 1665, j'ai trouvé la méthode des séries approximantes et la règle pour réduire tout ordre de tout binôme en une telle série. La même année au mois de mai, j'ai trouvé la méthode des tangentes de Grégoire et Slusius, et en novembre, j'avais la méthode directe des fluxions et l'année suivante en janvier j'avais la théorie des couleurs, et en mai j'accédais à la méthode inverse des fluxions. La même année, j'ai commencé à penser à l'extension de la gravité à l'orbite de la lune et (après avoir trouvé comment estimer la force avec laquelle un globe en révolution à l'intérieur d'une sphère presse la surface de la sphère) à partir des règles de Kepler sur la période de révolution des planètes qui se trouvent en proportion sesquialtère de leurs distances au centre de leurs orbites, je déduisis que les forces qui maintiennent les planètes dans leurs orbites doivent être comme l'inverse des carrés de leurs distances aux centres autour desquels elles effectuent leur révolution ; et je comparais la force requise pour maintenir la lune dans son orbite à la force de gravité à la surface de la Terre, et découvris qu'elles se correspondaient de très près. Tout ceci se passa durant les deux pestes de 1665-1666. Car à cette époque, j'étais à la fleur de l'âge de l'invention et pensais aux mathématiques et à la philosophie plus qu'il ne m'est jamais arrivé depuis. »

De la même façon, Einstein, dans une lettre qu'il écrit à Conrad Habicht en mars 1905, décrit de façon synthétique les travaux de son année miraculeuse :

« Je vous promets de vous envoyer quatre articles. Le premier traite de la radiation et de l'énergie lumineuses et il est très révolutionnaire. Mon second article discute les méthodes de détermination des dimensions réelles des atomes par l'étude de la diffusion et des frottements internes dans des solutions solides. Le troisième prouve, d'après la théorie moléculaire de la chaleur, que des corps en suspension dans un liquide et dont les dimensions sont de l'ordre de 0,001 mm, sont la proie de mouvements apparemment aléatoires dus au mouvement thermique des molécules. La quatrième étude est basée sur les concepts de l'électrodynamique des corps en mouvement et modifie la théorie de l'espace et du temps. »



Einstein était un grand admirateur de Newton. Lors du retour de son premier voyage aux États-Unis, en 1921, Einstein passa à Londres pour s'incliner sur la tombe du grand savant anglais enterré à l'abbaye de Westminster.

il leur sera doublement important d'être en accord avec eux. » Max Planck constitue en quelque sorte le centre de ce cercle. C'est lui qui sera le premier (en dehors d'Einstein lui-même) à publier un article sur la relativité, la première thèse de doctorat a été réalisée sous sa direction et la première monographie sur la relativité est l'œuvre de son assistant (et futur prix Nobel) Max von Laue. Planck fait également connaître très tôt la relativité aux physiciens allemands, ainsi il mentionne en ces termes cette théorie à la société de Physique de Berlin le 23 mars 1906 : « *Le principe de relativité, récemment énoncé par H.A. Lorentz, et généralisé par A. Einstein, impliquerait, s'il se vérifiait, une si prodigieuse simplification de tous les problèmes d'électrodynamique des corps en mouvement que la question de son admissibilité parmi les notions théoriques fondamentales mérite d'être posée.* »

Professeur à Berlin

Einstein commence à sortir de l'ombre en 1907. Il écrit, à la demande de Johannes Stark (futur prix Nobel de physique) un long article de synthèse sur la théorie de la relativité. Par ailleurs, c'est en 1907 qu'Einstein a, comme il le dit lui-même *l'idée la plus heureuse de sa vie* : celle du principe d'équivalence qui le met sur le chemin de la relativité générale (chapitre 5). Vers la fin de 1907, Einstein cherchant à devenir *Privatdozent* (maître de conférence) envoie à l'université de Berne, en guise de leçon inaugurale, indispensable à l'obtention du titre, son article de 1905 sur la relativité mais sa « leçon » est rejetée ! Il fait une seconde tentative en février 1908, et cette fois il est admis comme maître de conférence. La même année, sa sœur Maja, dont il est très proche, passe une thèse sur les langues romanes à l'université de Berne et obtient son doctorat en littérature avec la mention *magna cum laude*. Tout va donc bien à présent chez les Einstein, mais Albert aspire à un poste plus rémunérateur. L'occasion se présente en 1909 lorsqu'un nouveau poste de « professeur adjoint » de physique théorique est créé à l'université de Zurich. Friedrich Adler, ami d'Einstein, a les préférences du conseil, mais très élégamment, il retire sa candidature au profit d'Einstein. Ce dernier est donc élu le 7 mai 1909 à l'âge de 30 ans. En juillet, il présente sa démission au Bureau des Brevets, qu'il quittera effectivement le 15 octobre, son esprit est alors concentré sur le



prolongement de la relativité restreinte. Peu après, en mars 1910, sa sœur Maja, qui vit également en Suisse, épouse Paul Winteler, le fils de Jost Winteler, professeur à l'école cantonale d'Aarau qui avait hébergé Albert pendant son séjour.

La même année, en juillet, Albert et Mileva ont un second fils, surnommé Eduard mais qu'ils appelleront toujours Tede. Tede était un enfant tendre et gentil, doué d'un sens artistique profond, mais bientôt des troubles dans son comportement apparaissent. Dès 1929, il sera obligé de faire des séjours à l'hôpital psychiatrique Burghölzli de Zürich. En 1911, Einstein est nommé professeur à l'université Karl-Ferdinand de Prague. Il n'y restera qu'une année universitaire, puisqu'il est nommé en février 1912 professeur au Polytechnicum de Zürich qu'il avait quitté dix ans plus tôt sans obtenir le poste d'assistant qu'il briguait. Entre-temps, il assiste au premier Conseil Solvay (fin octobre, début novembre 1911) et c'est pour lui l'occasion de rencontrer les plus grands physiciens de l'époque parmi lesquels : Lorentz (qui préside le Conseil), Max Planck, Poincaré (c'est la seule occasion où Einstein rencontrera Henri Poincaré), Marie Curie, Paul Langevin, Jean Perrin, Rutherford. Einstein y expose son travail sur *L'état actuel du problème des chaleurs spécifiques*, qui est la toute première application de la physique quantique à un problème non lié à la lumière. En même temps Einstein travaille sur un autre front : la généralisation de la relativité mais la situation semble sans issue. Par chance, étant de retour à Zurich, il peut travailler avec son ami Marcel Grossmann, lui aussi professeur au Polytechnicum et mathématicien très versé dans la géométrie différentielle. Dans une lettre du 29 octobre 1912, Einstein écrit : « Je m'occupe exclusivement du problème de la gravitation, et je crois maintenant que je surmonterai toutes les difficultés avec l'aide d'un mathématicien d'ici. Il y a au moins une chose certaine, c'est que je n'avais jamais travaillé aussi dur de ma vie... À côté de ce problème, la première théorie de la relativité est un jeu d'enfant. » Peu après Planck et Nernst (futur prix Nobel de chimie) essaient d'attirer Einstein à Berlin, c'est pourquoi ils proposent sa nomination à l'Académie des sciences de Prusse (qui devient effective en juillet 1913) ainsi qu'un poste de professeur (sans obligation d'enseignement) à l'université de Berlin. Finalement, Einstein accepte et s'installe dans cette ville avec sa femme et ses enfants en avril 1914. Cependant, cette vie de famille sera de courte durée car des problèmes s'installent dans le couple. Albert et Mileva se séparent peu après et Mileva retourne à Zürich avec ses enfants. En 1915, les événements se précipitent et après une série d'articles, Einstein généralise le principe de relativité et publie les équations définitives du champ de gravitation le 25 novembre 1915. Malgré l'immense effort produit, Einstein poursuit ses travaux d'abord par un article de synthèse sur la relativité générale puis, au premier semestre 1916,



par un article sur les ondes gravitationnelles qui est en quelque sorte l'acte de naissance de la cosmologie moderne. Cet effort considérable n'empêche pas Einstein de travailler également sur la théorie quantique.

Au deuxième semestre 1916, il confère à la lumière une autre propriété corpusculaire (celle d'impulsion), réussit à démontrer la loi du corps noir de Planck par une approche entièrement nouvelle et introduit le concept d'émission stimulée qui donnera naissance plus de quarante ans plus tard au laser (Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation, c'est-à-dire lumière amplifiée par émission stimulée). C'est également en 1916 qu'Einstein succède à Planck à la présidence de la *Deutsche Physikalische Gesellschaft* (Société de physique allemande) et que l'Empereur Guillaume II signe sa nomination au conseil de direction de la *Physikalisch Technische Reichsanstalt*. Moins d'un an plus tard, il sera nommé directeur du très fameux Kaiser Wilhelm Institut (futur Institut Max Planck). Bien que mondialement célèbre dans les milieux scientifiques dès 1914, Albert Einstein est peu connu du public. Il sera « médiatisé » à partir de 1919 à la suite de la vérification de sa prédiction de la déviation des rayons lumineux au voisinage du soleil qui confirme sa théorie de la relativité générale dans ce qu'elle a de plus spectaculaire : la courbure de l'espace-temps.

Les Conseils Solvay

Les Conseils Solvay ont été fondés par Ernest Solvay, chimiste belge et inventeur en 1863 des méthodes industrielles de production de la soude. Convaincu que le bonheur des hommes ne pouvait provenir que de la diffusion du savoir, il a utilisé sa fortune pour créer des instituts internationaux de recherche en physiologie (1893), sociologie (1902), physique (1912) et chimie (1913). Les conseils Solvay de physique ont joué un rôle particulièrement important dans le développement de cette science au cours de la première moitié du XIX^e siècle. Les plus grands savants de l'époque se rencontraient dans un cadre informel et leur nombre était volontairement limité à une trentaine environ. C'est le physicien hollandais H.A. Lorentz, « véritable encyclopédie trilingue de physique », qui assura la présidence des cinq premiers Conseils de physique : *La théorie du rayonnement et les quanta* (1911) ; *La structure de la matière* (1913) ; *Atomes et électrons* (1921) ; *Conductibilité électrique des métaux et problèmes connexes* (1924) ; *Électrons et photons* (1927).



Max Planck remet en 1929 à Albert Einstein la médaille Planck. Dans son discours de remerciement, Einstein dira à Planck : « *Vous fûtes le premier défenseur de la théorie de la relativité* ».

© Courtesy of The Albert Einstein Archives, The Hebrew University of Jerusalem.



Einstein médiatisé

C'est Lorentz qui informe Einstein, le 22 septembre 1919, de cette vérification expérimentale. Le « *Times* » de Londres, dans son édition du 7 novembre 1919, titre en gros caractères : « **Une révolution scientifique. Une nouvelle théorie de l'Univers. Newton détrôné** ». Cette révolution scientifique est d'autant plus extraordinaire aux yeux du public que la théorie de la relativité générale semble être inaccessible. Ainsi, à la fin d'une conférence au cours de laquelle l'astronome Royal Eddington rapporte la confirmation de la prévision de la relativité, quelqu'un s'approche de lui et lui dit : « *Sir, vous devez être l'une des trois personnes au monde capable de comprendre la théorie de la relativité générale* », à quoi Eddington répond : « *Je me demande bien qui est la troisième !* » Cette même année 1919, Einstein divorce de Mileva Maric par consentement mutuel et promet à Mileva de lui remettre le montant de son prix Nobel... qui ne lui a pas encore été décerné ! Mais tous deux sont certains qu'il l'obtiendra un jour ou l'autre. Einstein reçoit effectivement, en 1922, le prix Nobel de physique de 1921 (lequel, cette année-là, n'a pas été attribué « faute de candidats présentés »). Il lui est décerné pour son interprétation de l'effet photoélectrique, c'est-à-dire pour ses travaux sur les quanta et non pour ceux sur la relativité.

Peu après son divorce, Einstein épouse, le 2 juin 1919, sa cousine Elsa Löwenthal. Les manifestations d'antisémitisme envers Einstein apparaissent à partir de 1920. Ainsi, le 19 septembre 1920, une discussion sur la théorie de la relativité généralisée dégénère en duel dramatique entre Albert Einstein et Philipp Lénard. Ce dernier lance des attaques caustiques et pernicieuses contre Einstein, sans dissimuler son antisémitisme. Max Planck, qui mène le débat, empêche heureusement une émeute. Einstein peut également compter sur le



soutien de Lorentz. Le physicien hollandais fait nommer Einstein professeur associé à l'université de Leyde, ce qui l'amène à passer, à partir d'octobre 1920, quelques semaines par an dans cette université. En avril et mai 1921, Einstein fait son premier voyage aux États-Unis. Le maire de New York organise pour lui une réception officielle comme pour un héros national et le président Harding le reçoit à la Maison Blanche. En mars 1922, grâce aux efforts de Paul Langevin, il vient en France et donne une série de conférences au Collège de France. En octobre de la même année, il part pour le Japon (c'est en route pour ce pays qu'il apprend que le Prix Nobel lui est décerné) et y reste six semaines.



Einstein donnant une conférence au Collège de France, en 1922, à l'invitation de Paul Langevin.
© Courtesy of The Albert Einstein Archives, The Hebrew University of Jerusalem.

À cette époque, Einstein travaille sur la théorie quantique, il dira d'ailleurs à son ami Otto Stern : « *J'ai réfléchi cent fois plus aux problèmes quantiques que je ne l'ai fait sur la théorie de la relativité générale.* » En 1923, la découverte de l'effet Compton assoit définitivement la notion de quantum de lumière (que le chimiste Lewis baptise photon en 1926) et, en 1924, Einstein travaille sur les fluctuations quantiques et aboutit à la statistique connue maintenant sous le nom de *Bose-Einstein* et découvre *la condensation d'Einstein* (chapitre 6). Cette période très riche est marquée par le cinquième Conseil Solvay de 1927. Jamais une telle assemblée de physiciens n'a été réunie ; sur vingt-neuf participants, dix sept sont ou seront lauréats du Prix Nobel. William Laurence Bragg (le plus jeune lauréat Nobel toutes disciplines confondues puisqu'il a obtenu le prix à l'âge de vingt-cinq ans) se souvient ainsi de ce Conseil : « *C'est la conférence la plus mémorable à laquelle il m'a été donné de participer.* » Les débats sont présidés par Lorentz, à ses côtés se trouvent Einstein, Planck, Marie Curie, Dirac, Compton, Louis de Broglie, Born, Bohr, Schrödinger, Pauli, Heisenberg, Langevin, Brillouin... On y discute des fondements de la mécanique quantique, les débats entre Einstein et Bohr sont restés justement célèbres.



En 1929, Einstein se rend en Belgique et rencontre la famille royale, dont la Reine Elizabeth, avec qui il restera toute sa vie l'ami. Dans les années 1930 et 1932, il fait deux séjours de trois mois aux États-Unis, essentiellement sur la côte ouest, à CalTech. Il est finalement nommé professeur à l'Institute for Advanced Study à Princeton en octobre 1932, son contrat stipulant qu'il partagera son temps de façon équitable entre Princeton et Berlin. En janvier 1933, lorsque Hitler prend le pouvoir en Allemagne, Einstein et sa femme Elsa se trouvent de nouveau aux États-Unis, à Pasadena. Einstein comprend qu'il lui est impossible de retourner en Allemagne et décide de séjourner en Belgique. Sur l'ordre du Roi, deux gardes du corps assurent sa protection pendant quelques temps, car le bruit court qu'on veut l'assassiner. Il fait quelques voyages : à Zürich, à Oxford (où l'on peut voir encore maintenant au musée d'histoire des sciences de cette ville, le tableau non effacé qu'il a utilisé pour faire sa conférence) et à Glasgow. À Zürich, Einstein rencontre pour la dernière fois son fils Eduard. Son état s'est empiré, une amie de Mileva rapporte qu'il est agité, très gros, il ne lit que des biographies de grands hommes, par exemple Napoléon, ou des pièces de théâtre indécentes.

À l'automne 1933, Einstein décide de quitter définitivement l'Europe. Le 17 octobre 1933, il arrive en Amérique. Roosevelt invite presque aussitôt les Einstein à venir passer la nuit à la Maison Blanche. C'est en 1935 qu'Einstein, sa femme et la fidèle secrétaire Helen Dukas (qui travaille pour lui depuis 1928), s'installent au 112 Mercer Street à Princeton. À partir de ce moment, Einstein ne quittera plus les États-Unis. Son fils Hans Albert reste en Suisse pour poursuivre son doctorat en sciences techniques au Polytechnicum de Zürich, doctorat qu'il obtiendra en 1936. Hans Albert émigrera ensuite également aux États-Unis et deviendra Professeur à l'université de Californie à Berkeley. Il dira à propos de son père : « *Je suis probablement le seul projet auquel il ait renoncé. Il a essayé de me donner des conseils, mais a vite découvert que j'étais trop têtu et qu'il perdait son temps.* » Elsa, la seconde femme d'Einstein, succombera en décembre 1936 d'une maladie cardiaque. Sa sœur Maja, qui vit en Italie, est contrainte par les lois raciales de Mussolini de s'exiler à son tour ; elle rejoint en 1939 son frère à Princeton et habitera chez lui jusqu'à sa mort en juin 1951. Einstein obtiendra la nationalité américaine le 1^{er} octobre 1940, tout en gardant la nationalité suisse qu'il avait acquise en 1901.

Einstein, père de la bombe ?

En janvier 1939, peu après la découverte de la fission nucléaire, Bohr alerte les physiciens américains des possibilités de dégagement



d'énergie par réaction en chaîne⁶. Szilard, Wigner et Teller alertent Einstein. Szilard et Wigner préparent une lettre destinée au Président Roosevelt, puis en discutent avec Einstein qui signe la lettre. Elle est datée du 2 août 1939 et indique : « *Je crois donc de mon devoir de porter ce qui suit à votre attention qu'il est désormais concevable de construire des bombes, d'un type nouveau, extrêmement puissantes. Une seule bombe de ce genre, transportée par bateau ou explosant dans un port, pourrait fort bien détruire tout le port ainsi qu'une partie du territoire environnant.* » Moins d'un mois plus tard, le 1^{er} septembre 1939, Hitler envahit la Pologne et la seconde guerre mondiale commence. Roosevelt prend connaissance de la lettre d'Einstein en octobre et décide de créer le *Comité sur l'uranium*. Peu après, ce comité est placé sous le contrôle du NDRC (National Defense Research Committee) nouvellement créé et présidé par Vannevar Bush. En mai 1941, Ernest Lawrence annonce à l'Académie nationale des sciences américaine la possibilité d'utiliser le plutonium comme élément fissile d'une bombe nucléaire. Bush persuade alors le président Roosevelt de créer l'OSRD (Office of Scientific Research and Development), ce qu'il fait le 28 juin 1941. Le comité de l'uranium devient ainsi la première section de l'OSRD. Finalement, le 6 décembre 1941, il est décidé de tout mettre en œuvre pour le développement de la bombe. L'attaque de Pearl Harbor a lieu le lendemain, 7 décembre 1941, et marque l'entrée en guerre des États-Unis par cette déclaration de Roosevelt : « *La guerre nazie est une répugnante affaire. Nous ne voulions pas y entrer, mais nous y sommes et nous allons combattre avec toutes nos ressources* ».

En juin 1942, le *Manhattan District of the Corps of Engineers* (MED) est formé : le *Manhattan project* démarre. Le 17 septembre, le projet est placé sous la responsabilité du général Groves, et la direction scientifique en est confiée à Robert Oppenheimer. L'effort est gigantesque, coûte des milliards de dollars et mobilise à travers les États-Unis plus de 100 000 hommes et femmes. La seule usine de Oak Ridge (de préparation de l'uranium « qualité militaire ») compte jusqu'à vingt-quatre mille employés. Les bobinages électriques des aimants exigent des quantités très importantes de cuivre. Ce matériau étant rare, l'administration décide de le remplacer par de l'argent emprunté au département du Trésor des États-Unis. Ainsi plus de 14 tonnes d'argent sont mises à la disposition du Manhattan District ! La première bombe (expérimentale) explose à Alamogordo le 16 juillet 1945. On connaît malheureusement la suite, Hiroshima le 6 août 1945 et ses cent mille victimes ; puis Nagasaki le 9 août 1945 et ses soixante mille victimes. En apprenant la nouvelle par sa secrétaire Helen Dukas, Einstein pousse un cri de désespoir. Le Japon capitule le 10 août 1945.



Première explosion nucléaire à Alamogordo le 16 juillet 1945.

⁶ Les notions de fission et de réaction en chaîne sont abordées au chapitre 3.



Dernières années

Les activités d'Einstein à la fin de la guerre sont multiples. Il poursuit ses recherches sur une théorie du champ unitaire, dont le but est d'englober, dans une même perspective, les phénomènes de gravitation et les phénomènes électromagnétiques, mais cette théorie n'aboutira pas. Il écrit lui-même à la reine de Belgique : « *Je me suis enfermé dans des problèmes scientifiques totalement sans issue – et cela d'autant plus qu'étant âgé, je demeure à l'écart de la société d'ici.* » Toutefois, à côté de ses recherches en physique, Einstein a de nombreux engagements extra-scientifiques. Sa santé l'oblige à se ménager. Abraham Pais, son collègue à Princeton, est le témoin de ces années et nous les décrit de façon précise : « *Einstein essayait, dans la mesure du possible, d'avoir une vie bien réglée. Vers neuf heures du matin, il descendait prendre son petit déjeuner, puis lisait les journaux. Vers dix heures et demie, il se rendait à pied à l'Institute for Advanced Study, y restait jusqu'à une heure, puis retournait à la maison. J'ai entendu dire qu'un automobiliste entra un jour dans un arbre après avoir subitement reconnu le visage du beau vieillard marchant dans la rue, son bonnet de laine noire bien enfoncé sur ses longs cheveux blancs. Après le repas, il allait s'allonger une heure ou deux, puis prenait une tasse de thé, travaillait encore un peu ou s'occupait de son courrier, ou encore recevait des gens pour discuter de sujets non personnels. Il dînait entre six heures et demie et sept heures. Ensuite il se remettait au travail ou écoutait la radio (il n'avait pas la télévision), ou, de temps en temps, recevait un ami. Généralement, il se retirait dans sa chambre entre onze heures et minuit. Tous les dimanches midi, il écoutait à la radio les commentaires d'Howard K. Smith sur l'actualité. Il n'y avait jamais d'invités à cette heure. L'après-midi il se promenait, à pied ou dans la voiture d'un ami. Il n'allait que rarement au théâtre ou au concert, et moins souvent encore au cinéma. Il assistait de temps en temps à un séminaire de physique au Palmer Laboratory – son entrée provoquait le silence respectueux dont j'ai déjà parlé. Durant ces dernières années, il ne joua plus du violon, mais improvisait chaque jour au piano. Il avait également cessé de fumer ses chères pipes.* »

En août 1948, Einstein apprend la mort de Mileva à Zürich. Elle avait été hospitalisée peu de temps avant pour une attaque d'apoplexie peut-être provoquée par une scène de violence de son fils Eduard. Ce dernier faisait alors des séjours de plus en plus fréquents à l'hôpital psychiatrique Burghölzli où il mourra en 1965.

À la mort de Chaïm Weizmann, premier Président d'Israël, le 9 novembre 1952, David Ben Gourion, alors Premier ministre, propose à Einstein de prendre la présidence d'Israël. Einstein est flatté mais répond : « *Je sais peu de choses sur la nature et rien du tout sur les hommes.* »





Einstein en compagnie de Ben Gourion.
© Courtesy of The Albert Einstein Archives, The Hebrew University of Jerusalem.

Dans les dernières années de sa vie, la santé d'Einstein se dégrade. Il est hospitalisé une première fois, au Jewish Hospital de Brooklyn, le 12 janvier 1949. Les examens révèlent un anévrisme de l'aorte abdominale. Il s'en remet, tout en sachant qu'une épée de Damoclès est suspendue au-dessus de sa tête. Quelques années plus tard, dans l'après-midi du mercredi 13 avril 1955, Einstein s'écroule sur le sol de sa maison. On le transporte au Princeton Hospital où il succombe à une rupture d'anévrisme dans la nuit du dimanche au lundi 18 avril 1955 à une heure quinze du matin. Il est incinéré au Ewing Crematorium, à Trenton, où douze de ses proches sont réunis. Ses cendres sont dispersées en un lieu tenu secret.

Le monde perd l'un des meilleurs physiciens de tous les temps.



2

1905 : un tournant décisif

L'héritage de Newton

Pour bien comprendre en quoi les nouvelles idées introduites en 1905 ont constitué une révolution scientifique, il est utile de rappeler rapidement le cadre de pensée (le paradigme) des physiciens jusqu'à la fin du XIX^e siècle. Très schématiquement, on peut distinguer deux périodes ; la première se fonde sur la physique aristotélicienne, qui est à l'œuvre jusqu'à Galilée, la seconde est celle de la physique newtonienne, dont les bases remontent au même Galilée.

La physique aristotélicienne

Pour Aristote, le monde est divisé en deux grandes régions. La première est la région céleste, celle de l'éther, dans laquelle ont lieu les mouvements circulaires éternellement uniformes. La seconde est la région sublunaire, c'est-à-dire située au-dessous de la sphère de la lune ; cette région est celle des quatre éléments d'Empédocle, celle du changement permanent et celle des mouvements linéaires. La physique et la cosmologie d'Aristote deviendront la physique et la cosmologie de l'Église Catholique, au point que, jusqu'au XVII^e siècle, attaquer ce que la scolastique aura fait d'Aristote sera considéré comme attaquer l'Église. C'est la physique d'Aristote qui sert de cadre au système du monde de Ptolémée. Suivant ce dernier, l'Univers est composé d'un



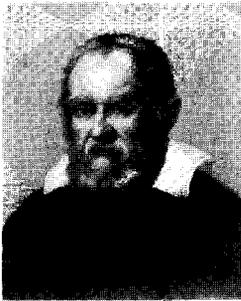
ensemble de huit sphères – ou *orbes* – formant une structure en « pelures d'oignon » ; au centre la Terre, puis la Lune, Mercure, Vénus, le Soleil, Mars, Jupiter, la dernière sphère, celle du firmament, portant les étoiles fixes. L'ouvrage où Ptolémée décrit son système, *Almageste*, est admiré, car il permet d'établir, à tout moment, les positions des cinq planètes visibles à l'œil nu, ainsi que celles du Soleil et de la Lune (le système de Ptolémée permet de dresser les tables des mouvements planétaires à un quart de degré près !).

De Copernic à Galilée



Nicolas Copernic
(1473-1543).

Au milieu du XVI^e siècle, le chanoine Nicolas Copernic propose d'abandonner le système géocentrique de Ptolémée. Dans la dédicace qu'il fait au pape Paul III de son ouvrage *De revolutionibus orbium coelestium*, il indique : « *J'ai pensé qu'on me permettrait facilement d'examiner si, en supposant le mouvement de la terre, on pouvait trouver dans celui des corps célestes quelque chose de plus démonstratif.* » Copernic introduit la notion de système héliocentrique où les six planètes (Mercure, Vénus, Terre, Mars, Jupiter et Saturne) se déplacent autour du Soleil : « *Le Soleil repose au milieu de toutes choses, assis pour ainsi dire sur un trône royal, il gouverne la famille des astres qui tournent autour de lui.* » Ses adversaires, et ils sont nombreux, utilisent un argument de poids : si la Terre bouge, on devrait s'en apercevoir ! On doit à Galilée d'avoir fait admettre le point de vue de Copernic et de lui avoir donné des fondements physiques solides.



Galilée (1564-1642).
« *Le leitmotiv que je reconnais dans l'œuvre de Galilée est le combat passionné contre toutes les formes de dogme se fondant sur des arguments d'autorité.* »
(A. Einstein)

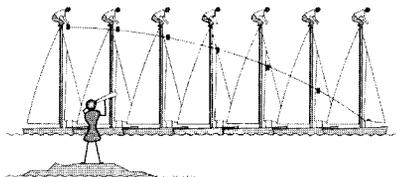
On a pu dire que « Galilée mériterait le titre de fondateur de la physique, si un seul homme avait pu fonder une science aussi vaste et aussi variée ». C'est en effet le premier à avoir recours à la fois à des expériences soignées et systématiques, et aux mathématiques. Il expose sa démarche de façon parfaitement claire : « *La philosophie [c'est-à-dire la science] est écrite dans ce très grand livre qui se tient constamment ouvert sous nos yeux, l'Univers, et qui ne peut se comprendre que si l'on a préalablement appris à en comprendre la langue et à en connaître les caractères employés pour l'écrire. Ce livre est écrit dans la langue mathématique, ses caractères sont des triangles, des cercles et d'autres figures géométriques, sans l'intermédiaire desquels il est impossible d'en comprendre humainement un seul mot, et sans lesquels on ne fait qu'errer vainement dans un labyrinthe obscur.* »

Galilée met en évidence le mouvement uniformément accéléré, énonce la loi de composition des mouvements et montre que la superposition d'un mouvement horizontal de vitesse uniforme et d'un mouvement vertical uniformément accéléré donne une trajectoire parabolique. Il montre que si l'on n'exerce aucune action sur un corps immobile, il reste immobile et que si l'on cesse toute action sur un corps en mouvement rectiligne uniforme, il continue à se déplacer selon un mouvement rectiligne uniforme.

Ainsi le point de vue de Galilée se démarque totalement de la physique de l'époque, héritée d'Aristote, suivant laquelle l'état de mouvement est intrinsèquement différent de l'état de repos. Galilée va plus loin : selon lui aucune expérience ne peut mettre en évidence un mouvement auquel observateur et mobile participent également. Le mouvement est imperceptible par l'observateur entraîné, le mouvement n'a pas besoin de cause et n'est pas d'une autre nature que le repos. Galilée résume la situation d'une phrase : « *Le mouvement est comme rien* ». Galilée illustre son propos par une expérience imaginaire : « *Une pierre lâchée du plus haut du mât, tandis que la galère vogue avec toute la force et la vitesse possible, ne tombe point ailleurs qu'elle ne le ferait si la même galère était arrêtée et immobile* ». Cette expérience montre « qu'un mouvement commun à plusieurs corps est comme nul et non venu par égard à ces corps, et opère seulement dans leur relation avec d'autres corps qui ne participent pas à ce mouvement ». Ce résultat est connu sous le nom de *principe de relativité*, suivant lequel des phénomènes de même type sont indifférents au mouvement relatif pourvu que la situation physique des divers repères matériels auxquels ils sont liés reste identique. *Le principe de relativité de Galilée* (voir encadré) permet ainsi de formuler des lois qui ne sont pas affectées par le passage de la perception d'un observateur à celle d'un autre qui se déplace par rapport à lui d'un mouvement rectiligne uniforme. Einstein appellera ces observateurs équivalents « observateurs galiléens », de même qu'il nommera « transformation de Galilée » la formule qui permet de passer d'un système de référence (galiléen) à un autre.

Principe de relativité de Galilée

Suivant le principe de relativité (baptisé par Einstein, « de Galilée »), il est impossible de mettre en évidence le mouvement (rectiligne et uniforme) d'un système physique par des « expériences internes », c'est-à-dire pour lesquelles l'observateur et l'objet étudié appartiennent à un même système (référentiel). C'est le cas de la pierre qui tombe du haut du mât du bateau : que le bateau soit fixe par rapport au quai ou animé d'un mouvement rectiligne et uniforme par rapport à ce dernier, le résultat sera le même. De nos jours, cela pourrait être illustré par un autre exemple : un aviateur immobile ne verrait pas la terre défilé sous les ailes de son appareil. Dans un avion qui serait dépourvu de vitesse, aucune expérience réalisée à bord de l'appareil ne peut déceler le mouvement terrestre.



Une pierre est lancée du haut du mât d'un bateau. Pour un observateur lié à ce bateau elle tombe verticalement comme elle le ferait si le bateau était immobile (le « mouvement (du bateau) est comme rien »). Mais un observateur sur le quai la verra tomber suivant une trajectoire parabolique.



La victoire de Newton



Sophie H.

Simplicio : « Vous n'avez pas, je suppose, l'intention de nous prouver qu'une balle de liège tombe à la même vitesse qu'une balle de plomb ? » **Salviati** : « ... ayant vu, dis-je, tout cela, j'en arrive à cette opinion que si l'on éliminait complètement la résistance du milieu, tous les corps tomberaient à vitesse égale. » Galilée, Discorsi (1638).

La remise en cause du paradigme aristotélicien effectuée par Galilée est poursuivie et formalisée par Newton, on peut dire, avec Whitehead ; « Galilée représente l'assaut, Newton la victoire ». Lagrange retrace, avec une admirable clarté, les grandes lignes de cette évolution : « La dynamique est la science des forces accélératrices ou retardatrices et des mouvements variés qu'elles doivent produire. Cette science est due entièrement aux modernes et Galilée est celui qui a jeté les premiers fondements... Huygens, qui paraît avoir été destiné à perfectionner et compléter la plupart des découvertes de Galilée, ajouta à la théorie des graves celles du mouvement des pendules et des forces centrifuges et prépara ainsi la route à la grande découverte de la gravitation universelle. La mécanique devint une science nouvelle entre les mains de Newton et ses principes mathématiques qui parurent pour première fois en 1687 furent l'époque de cette révolution ».

Le livre de Newton *Principes mathématiques*, ou *Principia*, est sans doute le plus grand ouvrage jamais écrit en physique. Newton introduit la notion de temps absolu « vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, [qui] coule uniformément et s'appelle durée », d'espace absolu « sans relation aux choses extérieures, [qui] demeure toujours similaire et immobile », et de mouvement absolu défini par le déplacement d'un corps d'un lieu absolu à un autre lieu absolu. Il fait remarquer qu'« il est très difficile de connaître les mouvements vrais de chaque corps, et de les distinguer réellement des mouvements apparents ». Enfin Newton énonce dans ses *Principia* les trois lois fondatrices de la mécanique (voir encadré).

La mécanique céleste

La mécanique céleste a pour objectif de prévoir la position dans l'espace des corps célestes : planètes, satellites, étoiles et autres objets astronomiques. La loi de la gravitation de Newton a donné à cette science un essor considérable. Lagrange et Laplace lui ont donné ses lettres de noblesses. La découverte, en 1846, faite par Le Verrier, de la planète Neptune, uniquement grâce au calcul, a été un succès retentissant.

Les *Principia* de Newton constituent non seulement le premier manuel de mécanique générale, mais également le premier manuel d'hydrodynamique¹, ainsi que le premier manuel de mécanique céleste. Son contenu donne le cadre des recherches en physique pour deux siècles et représente encore, pour l'essentiel, les fondements de la mécanique enseignés dans nos lycées.

¹ L'hydrodynamique est la science du mouvement des liquides. Les noms de Bernoulli, Euler, Navier restent attachés à ce domaine.



Isaac Newton (1642-1727). « Si j'ai vu plus loin que les autres hommes, c'est parce que je me suis tenu sur les épaules des géants. »

Les lois de Newton

Première loi

« Tout corps persévère dans son état de repos ou de mouvement rectiligne uniforme, sauf si des forces *imprimées* le contraignent d'en changer ».

Cette première loi explicite l'affirmation de Galilée suivant laquelle « le mouvement est comme rien », elle exprime le principe d'inertie. Elle n'est valable que dans des repères galiléens.

Deuxième loi

« Le changement de mouvement est proportionnel à la force motrice imprimée, et s'effectue suivant la droite par laquelle cette force est imprimée ».

Cette deuxième loi mène au principe fondamental de la dynamique, qui s'énonce : « Dans un référentiel galiléen, la force est égale au produit de la masse (inerte) par l'accélération ». Cela prolonge le principe d'inertie, en effet si la force est nulle (mouvement libre), l'accélération disparaît et le mouvement s'effectue à vitesse constante en grandeur et en direction.

Troisième loi

« La réaction est toujours égale à l'action ».

Cette troisième loi est connue sous le nom de principe de l'action et de la réaction.

Une remarque d'Einstein

Lorsqu'en 1907, Einstein cherche à étendre son principe de relativité à des repères non galiléens, il se rend compte de la « faiblesse » de la première loi de Newton. Il analyse la situation ainsi : « *La faiblesse du principe d'inertie consiste en ceci qu'il tourne dans un cercle vicieux. Une masse dit-on, se meut sans être accélérée si elle est suffisamment distante des autres corps, et l'on ne reconnaît qu'elle est suffisamment éloignée de ces derniers que si elle se meut sans subir d'accélération* ».



Un monde continu

L'hypothèse atomique, suivant laquelle la matière est constituée de particules indivisibles ou insécables, les atomes, est aussi ancienne que la réflexion sur la nature. Elle apparaît en Grèce vers 400 avant J.-C. chez Leucippe et Démocrite, puis en Italie chez Lucrèce au premier siècle de notre ère (voir chapitre 4). Bien que les solides et les fluides nous apparaissent comme continus et divisibles à l'infini, les atomistes soutiennent que la continuité de la matière et des fluides est une illusion : ces milieux sont constitués d'un très grand nombre de très petites particules indestructibles (a-tome = in-sécable) identiques. Ainsi, la continuité est remplacée chez les atomistes par une discontinuité spatiale. Mais la continuité posa de graves problèmes aux Grecs, en particulier à Zénon d'Élée qui trouvait absurde qu'une ligne puisse être composée de points, qui sont sans longueur.

Ces difficultés furent partiellement résolues par un nouvel outil mathématique merveilleusement adapté aux phénomènes continus : le calcul différentiel et intégral, inventé presque simultanément et indépendamment vers 1670 par Isaac Newton et Gottfried Wilhelm Leibniz. De plus, l'hypothèse atomique se heurta longtemps à une objection majeure : on n'avait jamais vu d'atomes. L'atomisme se trouva donc éclipsé par la physique de Newton.

Le calcul différentiel a permis d'édifier la mécanique. L'exactitude des prévisions astronomiques qu'elle permit eut un retentissement considérable sur l'opinion et donna une confiance parfois illimitée dans la puissance de la pensée. L'analyse du discontinu ne disposait pas d'un outil mathématique aussi puissant, et il allait être possible pendant longtemps de considérer la matière comme continue et indéfiniment divisible.

XIX^e siècle : le siècle de la science

Une pléiade de grands noms

Le XIX^e siècle a profondément marqué la science. Il est encore très présent dans l'enseignement contemporain comme on peut facilement s'en rendre compte à l'évocation de quelques noms comme Lagrange et Laplace en mécanique, Volta ; Biot ; Ampère ; Faraday ; Ohm ; Helmholtz ; Kirchhoff ; Maxwell ; Gauss en électricité, Fourier ; Carnot ; Joule ; Clausius ; Kelvin ; Boltzmann en thermodynamique, Young ; Arago ; Fresnel en optique, sans oublier les savants à la frontière entre



les mathématiques et la physique comme Monge ; Legendre ; Poisson ou Cauchy, les chimistes comme Thenard et Berthollet, le naturaliste Lamarck ; le paléontologue Cuvier etc. La France, on le voit, occupe une place considérable dans ce panorama. Après l'épisode tragique de la Terreur, la science est considérée par la Convention comme un élément de progrès et elle est encouragée. C'est ainsi que l'École Polytechnique est créée en 1794, presque en même temps que l'École Normale de l'an III. L'enseignement y est de haut niveau, les professeurs sont les plus grands savants de l'époque. L'Institut national des sciences et des arts (regroupant les anciennes académies scientifique, littéraire et artistique) est fondée en 1795. Bonaparte, qui est élu en 1797 à l'Académie des sciences (il venait d'avoir 29 ans), encouragera et favorisera les scientifiques tout au long de son règne.

« Les sciences, qui honorent l'esprit humain, les arts qui embellissent la vie et transmettent les grandes actions à la postérité, doivent être spécialement honorés dans les gouvernements libres. »

Napoléon Bonaparte.

Une physique résolument newtonienne

Laplace est le digne successeur de Newton (il sera surnommé « Le Newton français »). Il pousse à fond les calculs newtoniens, interprète les anomalies du mouvement de la lune, traite le problème des trois corps, de la précession des équinoxes, de la rotation de l'axe de la Terre etc. Laplace rassemble des disciples : Biot (pour qui il a obtenu une chaire au Collège de France), Poisson (qui lui doit son poste de professeur à l'École Polytechnique), Arago, Malus, Gay-Lussac. Il fonde avec Claude Berthollet la Société d'Arcueil dont le but est de « ramener la vision newtonienne du monde aux dimensions de la physique moléculaire, en appliquant, par les mathématiques, les lois de Newton aux phénomènes tels que la lumière, la chaleur, le son, l'électricité et le magnétisme ». Le programme est ambitieux et volontariste. Il porte ses fruits. La physique newtonienne se développe à grand pas. Toutefois, certains phénomènes en électricité et en optique se montrent rebelles au schéma newtonien ; ce sont (mais on ne le saura que près d'un siècle plus tard) les premiers signes de la révolution relativiste. Alors que la force de gravitation est attractive (loi de Newton) et que les forces électriques sont de nature attractive ou répulsive (loi de Coulomb), Faraday et Ampère découvrent en 1821 que les forces magnétiques s'exercent dans un plan perpendiculaire à celui formé par la ligne de courant et par le champ magnétique. Ils parlent de rotations électromagnétiques. Faraday rapporte ainsi sa découverte : *« Je trouve que les attractions et les répulsions que l'on considère d'habitude entre le fil conjonctif et l'aiguille magnétique sont des illusions, les mouvements ne sont pas le résultat de quelque force attractive, mais d'une force due au fil, qui au lieu de tendre à en rapprocher ou à en éloigner le pôle le fait tourner sur un cercle sans fin, mouvement qui dure tant que la batterie est en action ».*



Pierre Simon Laplace (1749-1827).

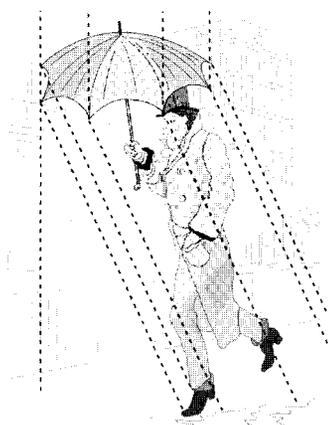
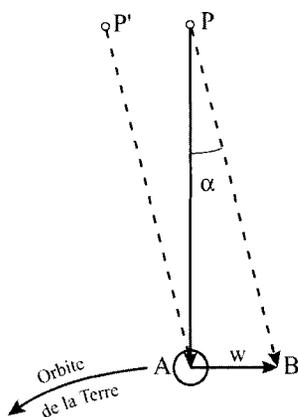


Fresnel de son côté, pour tenter d'expliquer le phénomène connu sous le nom « d'aberration des étoiles », introduit en 1818, pour la première fois en physique, l'idée que la vitesse de la lumière puisse ne pas dépendre de la vitesse de sa source : « *La vitesse avec laquelle se propage les ondes lumineuses est indépendante du mouvement des corps dont elles émanent* », écrit-il. Nous retrouverons cette idée en 1905.

Aberration des étoiles

C'est l'astronome anglais James Bradley qui découvre en 1728 le phénomène « d'aberration des étoiles ». Il montre que pour observer n'importe quelle étoile fixe il est nécessaire de pointer le télescope non directement sur l'étoile mais un peu en avance sur elle. Ce phénomène est lié au mouvement apparent elliptique des étoiles sur la voûte céleste associé au mouvement de la terre autour du Soleil. Les étoiles, au cours de l'année, semblent ainsi décrire des ellipses dont le demi-grand axe α mesure $20''$ (soit environ 10^{-4} rad). L'angle α est égal à w/c , car pendant que la lumière parcourt une distance c (300 000 km) en une seconde, la Terre parcourt une distance w (30 km) en une seconde. On constate expérimentalement que cet angle ne dépend pas de l'étoile considérée, la vitesse de la lumière ne doit donc pas dépendre du mouvement de l'étoile : c doit être une constante. C'est bien la conclusion que donne, dès 1741, Clairaut : « *Les observations de M. Bradley prouvent que la vitesse de la lumière des étoiles qu'il a observées, est la même ; on doit donc en conclure que la lumière de toutes les autres étoiles est également prompte* ».

Le phénomène d'aberration se comprend facilement par l'analogie suivante : même si la pluie tombe de façon parfaitement verticale, un piéton qui marche la verra arriver sous un certain angle, de la même façon un astronome est entraîné par le mouvement de la Terre autour du Soleil et voit la lumière en provenance d'une étoile sous l'angle α dit d'aberration.



La physique en révolution

Deux petits problèmes

À la fin du XIX^e siècle, la physique peut sembler achevée. La mécanique semble définitivement installée dans son cadre newtonien. L'expérience cruciale de l'optique a été réalisée en 1850 : la vitesse de la lumière est plus grande dans le vide que dans un milieu, ce qui finit d'imposer la théorie ondulatoire de la lumière. Maxwell en conclut, dès 1861, que : « *La vitesse des ondulations transverses dans notre milieu hypothétique, calculée à partir des expériences de MM. Kohlrausch et Weber, coïncide si exactement avec la vitesse de la lumière calculée à partir des expériences optiques de M. Fizeau que nous ne pouvons guère éviter d'inférer que la lumière n'est autre que les ondulations transverses du même milieu qui est la cause des phénomènes électriques et magnétiques* ». Peu après (1868), Maxwell, grâce à ses travaux remarquables, donne à l'électromagnétisme son unité. Puis Hertz, par sa découverte des ondes électromagnétiques (« ondes hertziennes ») en 1888, valide expérimentalement la nature électromagnétique de la lumière qui est l'un des points les plus essentiels et novateurs de la théorie de Maxwell.

Lord Kelvin peut donc déclarer en 1892 : « *La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance* ». Albert Michelson confirme en 1899 : « *Les lois et les faits les plus fondamentaux de la physique ont tous été découverts, et ils sont maintenant tellement bien établis que la possibilité qu'ils soient supplantés suite à de nouvelles découvertes est extrêmement faible. Nos découvertes futures concerneront le sixième chiffre après la virgule...* » Seulement les ombres au tableau de la physique décrit par Lord Kelvin cachent deux révolutions ; celle de la relativité et celle des quanta ! La confiance affichée par Michelson doit être tempérée.

Une énigme redoutable

La physique du XIX^e siècle est résolument déterministe. Laplace, dans sa *Théorie analytique des probabilités* de 1812, l'exprime clairement : « *Une intelligence qui pour un instant donné, connaîtrait toutes les forces dont la matière est animée, ainsi que la position et la vitesse de chacune de ses molécules ; si d'ailleurs elle était assez vaste pour soumettre ces données à l'analyse, embrasserait dans la même formule, les mouvements des plus grands*



corps de l'univers et ceux du plus léger atome. Pour une semblable intelligence, rien ne serait irrégulier, et la courbe décrite par une simple molécule d'air ou de vapeur, paraîtrait réglée d'une manière aussi certaine, que l'est pour nous l'orbe du soleil. »

À la fin du XIX^e siècle, la physique comporte deux théories fondamentales très précises et apparemment très exactes, la mécanique et l'électromagnétisme. Elles sont conformes à l'assertion de Laplace : en supposant connu l'état présent d'un système, ces sciences permettent d'en calculer l'évolution future. Ces deux théories permettent aussi bien de reconstituer le passé que de prédire l'avenir, elles sont insensibles à la direction du temps, on dit qu'elles sont réversibles en temps. Si l'on tient pour seules rigoureuses les lois fondamentales, il n'y a pas de direction privilégiée du temps et notre sens de son écoulement est un effet subjectif. Toutefois les frottements freinent les corps et ne les accélèrent jamais et lorsqu'un corps chaud est placé à côté d'un corps froid c'est ce dernier qui se réchauffe, pas l'inverse. Ces processus (frottement et échange de chaleur) sont irréversibles. Comment expliquer ces observations, peut-on le faire à partir des lois fondamentales ?

La mécanique statistique

La mécanique statistique a été fondée à partir des années 1860 par deux très grands physiciens : Maxwell et Boltzmann. Elle étudie, à l'aide de la mécanique et de l'électromagnétisme, les systèmes composés d'un nombre si grand d'éléments que leur comportement ne peut être calculé en pratique. Mais, bien que reposant sur des lois déterministes et réversibles, on perd avec elle la possibilité de remonter le temps. Alors que des mesures sur le système solaire nous permettent de calculer les positions des planètes dans le passé, il est impossible de savoir par des mesures comment a été obtenu un litre d'eau tiède. Ce point constituait à la fin du XIX^e siècle l'une des plus grandes énigmes de la physique.

Les premiers pas d'Einstein en physique

Nous possédons quelques informations sur l'enseignement reçu par Einstein en physique, et surtout sur ces premiers pôles d'intérêt dans cette science. Ces informations précieuses viennent de la correspondance qu'il a échangée, d'une part avec sa future épouse Mileva Maric (à partir de 1898), et d'autre part avec son ami Michele Besso (à partir de 1897, mais les premières lettres qui nous soient parvenues datent de



1903). Même si cela ne donne qu'une idée très fragmentaire de l'apprentissage d'Einstein en physique, ces témoignages sont importants car ils remontent à une période où Einstein n'avait que dix-neuf ans².

Mileva Maric et Albert Einstein entrèrent tous les deux au Polytechnicum (ETH) de Zürich en octobre 1896. Mileva quitta cette école un an plus tard pour passer le semestre d'hiver de l'année universitaire 1897-1898 comme auditrice libre à l'université de Heidelberg. Elle reviendra à l'ETH en avril 1898. À Heidelberg, elle suit les cours de Philipp Lenard (nous verrons au chapitre 7 que ses travaux sur l'effet photoélectrique seront interprétés par Einstein en 1905) qui parle alors de théorie cinétique des gaz, sujet qui passionne visiblement Mileva et qui serviront de point de départ aux travaux d'Einstein sur le mouvement brownien (voir chapitre 4).

En février 1898, Albert Einstein écrit à Miléva Maric pour l'inciter à reprendre ses études au Polytechnicum de Zürich. Il lui vante les mérites de l'enseignement qui y est dispensé (« *il n'y a qu'ici que vous trouverez les sujets traités sous cet éclairage* »), et lui présente le programme en cours : « *Hurwitz a parlé des équations différentielles, des séries de Fourier, un peu du calcul des variations et des intégrales doubles. Herzog a fait un très bon cours, très clair, sur les solides. Weber a fait un cours sur la thermodynamique (température, quantité de chaleur, mouvement d'agitation thermique, théorie cinétique des gaz). Sa présentation était magistrale. À peine sorti d'un de ses cours, j'ai hâte d'être au prochain.* » Dès le retour de Mileva à Zürich, Einstein passe la voir et... lui emprunte un livre de physique écrit par Paul Drude. Il ne peut s'agir que de son livre *La physique de l'éther*, le seul qu'il ait publié à cette date, dans lequel il est l'un des premiers à exposer l'électromagnétisme de Maxwell. Einstein s'intéresse à ce sujet, il écrit en mars 1899 à Mileva : « *Mes cogitations sur le rayonnement commencent à reposer sur des bases un peu plus solides* ». Il s'imprègne d'électromagnétisme et lit les grands auteurs du domaine comme Hertz et Helmholtz. Il indique au mois d'août 1899 : « *Je suis de plus en plus convaincu que l'électrodynamique des corps en mouvement, telle qu'elle se présente actuellement ne correspond pas à la réalité, et qu'il doit être possible de la présenter de façon plus simple* »³. En septembre il ajoute : « *Il m'est venu une idée intéressante pour étudier quelle influence le mouvement relatif des corps par rapport à l'éther lumineux peut exercer sur la vitesse de*

² Einstein indique par ailleurs dans son autobiographie qu'il a « *eu la chance de pouvoir prendre connaissance des méthodes et des résultats essentiels de l'ensemble du champ des sciences naturelles, grâce à un excellent ouvrage de vulgarisation, qui s'attachait plutôt aux aspects qualitatifs des recherches (Livres populaires sur les sciences de la nature, de Bernstein, en six volumes), ouvrage que je devorai d'une seule traite.* »



propagation de la lumière dans les corps transparents. J'ai pensé à une théorie tout à fait plausible. » L'électrodynamique est un thème très présent dans les préoccupations du jeune Einstein, mais ce n'est pas le seul. Il s'intéresse déjà aux autres sujets qu'il fera éclore en 1905 : la théorie cinétique des gaz et des liquides ainsi que la nature de la lumière. La lecture, en 1901, d'un article de Philipp Lenard sur la production de rayons cathodiques par de la lumière ultraviolette lui fera une forte impression, il indique lui-même qu'elle lui a procurée « *du bonheur et de la joie* ». Einstein se passionne également pour les forces moléculaires, la thermo-électricité, la chimie physique et même la chimie organique. L'enseignement qu'il reçoit à l'ETH l'a clairement influencé, même si ses relations avec son professeur de physique se dégradent progressivement. En particulier, Einstein gardera de sa formation le goût de la confrontation expérimentale de ses idées, ce qui n'étaient pas le cas, à cette époque, de tous les théoriciens. En prolongement de ses études, Einstein lira très tôt les ouvrages des grands physiciens comme Helmholtz, Kirchhoff, Hertz, Drude, Planck, Lorentz, Poincaré, Boltzmann, Mach ou Ostwald. À l'inverse des informations que l'on trouve dans les cours bien établis, où les difficultés sont en quelques sortes lissées, Einstein découvre dans ces lectures non seulement l'actualité de la physique, mais les oppositions d'idées. Les problèmes d'éther, « *l'enfant chagrin de la mécanique* » dira Planck, d'électrodynamique, d'atomistique sont traités de façon quelque fois diamétralement opposée par ces physiciens. Boltzmann est, par exemple, un partisan convaincu de la notion d'atome et sera l'un des premiers à construire une théorie physique reposant sur elle, tandis que Mach et Ostwald sont de farouches anti-atomistes. Lors de ces lectures stimulantes, Einstein se fait ses propres opinions. On les découvre parfois au détour d'une lettre, c'est le cas par exemple lorsqu'il écrit à Mileva : « *Les réserves personnelles que j'émetts quant aux considérations de Planck sur la nature du rayonnement sont faciles à formuler...* »

Il est temps maintenant de découvrir les fruits de cette formation si riche, de cette passion si forte qu'Einstein avait pour la physique.

³ Rappelons que l'article d'Einstein de 1905, qui sera considéré comme le texte fondateur de la relativité restreinte, s'intitule : « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* ».



3

$E = mc^2,$ déjà un siècle

L'origine de l'équivalence masse-énergie

$E = mc^2$ est probablement la formule la plus connue de la physique ; elle exprime l'équivalence entre masse et énergie. Lavoisier exprimait l'impossibilité de créer de la matière en disant « *rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme* ». Par ailleurs, on connaissait en physique, depuis les années 1850, la conservation de l'énergie. Dire qu'il y a équivalence entre masse et énergie c'est aller plus loin et englober dans une même affirmation les deux principes précédents. Pour les physiciens, toujours en quête d'unification, c'est une avancée majeure. Mais pourquoi cette formule est-elle aussi célèbre ? Probablement pour deux raisons. La première est qu'elle a été découverte sans nécessité : elle est d'origine purement théorique, ce n'est pas en cherchant l'interprétation de tel ou tel constat expérimental que l'équivalence entre masse et énergie est apparue. Cette équivalence est née d'un raisonnement théorique, elle est en avance sur l'expérience. La seconde raison est liée au facteur gigantesque qui préside à cette équivalence. Ce facteur c^2 est le carré de la vitesse de la lumière (notée c pour célérité) soit 90 000 000 000 000 000 m^2/s^2 . Cela veut dire qu'un gramme de matière « contient » une énergie de cent mille milliards de joule, l'équivalent d'environ vingt milles tonnes d'un explosif puissant, c'est-à-dire aussi l'énergie de la bombe atomique lancée sur Hiroshima ou Nagasaki. L'énergie nucléaire tire partie de



cette équivalence, mais on ne sait aujourd'hui « brûler » qu'une très faible partie de la masse. L'équivalence entre la masse et l'énergie se vérifie quotidiennement dans les laboratoires, elle est devenue extrêmement banale.

Le calcul de Poincaré



Henri Poincaré
(1854-1912).
© Archives Henri
Poincaré.

Henri Poincaré est le premier à avoir découvert l'équivalence entre la masse et l'énergie. Il écrit en 1900 : « L'énergie électromagnétique se comportant donc au point de vue qui nous occupe comme un fluide doué d'inertie, on doit conclure que si un appareil quelconque après avoir produit de l'énergie électromagnétique la renvoie par rayonnement dans une certaine direction, cet appareil devra reculer comme recule un canon qui a lancé un projectile. Il est facile d'évaluer en chiffres l'importance de ce recul. Si l'appareil a une masse de 1 kilogramme et s'il a envoyé dans une direction unique avec la vitesse de la lumière trois millions de joules, la vitesse due au recul est de 1 centimètre par seconde. En d'autres termes, si l'énergie produite par une machine de 3000 watts est envoyée dans une seule direction, il faudra pour maintenir la machine en place, malgré le recul, une force d'une dyne¹. Il est évident, qu'une force aussi faible ne pourrait pas être décelée par l'expérience. »

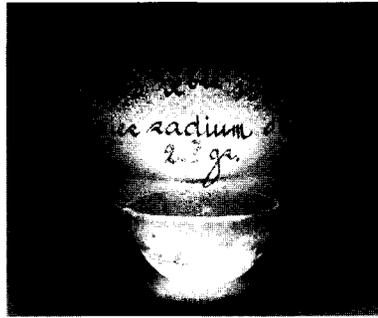
Analysons ce texte de Poincaré : appelons M la masse de l'appareil ($M = 1$ kg), v sa vitesse de recul et E l'énergie qu'il a envoyée ($E = 3$ MJ). Désignons par m la masse équivalente à cette énergie E et par c la vitesse de la lumière ($c = 3 \times 10^8$ m/s). La conservation de la quantité de mouvement s'écrit : $Mv = mc$. En utilisant la relation entre masse et énergie $E = mc^2$ (ce que fait implicitement Poincaré), on obtient $v = \frac{mc}{M} = \frac{mc^2}{Mc} = \frac{E}{Mc}$. En utilisant les valeurs numériques rappelées plus haut on trouve bien $v = 1$ cm/s, comme annoncé par Poincaré ! Donc Poincaré a trouvé, sans l'expliciter, et ce dès 1900, la fameuse formule $E = mc^2$. On pourrait donc également vendre des t-shirt représentant le recul d'un canon envoyant de la lumière, Poincaré à son bureau et bien sûr, en lettres rouges, la formule magique !

Le mystère de la radioactivité

Poincaré termine son texte en indiquant qu'on ne pourrait pas mettre en évidence la force nécessaire pour maintenir en place le canon car cette force est bien trop faible (toujours à cause du facteur gigantesque c^2). Pourtant un nouveau phénomène venait d'être découvert lorsqu'il écrivait ces lignes, qui allait permettre de vérifier par l'expérience la fameuse formule. Cette découverte, c'est la radioactivité.

¹ La dyne est une ancienne unité de force : 1 dyne = 10^{-5} newton.





Emission lumineuse
du radium.
© Association Curie
et Joliot-Curie

Par un étrange concours de circonstance, Poincaré est un peu à l'origine de la découverte de la radioactivité. En effet en janvier 1896, moins de deux mois après la découverte des rayons X par Röntgen, Poincaré écrit : « Ainsi c'est le verre qui émet les rayons Röntgen et il les émet en devenant fluorescent. Ne peut-on pas alors se demander si tous les corps dont la fluorescence est suffisamment intense n'émettent pas, outre les rayons lumineux, des rayons X de Röntgen, quelle que soit la cause de leur fluorescence ? Les phénomènes ne seraient plus liés à une cause électrique. Cela n'est pas probable, mais cela est possible, et sans doute assez facile à vérifier. » La vérification suggérée par Poincaré allait être faite par Becquerel. Le 2 mars 1896, ce dernier découvre les « rayons uraniques » confirmant l'intuition de Poincaré. La question de la source d'énergie à l'origine de ce nouveau rayonnement ne tarde pas à se poser. Becquerel écrit dès novembre 1896 que « l'on n'a pu reconnaître encore où l'uranium emprunte l'énergie qu'il émet avec une si longue persistance. » La suite est bien connue : Marie Curie va choisir pour sujet de thèse l'analyse de cet étrange phénomène. En avril 1898 elle introduit, pour la première fois, le terme de radioactivité. En juillet elle découvre, avec son mari Pierre, un nouvel élément, le polonium, plus radioactif que l'uranium, puis en décembre un nouvel élément, plus radioactif encore, qu'ils nomment radium. De 1899 à 1902, Pierre et Marie Curie se lancent dans la détermination de la masse atomique du radium pour prouver qu'il s'agit bien d'un élément nouveau. Mais le radium n'existe que sous forme de trace dans le minerai d'uranium, la tâche est colossale, il faut traiter de grande quantité de minerai. Le couple Curie se livre tout entier dans ce travail épuisant, leur carnet de laboratoire devient muet pendant près de deux ans, de juillet 1900 à mars 1902. C'est durant cette période qu'ils vont assister, sans le savoir, à la première constatation expérimentale de l'équivalence masse-énergie. Eve Curie, dans la biographie qu'elle consacre à sa mère, nous fait revivre ces heures intenses : « Il est neuf heures du soir. Pierre et Marie sont dans leur maison du boulevard Kellerman... Ce soir Marie ne peut fixer son attention. Nerveuse, elle se lève, pose son ouvrage. Et, soudain : Si nous allions un instant là-bas ? Elle a eu un accent de supplication bien superflu, car Pierre, comme elle, brûle



de retourner au hangar qu'ils ont quitté il y a deux heures. Le radium, fantasque comme un vivant, attachant comme un amour, les rappelle vers sa demeure. Ils mettent leurs manteaux et s'esquivent... Ils vont à pied, bras dessus, bras dessous, échangeant peu de mots. Ils arrivent rue Lhomond, traversent la cour. Pierre met la clé dans la serrure. La porte grince, et les revoici dans leur domaine, dans leur rêve. N'allume pas ! prononce Marie Curie. Puis elle ajoute, avec un petit rire : tu te souviens du jour où tu m'as dit : « je voudrais que le radium eût une belle couleur ? » La réalité qui enchante Pierre et Marie depuis quelques mois est plus adorable encore que le souhait naïf de jadis. Le radium a bien autre chose qu'une « belle couleur » : il est spontanément lumineux ! Et, dans le hangar sombre où les précieuses parcelles, en leurs minuscules récipients de verre, sont – faute d'armoires – posées sur les tables, sur les planches clouées au mur, leurs silhouettes phosphorescentes, bleuâtres, brillent, suspendues dans la nuit. Regarde... regarde ! murmure la jeune femme. Elle s'avance avec précaution, cherche, trouve à tâtons une chaise de paille, s'assied. Dans l'obscurité, dans le silence, les deux visages se tendent vers les pâles lueurs, les mystérieuses sources de rayons, vers le radium – leur radium ! Le corps penché, la tête avide, Marie a repris l'attitude qui était la sienne, une heure plus tôt, au chevet de son bel enfant endormi. La main de son compagnon effleure ses cheveux. Elle se souviendra toujours de ce soir de vers luisants, de cette féerie. » Oui, ce soir-là Pierre et Marie Curie ont observé, pour la première fois, la manifestation de l'équivalence masse-énergie, mais ils ne le savent pas, le mystère est entier. Pierre Curie s'interroge, il écrit en 1900 : « La spontanéité du rayonnement est une énigme, un sujet d'étonnement profond. Quelle est la source de l'énergie des rayons de Becquerel ? Faut-il la chercher dans les corps radioactifs eux-mêmes ou bien à l'extérieur ? »

Einstein annonce l'équivalence masse-énergie

Einstein écrit à son ami Habicht durant l'été 1905 : « Le principe de relativité associé aux équations fondamentales de Maxwell a en effet pour conséquence que la masse est une mesure de l'énergie qui est contenue dans le corps... » À la fin septembre, Einstein transmet un article intitulé « L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ? » qu'il conclut ainsi : « Si un corps cède l'énergie E sous forme de rayonnement, sa masse diminue de E/c^2 . À cet égard, il n'est manifestement pas essentiel que l'énergie soustraite au corps se transforme directement en énergie de rayonnement, ce qui nous conduit à la conclusion plus générale suivante : la masse d'un corps est une mesure de son contenu en énergie ; si l'énergie varie de E , la masse varie dans le même sens de E/c^2 . » Et Einstein ajoute : « Il n'est pas exclu que l'on puisse réussir à vérifier la théorie avec des corps dont le contenu en énergie varie dans de grandes proportions (par exemple les sels de radium). » Même si Einstein, dans sa



15. Ist die Trägheit eines Körpers von seinem
Energieinhalt abhängig?
von A. Einstein.

Die Resultate einer Frage in diesen Annalen von mir publizierten elektrodynamischen Untersuchung¹⁾ führen zu einer sehr interessanten Folgerung, die hier abgeleitet werden soll. Ich lege dort die Maxwell-Hertz'schen Gleichungen für den leeren Raum nebst dem Maxwell'schen Ausdruck für die elektromagnetische Energie des Raumes zugrunde und unter dem Prinzip:

Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Parallel-Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden (Relativitätsprinzip).

Geht man auf diese Grundlagen²⁾ über, so lautet die allgemeine Form des nachfolgenden Resultats ab (I. c. § 8):

Ein System von ebenen Lichtwellen, welches, auf dem Koordinatensystem (x, y, z) bezogen, die Energie L , die Strahlrichtung (Wellennormale) bildet den Winkel φ mit der x -Achse des Systems. Führt man es nun, gegen das System (x', y', z') in gleichförmiger Paralleltranslation begriffenes Koordinatensystem (ξ, η, ζ) ein, dessen Ursprung sich mit der Geschwindigkeit v langs der x -Achse bewegt, so besitzt die gesamte Lichtmenge — im System (ξ, η, ζ) gemessen — die Energie:

$$L' = L \frac{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

wobei v die Lichtgeschwindigkeit bedeutet. Von diesem Resultat machen wir im folgenden Gebrauch.

11)

1) A. Einstein, Ann. d. Phys. 18, p. 689, 1905.

2) Der dort benutzte Beweis der Einstein'schen Lichttheorie beruht im wesentlichen auf den Maxwell'schen Gleichungen.

49

Article où Einstein introduit la fameuse formule $E = mc^2$.
© Annalen der physik.

démonstration, ne traite que de l'émission d'énergie électromagnétique et même spécifiquement de lumière, il a l'intuition de la généralité, on peut même dire de l'universalité, de cette équivalence lorsqu'il écrit : « La masse d'un corps est une mesure de son contenu en énergie ».

En mai 1906, Einstein revient sur le sujet et publie un second article intitulé : « Le principe de conservation du mouvement du centre de gravité et l'inertie de l'énergie » où il étend sa démonstration à « des systèmes où se produisent à la fois des processus électromagnétiques et des processus mécaniques ». Einstein précise en introduction de ce second article que ses résultats, sont, en principe, contenus dans le papier de Poincaré publié en 1900 : « Bien que les considérations formelles élémentaires nécessaires à la justification de cette assertion soient déjà contenues, pour l'essentiel, dans un mémoire de H. Poincaré, pour plus de clarté, je ne prendrai cependant pas appui sur ce mémoire ». Einstein termine son papier en faisant remarquer que le principe de conservation de la masse est un cas particulier du principe de conservation de l'énergie. Il est conscient de l'importance de cette relation $E = mc^2$ et il cherche à généraliser sa démonstration. En 1907, il publie de nouveau un article dans lequel il indique : « Par rapport à l'inertie, une masse m est équivalente à une énergie mc^2 . Ce résultat revêt une importance extraordinaire... » Il s'interroge ensuite sur la façon dont on pourrait valider expérimentalement ce

résultat. Il est persuadé que cela ne peut se faire qu'en utilisant des phénomènes radioactifs. Il écrit, avec une extraordinaire prémonition : « Il se peut que l'on découvre des processus radioactifs dans lesquels le pourcentage de la masse de l'atome initial converti en rayonnements de toutes sortes soit considérablement supérieur à ce que l'on connaît pour l'atome. » Le phénomène de fission nucléaire, qui sera découvert plus de trente ans plus tard (voir encadré), correspond au processus radioactif indiqué par Einstein.

Fission, réaction en chaîne et piles atomiques

Le physicien italien Enrico Fermi rate de peu, en 1934, la découverte de la fission. Il irradie en effet systématiquement tous les éléments, y compris l'uranium, avec des neutrons. La chimiste allemande Ida Noddack en lisant les publications de Fermi et de son équipe avait écrit : « On pourrait imaginer que, lors du bombardement de noyaux lourds avec des neutrons, ces noyaux se désintègrent en plusieurs gros fragments », mais cette remarque passa inaperçue. C'est en décembre 1938 que Hahn et Strassmann remarquent que l'irradiation de l'uranium par des neutrons semble produire des éléments plus légers. Ils sont hésitants sur leur conclusion, mais Lise Meitner n'a aucun doute, il s'agit bien de fission : sous l'impact du neutron, le noyau d'uranium est « coupé » en deux (c'est ce que l'on appelle les produits de fission). Frédéric Joliot-Curie refait l'expérience et montre que la réaction s'accompagne de l'émission de neutrons. Il comprend que cela permet de faire une réaction en chaîne : un neutron « casse » un noyau d'uranium, ce qui produit d'autres neutrons qui, à leur tour « cassent » d'autres noyaux d'uranium, etc. Joliot dépose avec Halban et Kowarski trois brevets en mai 1939 sur ce qui deviendra une « pile atomique ». C'est finalement Fermi qui fera « diverger » la première « pile atomique » le 2 décembre 1942 dans le cadre du Manhattan Project.

Première vérification de l'équivalence masse-énergie

Le facteur c^2 de $E = mc^2$ est vraiment gigantesque ! D'une part, il donne l'espoir d'une source quasi infinie d'énergie, mais il faut pour cela savoir transformer la masse en énergie, d'autre part il conduit à une variation de masse minime fût-ce lors d'un processus énergétique considérable. En 1907, on connaît l'existence de l'atome, qui s'est finalement imposée non sans mal (voir chapitre 4), on connaît également celle de la radioactivité, mais on ne connaît pas encore



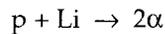
l'existence du noyau de l'atome. Or, ce sont les processus nucléaires qui permettront de valider l'équivalence masse-énergie. Rutherford découvre en 1911 le noyau de l'atome. Il montre que l'atome ressemble à un minuscule système solaire où le noyau joue le rôle du soleil et où les électrons jouent le rôle des planètes. La presque totalité de la masse de l'atome est concentrée dans le noyau, pourtant minuscule (quelques millièmes de milliardième de millimètre !) : si le noyau avait la dimension d'une tête d'épingle, les électrons de l'atome tourneraient sur un cercle centré sur le noyau à une distance de ... 100 mètres !

Revenons un instant au mystérieux radium. Dans le sillage de Pierre Curie, le physicien américain Frederic Soddy, dans un texte de 1912 intitulé *L'interprétation du radium*, écrit : « Si la doctrine de l'énergie est correcte, on ne saurait, fort heureusement, envisager que deux alternatives. Ou l'énergie doit provenir du radium lui-même, et cette réponse, qui, je le crois, est la seule vraie, sera la première alternative : ou l'énergie doit être fournie par le milieu extérieur au radium, et nous appellerons cette opinion la seconde alternative... Si l'énergie existe accumulée dans le radium, elle doit être dans l'atome même, par conséquent, si le radium se transforme, ce doit être l'atome d'un élément qui se transforme. Cette transformation d'un élément serait une transformation, changement plus fondamental et plus intime que le changement chimique ou que tout autre espèce connue de changement matériel. » Soddy ne peut mieux dire : en effet, quelques années plus tard, Rutherford (encore lui !) réalise le rêve millénaire des alchimistes ; la transmutation d'un élément en un autre élément, non pas la transformation du mercure en or, mais celle de l'azote en oxygène. Il annonce sa découverte ainsi : « Nous pouvons conclure que l'azote est désintégré [par] la particule alpha, et que l'atome d'hydrogène qui est libéré était un constituant du noyau d'azote. » Une telle transmutation n'est possible que parce qu'une petite fraction de la masse initiale est transformée en énergie, mais en 1919 le mécanisme en œuvre est encore inconnu. Les premières évidences de transmutation avaient en fait été décelées par Soddy et Rutherford dès 1901. Ils travaillaient ensemble à l'université Mc Gill de Montréal. Soddy dit alors à Rutherford : « Ceci est une transmutation. Le thorium se désintègre en un autre élément ». Rutherford lui répond alors : « Pour l'amour de Dieu, Soddy, tais-toi, on va nous prendre pour des alchimistes ! »

En 1921, le grand physicien autrichien Wolfgang Pauli indique que « la loi d'inertie de l'énergie (c'est-à-dire l'équivalence masse-énergie) sera peut-être vérifiée dans l'avenir à partir d'observations sur la stabilité des noyaux. » Il faudra attendre encore plus de dix ans. La confirmation est faite en 1932, cette année-là est d'ailleurs considérée comme une « année miraculeuse » de la physique nucléaire car les découvertes s'y succèdent. Passons-les rapidement en revue. D'abord celle du neutron, par le



physicien anglais James Chadwick, le 17 février 1932. Ainsi le noyau de l'atome est-il constitué de protons et de neutrons. Les neutrons ont une masse similaire à celle des protons, en fait ces deux particules sont cousines, elles constituent deux états possibles de ce que l'on appelle le nucléon. Mais tandis que le proton est stable, le neutron, si il est libre (ce qui n'est pas le cas lorsqu'il est dans un noyau), se désintègre spontanément en un proton, un électron et un anti-neutrino (une fois de plus dans cette réaction de la masse se transforme en énergie). Le 2 août de la même année, l'américain Carl Anderson observe un « événement curieux » ; il vient de découvrir le positon, c'est-à-dire l'électron positif ! Il s'agit de la première observation d'anti-matière (le positon est « l'anti-électron »). Toujours en 1932, à Berkeley en Californie, Ernest Lawrence invente un accélérateur de particules, le cyclotron. Sa première machine tient dans sa main ! Mais rapidement les cyclotrons deviennent plus grands et plus puissants, atteignant un diamètre de 4,5 m en 1938. Ces nouvelles machines permettront de faire de très nombreuses découvertes en physique nucléaire. La même année, un chimiste américain Harold Urey découvre le deutérium, c'est-à-dire l'isotope lourd de l'hydrogène. Ce deutérium jouera un rôle considérable dans la transformation de la masse en énergie. En effet, lorsque dans une molécule d'eau (H_2O), on remplace l'hydrogène (H) par du deutérium (D), on obtient de l'eau lourde (D_2O). Or cette eau lourde jouera un rôle important dans la réalisation des premières « piles atomiques », on se souvient en particulier de l'épisode de la bataille de l'eau lourde. Finalement, c'est aussi en 1932 que les physiciens Cockcroft et Walton ont réalisé la première vérification expérimentale de l'équivalence masse-énergie. En bombardant des atomes de lithium (Li) avec des protons (p) ils ont obtenu des particules alpha (α , noyau d'hélium) suivant la réaction :



Dans cette réaction la masse au repos des constituants initiaux (le proton et le noyau de lithium) est plus grande que celle des constituants finaux (les deux particules alpha). La différence de masse (Δm) est transformée en énergie cinétique E emportée par les particules alpha conformément à la formule $E = (\Delta m) c^2$. De plus, cette première vérification expérimentale a pu être faite avec une très bonne précision (inférieure à 1 %).

Ces expériences de physique nucléaire auraient conduit immanquablement les physiciens à la conclusion de l'équivalence entre masse et énergie. Il est remarquable que cette équivalence, traduite par la formule $E = mc^2$, ait été découverte trente ans plus tôt par la seule force de la théorie.



Les isotopes

Les atomes sont constitués d'un noyau autour duquel gravitent Z électrons. Le nombre Z caractérise l'élément chimique et s'appelle le numéro atomique. À un Z donné correspond un élément chimique donné (placé dans l'une des cases du tableau périodique de Mendeleïev). Le noyau est constitué de Z protons et de N neutrons. Les masses du proton et du neutron étant voisines, celle du noyau est de l'ordre de $Z + N = A$ (en « unités de masse atomique », c'est pourquoi A est appelé la masse atomique de l'élément. Pour un même élément, donc pour un même Z , il peut exister plusieurs noyaux qui diffèrent uniquement par leur nombre de neutrons. Comme ils occupent la même case du tableau périodique, on les appelle des isotopes (du grec *isos* (égal) et *topos* (lieu)). Par exemple l'hydrogène ($Z = 1$) possède deux isotopes : le deutérium ($Z = 1$ et $N = 1$), qui existe à l'état naturel, et le tritium ($Z = 1$ et $N = 2$), qui étant instable (radioactif) n'existe pas à l'état naturel. L'élément naturel le « plus lourd » est l'uranium ($Z = 92$), son isotope le plus abondant est l'uranium 238 ($N = 146$). Il n'existe que 90 éléments naturels car le technétium ($Z = 43$) et le prométhéum ($Z = 61$) étant radioactifs ne se trouvent pas sur terre (ni dans l'Univers !). Tous les éléments qui sont au-delà de l'uranium (les transuraniens) sont également instables. L'élément le plus lourd ($Z = 109$) portant un nom est le meitnerium (de Lise Meitner) et l'élément le plus lourd connu à ce jour correspond à $Z = 116$ (l'élément $Z = 118$ avait été annoncé, mais à tort). Au total il y a plus de 300 isotopes stables, mais plus de 3000 sont connus (la plupart sont radioactifs).

Une conséquence surprenante : l'anti-matière

L'anti-électron

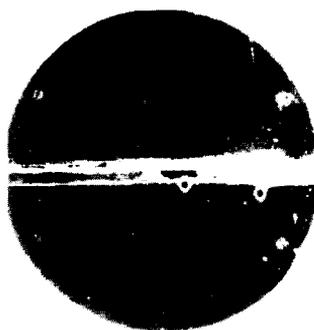
Nous avons indiqué précédemment que l'anti-matière, ou du moins sa première trace sous forme d'anti-électron, avait été observée par Carl Anderson en 1932. Sa découverte venait confirmer la prévision faite par le physicien théoricien anglais Paul Dirac. Ce dernier avait établi une équation relativiste de la mécanique quantique (*l'équation de Dirac*) en 1928 et cette équation faisait apparaître des états d'énergie négative. Dirac écrit en 1929 à ce propos : « *Nous sommes conduit à émettre l'hypothèse que les trous apparaissant dans la distribution d'électrons d'énergie négative sont des protons* ». Puis en 1931, renonçant à l'hypothèse des



protons, il prédit : « Les trous seraient une nouvelle espèce de particule, que l'on n'a jamais détectée, de même masse que l'électron, mais de charge opposée. »

Un peu plus d'un an plus tard, sa fabuleuse hypothèse était confirmée. En France, Frédéric et Irène Joliot Curie, qui ont certainement été les premiers à voir un anti-électron, manquent de peu la découverte : ils signalent, en effet, au cours d'une expérience destinée à mieux cerner les propriétés des neutrons que parmi les électrons observés « certains sont déviés en sens contraire par le champ magnétique ». Ils interprètent leurs clichés comme résultant d'électrons se dirigeant vers la source alors qu'il s'agissait de positon venant de la source. Après avoir eu connaissance de la découverte de Carl Anderson, ils se mettent à étudier les propriétés de ces électrons positifs (e^+).

Cliché de la première
trace d'anti-matière :
c'est le 2 août 1932
que Carl Anderson
découvre le positon.
© CERN.



Ils sont les premiers à mettre en évidence les phénomènes de matérialisation et d'annihilation. Dans le phénomène de matérialisation, un rayon γ (qui n'est rien d'autre qu'un rayonnement électromagnétique de grande énergie, ou si l'on préfère de la lumière ayant une fréquence très élevée) se transforme en un électron e^- et un positon e^+ suivant la réaction : $\gamma \rightarrow e^- + e^+$. Or le photon γ n'a pas de masse, tandis que l'électron et le positon en possède une égale à $m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg, ce qui correspond à une énergie $E = mc^2$ de 511 keV. Si donc un γ possède une énergie supérieure ou égale à 2 fois 511 keV (soit 1,02 MeV), il peut se matérialiser, c'est-à-dire se transformer en particules ayant une masse. De l'énergie pure se transforme en matière : on ne peut pas mieux valider l'équivalence masse-énergie ! Inversement lorsqu'un électron rencontre un positon ils s'annihilent : les deux particules disparaissent et se transforment en énergie pure suivant la réaction inverse à la précédente, soit : $e^+ + e^- \rightarrow \gamma$. On sait donc maintenant transformer de la masse en énergie et inversement.



Anti-protons et anti-atomes

On peut envisager de créer d'autres anti-particules. Le seul problème est toujours ce facteur c^2 , qui est énorme. En 1932, on ne connaît que trois particules : l'électron, le proton et le neutron. Aussi, il est tentant de créer des anti-protons et des anti-neutrons, mais le proton et le neutron ont une masse deux mille fois plus grande que celle de l'électron ; il faut donc deux mille fois plus d'énergie. La matérialisation du proton par exemple nécessite donc 2 GeV (2 milliards d'électron Volt) et non pas seulement 1 MeV (1 million d'électron Volt). Le plus grand cyclotron (celui de 4,5 m de diamètre) peut, en 1938, accélérer des particules jusqu'à 100 MeV : c'est beaucoup, mais on est encore loin du compte puisqu'il manque un facteur 20 ! Or le cyclotron ne peut faire mieux, il faut inventer d'autres concepts d'accélérateur : le synchrocyclotron, le synchrotron et le bêtatron font leur apparition. Finalement, en octobre 1955, une équipe conduite par Emilio Segré réussit, en utilisant le bêtatron de Berkeley, l'exploit tant attendu. Le *New York Times* titre : « *Une nouvelle particule découverte ; le proton négatif* ». Un an plus tard une autre équipe réussit à mettre en évidence l'anti-neutron.

La question se pose alors de savoir si l'on peut faire des anti-noyaux, voire des anti-atomes ! Une première réponse est donnée en 1965 lorsque, de façon indépendante, deux équipes réussissent à obtenir un anti-noyau de deutérium (c'est-à-dire un état dans lequel un anti-proton est lié de façon stable à un anti-neutron). La « fabrication » d'un anti-atome est encore plus complexe car il faut obtenir un anti-noyau d'une part et un anti-électron d'autre part et les ralentir suffisamment pour qu'ils interagissent l'un avec l'autre. Le problème est bien sûr de conserver assez longtemps ces anti-particules, car dès qu'une anti-particule rencontre sa particule associée, l'annihilation se produit et tout est à refaire ! Le CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire) a construit une machine qui permet de ralentir puis de « stocker » des anti-protons de faible énergie : il s'agit de LEAR (Low Energy Anti-proton Ring). Grâce à cette machine, fin 1995, une équipe de physicien a obtenu des atomes d'anti-hydrogène, certes pas en grande quantité : 9 anti-atomes seulement ! La question est de savoir si le comportement de l'anti-matière est similaire à celui de la matière. La question est suffisamment importante pour qu'une nouvelle machine soit construite, elle s'appelle AD pour Antiproton Decelerator. Cette fois-ci, l'anti-hydrogène est produit en « grande » quantité, plus de 50 000 depuis le début de l'expérience en septembre 2002. En dehors des questions de physique fondamentale, on peut se demander s'il n'y aurait pas là le moyen de réaliser un fantastique réservoir d'énergie. La réponse est non et pour très longtemps pour deux raisons ; d'une part, l'obtention d'anti-matière se fait avec un rendement déplorable (de l'ordre du cent



millième de %), d'autre part, une fois l'anti-matière créée, il faut pouvoir la stocker alors qu'elle ne demande qu'à s'annihiler avec toute matière environnante !

Existe-t-il un anti-Univers ?

La découverte de l'anti-matière a immédiatement fait jaillir une question ; existe-t-il un monde fait d'anti-matière ? Y a-t-il dans l'Univers des anti-planètes, des anti-étoiles, des anti-galaxies ou même un anti-Univers ? A priori rien de tout cela n'existe : à la fin des années 1950, les observations astronomiques ont montré que la quantité d'anti-matière dans notre galaxie était inférieure à un cent-millionième de la quantité de matière. Pour expliquer cette absence, on peut envisager deux hypothèses : la première est que l'anti-matière a complètement disparu au cours de l'histoire de l'Univers. La seconde est que la matière et l'anti-matière ont été complètement séparée, et forment deux régions bien distinctes de l'Univers. Dans le second cas, de l'anti-matière pourrait nous parvenir de cette anti-région. Mais si cette anti-matière nous parvenait de ces régions extragalactiques, nous ne pourrions pas nous en apercevoir ! En effet un anti-noyau (par exemple anti-hélium ou anti-carbone) venant d'une anti-galaxie lointaine, interagirait avec l'atmosphère et s'annihilerait. C'est la raison pour laquelle l'observation doit être faite hors atmosphère.

Un premier détecteur (AMS-01) a été réalisé en 1998 et a volé sur la navette spatiale pendant dix jours pour faire cette détection. Le résultat a été négatif. À l'heure actuelle, une seconde expérience (AMS-02) est en cours de démarrage, un grand détecteur d'anti-noyau est embarqué sur la station internationale pour plusieurs années. Examinons maintenant la première hypothèse : et si l'anti-matière avait disparue ? Pour cela nous devons dire deux mots sur ce que l'on appelle en physique la *violation de symétrie*. Dans les années 40, les physiciens théoriciens montrent à partir d'arguments très généraux, qu'il doit y avoir invariance sous l'effet du produit de la conjugaison de charge (C), de l'inversion de l'espace (P) et du renversement du temps (T). Cette *invariance CPT* n'est d'ailleurs à ce jour pas remise en cause. Plus précisément, on dit que l'on effectue une transformation C lorsque l'on remplace chaque particule par son anti-particule ; une transformation P est, elle, obtenue en remplaçant une situation réelle par celle que l'on observerait dans un miroir ; enfin une transformation T correspondant à l'inversion de toutes les vitesses. En 1957, deux physiciens, Lee et Yang, ont découvert la violation de P, c'est-à-dire que certains phénomènes de la Nature (liés à l'interaction faible) distinguent la droite de la gauche. En 1964, J. Cronin et Y. Fitch montrent qu'il y a également violation de CP. Enfin, à la fin de 1998, la violation de T



est démontrée au CERN (expérience CPLEAR), mais la violation enregistrée est, compte tenu de la violation de CP, compatible avec l'invariance CPT. Le point important ici est que la violation de CP permet d'interpréter l'excès de matière par rapport à l'anti-matière. Sakharov en 1967 a imaginé le mécanisme suivant ; la violation de CP engendre à haute énergie (c'est-à-dire suivant la théorie du Big Bang, lors des premiers instants de l'Univers) une différence minuscule entre le taux de décroissance de la matière et celui de l'anti-matière. Il s'en suit un léger excès de la matière par rapport à l'anti-matière. Ensuite l'anti-matière s'est annihilée, laissant l'excès de matière qui constituerait notre Univers.

$E = mc^2$ au quotidien : de l'énergie nucléaire à la médecine

En France près de 80 % de l'électricité produite est d'origine nucléaire. Cela veut dire que l'on met en œuvre, dans les centrales nucléaires, la relation d'Einstein $E = mc^2$ pour transformer un peu de masse en énergie. C'est dire si l'équivalence masse-énergie est devenue usuelle ; elle accompagne nos gestes les plus quotidiens comme utiliser un grille-pain ou frapper sur un ordinateur personnel ! Regardons d'un peu plus près par quel mécanisme on réussit à extraire cette énergie.

La découverte de la fission nucléaire

Tandis que la force de liaison qui retient les électrons sur leurs orbites atomiques est d'origine électromagnétique, il ne peut pas en être de même au sein du noyau. En effet les protons qui se trouvent dans le noyau atomique se repoussent à cause de la force électrostatique, or les noyaux sont stables. Il y a donc une autre interaction en jeu, plus forte, puisqu'elle parvient non seulement à compenser cette répulsion électrostatique mais aussi à conférer au noyau une très grande stabilité. Cette force a été découverte en 1934, on l'appelle la force forte. Elle va conférer aux réactions nucléaires une énergie énorme, de très loin supérieure à celle mise en œuvre dans les réactions chimiques qui, elles, sont le résultat de l'interaction entre les couches électroniques externes des atomes. L'énergie de liaison des électrons sur leur couche externe est de l'ordre de l'électron Volt (eV). Dans le noyau, les nucléons (proton ou neutron) possèdent chacun une énergie de liaison qui est de l'ordre de 10 MeV ; dix millions de fois plus que pour les électrons ! On comprend alors toute la potentialité qu'il y a à utiliser des réactions nucléaires plutôt que des réactions chimiques pour produire de l'énergie.



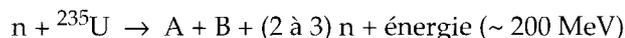
Chadwick a découvert le neutron en 1932, comme nous l'avons vu. Très peu de temps après, Fermi et son équipe, en irradiant avec des neutrons tous les éléments du tableau périodique, y compris l'uranium, passent très près de la découverte de la fission. Malgré la publication en 1934 par Ida Noddack d'un article dans lequel elle explique clairement la possibilité d'interpréter les résultats de l'expérience par la cassure d'un atome lourd en approximativement deux parts égales, il faudra encore attendre quatre ans pour que la découverte par Hahn et Strassman (avec le support essentiel de Lise Meitner) soit faite. On a vu, au premier chapitre, l'enchaînement des événements : Bohr alerte immédiatement les physiciens américains de cette découverte, Einstein écrit au Président Roosevelt en août 1939 pour le prévenir de la menace potentielle que représenterait l'utilisation de la fission dans une arme d'un genre nouveau, et finalement le Manhattan Project est créé en juin 1942, six mois après l'attaque de Pearl Harbor. C'est dans le cadre du Manhattan Project que Fermi réalisera à Chicago la première « pile atomique » ; elle « divergera » (suivant le terme consacré) le 2 décembre 1942 à 14h20. La puissance dégagée avait été volontairement limitée à un très faible niveau : 1/2 Watt !

Première « pile atomique » française ZOE (puissance Zéro, Oxyde d'uranium, Eau lourde) au fort de Châtillon (15 décembre 1948 à 12 h 12). Ce réacteur de recherche sera utilisé pendant 27 ans et sera arrêté en 1976 après 100 000 heures de fonctionnement.
© A. Gonin/CEA.



La fission nucléaire domestiquée

Précisons le mécanisme en jeu. Un neutron lent (n) en interagissant avec de l'uranium 235 (^{235}U) va le casser en deux morceaux A et B (que l'on appelle les produits de fission). La réaction peut s'écrire :



Les neutrons, émis lors de la réaction, vont pouvoir initier à leur tour d'autres réactions du même type ; c'est le principe de la réaction en



chaîne. Cependant ce n'est pas aussi simple que cela. En effet les neutrons émis sont trop rapides et la probabilité qu'ils ont d'interagir avec un autre noyau d'uranium est faible. La réaction ne peut pas être entretenue, d'où la nécessité de ralentir les neutrons, pour se faire il doivent subir des chocs avec des éléments légers, de préférence le plus léger de tous : l'hydrogène. Cela semblerait facile si il suffisait de les ralentir avec de l'eau puisque celle-ci contient de l'hydrogène. Il y a cependant un problème ; l'hydrogène ralentit certes les neutrons, mais de temps en temps, il les absorbe aussi ! Or même en utilisant une géométrie optimum pour conduire la réaction en chaîne, entre les neutrons qui s'échappent et ceux qui sont absorbés il n'en resterait plus suffisamment pour poursuivre la réaction. Il faut donc se tourner vers un autre élément léger qui absorbe moins les neutrons ; le meilleur choix est l'eau lourde car le deutérium, contrairement à l'hydrogène, absorbe très peu les neutrons. On comprend l'importance du précieux liquide et la bataille qui s'en suivit pendant la guerre pour récupérer tout le stock mondial avant les allemands [on peut également utiliser du carbone, sous forme de graphite ultra pur et c'est ce qui a été fait pour le premier réacteur construit par Fermi]. Le ralentissement des neutrons n'est pas la seule difficulté pratique. Nous avons dit que la réaction se faisait sur l'isotope 235 de l'uranium. Cependant l'uranium à l'état naturel existe sous forme de deux isotopes, l'uranium 238 (92 protons + 146 neutrons) et l'uranium 235 (92 protons + 143 neutrons). Le problème est que l'uranium 235 n'est présent dans l'uranium naturel qu'à raison de 0,7 %. Comme l'uranium 238 et l'uranium 235 sont deux isotopes, ils possèdent les mêmes propriétés chimiques, il est donc impossible de les séparer par voie chimique ! et c'est là tout le problème de l'enrichissement de l'uranium qui est posé. Nous ne traiterons pas ici de cette question, nous mentionnerons simplement le nom des techniques physiques qui permettent cet enrichissement et qui sont fondées sur le fait que l'uranium 238 est un peu plus lourd que son homologue 235 ; diffusion gazeuse, ultra centrifugation, spectrométrie de masse, etc. Il est possible de concevoir des réacteurs nucléaires qui fonctionnent avec de l'uranium naturel, mais la faible teneur en uranium 235 impose de tenir une comptabilité neutronique extrêmement serrée et d'utiliser des ralentisseurs de neutrons (on parle de modérateurs) rares et chers comme l'eau lourde et le carbone ultra pur. Dans les filières actuelles, et en particulier dans les centrales nucléaires qui produisent l'électricité en France, pour être un peu plus confortable dans le bilan neutronique, et pour pouvoir utiliser de l'eau légère (c'est-à-dire l'eau classique), on enrichit légèrement l'uranium (on porte le taux d'uranium 235 à environ 3 %). L'uranium très enrichi n'est nécessaire que pour les bombes atomiques, mais c'est une autre histoire.



Un problème pratique aurait pu rendre impossible la domestication de l'énergie nucléaire, il s'agit de la vitesse de « propagation » de la réaction en chaîne. Une fois la réaction en chaîne amorcée, la population neutronique (et donc l'énergie libérée) double toutes les ... dix milliardièmes de seconde ! Comment dans ces conditions contrôler la réaction ? Cette fois le coup de pouce vient de la nature ; les produits de fission émettent des neutrons « à retardement » et c'est grâce à cette population excédentaire à l'évolution peu rapide que le contrôle peut se faire en toute sécurité.

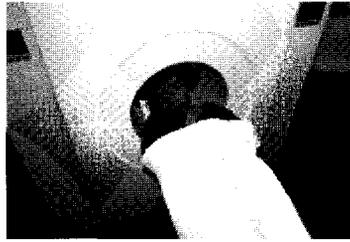
De façon plus générale, on peut montrer qu'il est possible de fissionner avec des neutrons lents (neutrons thermiques) les isotopes impairs (les plus connus sont ceux de l'uranium, l'uranium 235 que l'on a déjà vu, mais l'uranium 233 (qui n'existe pas à l'état naturel) pourrait aussi être utilisé, ainsi que le plutonium, essentiellement le plutonium 239, l'isotope 241 est également possible). On peut également fissionner les isotopes impairs (^{238}U , ^{240}Pu), mais cette fois il faut fournir un peu d'énergie au noyau et utiliser des neutrons rapides (typiquement avec des neutrons incidents dont l'énergie est supérieure au MeV). Cette possibilité a donné lieu à la filière, dite rapide, bien connue en France avec la trop fameuse centrale Superphénix.

Dans ces centrales nucléaires quelle masse convertit-on en énergie ? le calcul est facile à faire. Prenons la réaction : $n + {}^{235}\text{U} \rightarrow \text{A} + \text{B} + (2 \text{ à } 3) n + \text{énergie} (\sim 200 \text{ MeV})$. La masse initiale est celle de 236 nucléons (235 proviennent de l'uranium, le dernier est le neutron), ils représentent une énergie équivalente ($E = mc^2$) d'environ 236 GeV (un calcul précis donne 221 GeV), autrement dit environ un millième de la masse est converti en énergie. Ainsi l'électricité nucléaire provient de la conversion d'un millième de la masse de l'uranium en énergie !

L'anti-matière au service de la médecine

L'équivalence masse-énergie est également en œuvre très directement en médecine dans la technique baptisée PET pour *Positron Emission Tomography* (tomographie à émission de positons). Le principe est le suivant : on injecte au patient un liquide contenant des traces d'un radioélément (généralement du carbone (^{11}C), de l'azote (^{13}N), de l'oxygène (^{15}O) ou du fluor (^{18}F)), lequel va émettre des positons. Ces radioéléments sont choisis pour avoir une courte durée de vie (ce qui impose d'ailleurs de les fabriquer à l'hôpital même à l'aide d'un cyclotron) de sorte que la dose déposée sur le patient est négligeable. Lorsqu'un positon est émis par le corps, il s'annihile immédiatement avec un électron pour donner naissance à deux photons gamma (γ) de 511 keV facilement reconnaissables par leur énergie caractéristique.





Équipement
permettant de faire
l'image PET du
cerveau.
© CERN.

Ces deux photons de même énergie sont émis au même instant dans des directions opposées (pour satisfaire la conservation de la quantité de mouvement) ce qui est essentiel pour la détermination de leur point d'origine. On remonte ainsi à la position de l'émetteur et l'intensité du rayonnement mesurée renseigne sur sa quantité. On peut ainsi (à l'aide d'un système informatique sophistiqué) faire une imagerie et même mieux une tomographie, c'est-à-dire que l'on reconstitue par le calcul des coupes à plusieurs profondeurs de l'organe examiné. Cette technique connaît depuis le début des années 1990 une forte croissance, elle est utilisée en particulier pour la détection de cancers et le suivi des effets des thérapies associées.



4

Des atomes à l'infiniment petit

Les atomes : une bataille de cent ans

L'héritage grec

La notion d'atome remonte à la Grèce antique. Leucippe est le fondateur présumé de la théorie atomiste. Pour lui, l'être est une multitude infinie d'atomes qui se meuvent dans le vide. Son disciple Démocrite développe la théorie atomiste de Leucippe ainsi que la première physique franchement matérialiste qui exclut l'intervention des Dieux dans l'explication de l'Univers. Démocrite considère deux principes de formation de l'Univers : le plein, ou *atomos* et le vide. Les atomes se déplacent au hasard dans le vide, se heurtent mutuellement puis se rassemblent, forment des figures qui se distinguent par leur taille, leur poids et leur rythme. Au 1^{er} siècle avant J.-C., Lucrèce écrit dans son *De natura rerum* : « Les corps, ce sont d'une part les principes simples des choses, les atomes, et d'autre part les composés formés par ces éléments premiers ».

Il faut toutefois attendre le milieu du XVII^e siècle pour voir réapparaître, de façon plus construite, la notion d'atome. Il y a d'abord, dans les années 1660, la loi de Boyle-Mariotte qui stipule que dans les



Daniel Bernoulli
(1700-1782).



conditions normales et à température constante, la pression d'un gaz est inversement proportionnelle à son volume. Newton, dans ses *Principia* de 1687, en propose une explication : « Si un gaz est composé de particules qui exercent des forces répulsives sur leurs voisines, la grandeur de la force étant inversement proportionnelle à la distance entre les molécules, alors la pression sera inversement proportionnelle au volume ». Daniel Bernoulli, dans son célèbre ouvrage *Hydrodynamica* de 1738, relie le produit de la pression par le volume au nombre de molécules, leur masse et leur vitesse. En somme, il fonde la thermodynamique statistique¹ avec plus d'un siècle d'avance.

Les atomes en chimie

ELEMENTS

Hydrogen 1	Strontian 87
Air 5	Barium 68
Carbon 6	Lead 207
Oxygen 7	Zinc 66
Phosphorus 9	Copper 64
Sulphur 16	Iron 56
Magnesia 28	Silver 197
Lime 28	Gold 197
Soda 48	Platina 177
Potash 56	Mercury 200

Extrait de l'ouvrage de John Dalton (1766-1844) dans lequel il introduit la notion moderne d'atome.

© Tous droits réservés.



Amedeo Avogadro

Amedeo Avogadro
(1776-1856).

En chimie, la notion d'atomes et de molécules commence à devenir un outil opérationnel à la fin du XVIII^e siècle, c'est-à-dire avec la naissance de la chimie moderne de Lavoisier. Ce dernier s'associe avec le mathématicien Laplace pour une partie de ses travaux et, à la génération suivante, Ampère se passionnera pour cette science : « *La chimie, qui était une cuisine, devient mathématique* », indique l'un de ses contemporains. Joseph Proust énonce en 1799 la loi des proportions fixes, selon laquelle deux corps s'unissent pour en former un troisième suivant des proportions invariables. Cette loi est confirmée pour les gaz par Gay Lussac en 1808 (« loi des volumes »). La même année, le chimiste anglais John Dalton énonce la « loi des proportions multiples » expliquant ainsi les répartitions pondérales des combinaisons chimiques. Dalton, très en avance sur son temps, pense que les atomes des divers éléments sont formés à partir du plus simple d'entre eux, celui de l'hydrogène. Il dresse en 1803 la première table où les poids relatifs des atomes des différents éléments sont donnés par rapport à l'hydrogène pris comme unité. Ainsi, pour Dalton, la matière est faite d'atomes ; les atomes ne peuvent être ni créés ni détruits ; tous les atomes d'un même élément sont identiques ; les différents éléments correspondent à différents atomes ; les réactions chimiques correspondent à des réarrangements entre atomes et les éléments composés (molécules) sont constitués d'atomes de différents éléments. Il faudra néanmoins cent ans pour que ces idées soient complètement acceptées. Ce n'est d'ailleurs qu'en 1813 que le mot atome fait son apparition en chimie (grâce à Berzelius) et 1831 pour qu'une distinction claire soit faite entre atome et molécule. Notons que c'est à Berzelius que l'on doit la désignation des éléments par l'initiale de leur nom latin (par exemple Na pour Natrium (sodium)). En 1814, Ampère énonce la loi connue maintenant sous le

¹ Comme nous l'avons vu au chapitre 2, les pères fondateurs de la thermodynamique statistique sont Maxwell et Boltzmann qui ont commencé leurs travaux sur ce sujet à partir de 1860.

nom d'Avogadro-Ampère : des volumes égaux de gaz dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent le même nombre de molécules (Avogadro avait en effet énoncé, de façon indépendante dès 1811 cette même loi, mais de façon assez confuse). Par la suite, en 1827, année où le botaniste écossais Robert Brown découvre, en examinant des grains de pollen, des particules en suspension dont le mouvement « ne vient ni de courant du fluide, ni de son évaporation progressive, mais bien des particules elles-mêmes ». C'est ce mouvement Brownien, du nom de son découvreur, qu'Einstein va interpréter en 1905 et qui servira à Jean Perrin pour fournir la preuve irréfutable de l'existence des atomes. Pour l'heure, l'atome est loin de faire l'unanimité. C'est ainsi que le grand chimiste J.B. Dumas déclare en 1836 au Collège de France : « Si j'en étais le maître, j'effacerais le mot atome de la science, persuadé qu'il va plus loin que l'expérience, et jamais en chimie nous ne devons aller plus loin que l'expérience ». De son côté, le grand physicien Lord Kelvin affirme en 1862 : « Je ne crois pas aux atomes ». Quant au chimiste Wurtz il dira en 1884 : « Je ne veux pas voir la chimie dégénérée en religion. Je ne veux pas que l'on croie à l'existence réelle des atomes comme les chrétiens croient à la présence réelle de Jésus-Christ dans l'hostie consacrée ». Toutefois, en 1860, le premier « Congrès des chimistes » se tient à Karlsruhe et l'on y adopte les définitions suivantes : « La molécule est la quantité d'une substance qui entre en réaction et détermine les propriétés physiques » et « L'atome est la plus petite quantité de substance contenue dans une molécule ». Une étape importante est franchie en 1865, lorsque Joseph Loschmidt réussit, pour la première fois, à dénombrer les molécules². En 1869, le chimiste russe Dimitri Mendeleïev publie sa classification périodique des éléments qui se révélera vite être un outil précieux.

Ueber die Beziehungen der Eigenschaften zu den Atomgewichten der Elemente. Von D. Mendeleïeff. — Ordnet man Elemente nach zunehmenden Atomgewichten in vertikale Reihen so, dass die horizontalen analoge Elemente enthalten, wieder nach zunehmenden Atomgewicht geordnet, so erhält man folgende Zusammenstellung, aus der sich einige allgemeine Folgerungen ableiten lassen.

			Th = 114	Zr = 90	Y = 100
			V = 51	Ni = 58	Ta = 182
			Cr = 52	Co = 59	W = 196
			Mn = 55	Nb = 120,4	Pt = 197,4
			Fe = 56	Mo = 166,4	Ir = 195
			Ni = 58	Pd = 106,6	Os = 190
			Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
H = 1			Zn = 65,2	Cd = 112	
Be = 9,4	Mg = 24				
B = 11	Al = 27,4				
C = 12	Si = 28				
N = 14	P = 31				
O = 16	S = 32				
F = 19	Cl = 35,5				
Li = 7	Na = 23				
	K = 39				
	Ca = 40				
	Ti = 48				
	Va = 56				
	Cr = 52				
	Mn = 55				
	Fe = 56				
	Co = 59				
	Ni = 58				
	Cu = 63,4				
	Zn = 65,2				
	Al = 27,4				
	Si = 28				
	P = 31				
	S = 32				
	Cl = 35,5				
	Br = 80				
	I = 127				
	As = 75,4				
	Sb = 122				
	Bi = 208				
	P = 31				
	S = 32				
	Cl = 35,5				
	Br = 80				
	I = 127				
	As = 75,4				
	Sb = 122				
	Bi = 208				
	Pb = 207				

1. Die nach der Reihen des Atomgewichts geordneten Elemente zeigen eine stufenweise Abänderung in den Eigenschaften.
 2. Chemisch-analytische Elemente haben entweder gleichzeitige Atomgewichte (Pt, Ir, Os, oder ternäre nehmen gleichviel an K, Rb, Cs).
 3. Das Aussehen nach dem Atomgewichte entspricht der Reihenfolge der Elemente und bis zu einem gewissen Grade der Veränderlichkeit im chemischen Verhalten, z. B. Li, Be, B, C, N, O, F.
 4. Die in der Natur vorkommenden Elemente haben keine Atomgewichte.

Premier tableau périodique des éléments (17 février 1869) de Dimitri Mendeleïev (1834-1907).

² On appelle d'ailleurs *nombre de Loschmidt* le nombre de molécules de gaz contenu dans un volume de 1 cm³. La meilleure valeur actuelle de ce nombre est : 2,686 7773 × 10¹⁹/cm³.



Mesurer le nombre d'atome

En 1895 Joseph Loschmidt apporte de nouveau une grande contribution : il réussit à faire une estimation expérimentale du diamètre moléculaire et trouve une valeur comprise entre 1 et 10 \AA^3 . Peu après, Lord Rayleigh parvient à mesurer l'épaisseur d'une couche monomoléculaire d'huile et trouve une valeur d'environ 2 \AA . Jean Perrin, dès 1901, entrevoit l'atome comme un système solaire en miniature avec des électrons négatifs tournant autour d'un noyau chargé positivement. Cette description trop en avance sur son temps, ne trouve pas d'échos. On lui préfère le modèle mis au point par Joseph John Thomson en 1904, décrivant l'atome comme une sphère chargée uniformément d'électricité positive et dans laquelle orbitent des corpuscules de charge négative. Cette description reçoit le nom de « modèle du pudding » car les « électrons » sont assimilés aux grains de raisin. C'est dans ce contexte que, le 11 mai 1905, Einstein fait paraître dans les *Annalen der Physik* son article intitulé : « Sur le mouvement des particules en suspension dans un liquide au repos, suivant la théorie cinétique de la chaleur ». Il y montre en particulier comment on peut déterminer le nombre de molécules par unité de volume (nombre d'Avogadro), en mesurant les distances que parcourent les particules visibles. Le mouvement brownien est l'une des meilleures preuves directes de la réalité moléculaire et les observations suggérées par Einstein seront effectivement réalisées avec une précision étonnante par Jean Perrin. Nous y reviendrons, mais auparavant découvrons un peu mieux Robert Brown et le mouvement à qui il a donné son nom.

Robert Brown, un botaniste au service de la physique



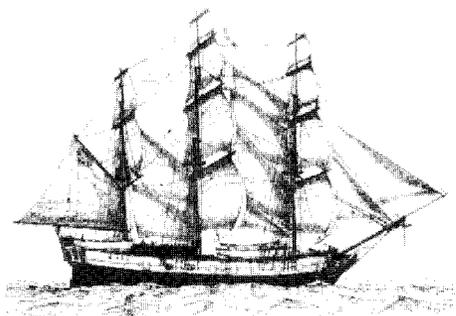
Robert Brown
(1773-1858).

Robert Brown s'est toujours passionné pour la botanique. Après des études au Marischal College d'Aberdeen (Écosse), il entre à l'Université d'Edimbourg pour suivre des études de médecine qu'il ne terminera pas. Son goût pour la botanique (il écrit son premier article sur le sujet alors qu'il n'a pas dix huit ans), le fait vite remarquer. À vingt et un ans, il rejoint l'armée comme assistant chirurgien et est affecté en Irlande. Il passera une grande partie de son temps... à étudier le grammaire allemande et la botanique ! De retour à Londres, en 1798, il a la chance

³ L'angström (\AA) est une unité de longueur qui vaut 10^{-10} m (un dix milliardième de mètre). Cette unité est très utilisée car elle correspond à la dimension typique des atomes. Cette unité vient du nom du physicien suédois Anders Angström, l'un des fondateurs de la spectroscopie.



de rencontrer Sir Joseph Banks qui est président de la Royal Society et botaniste ! Non seulement cet éminent savant lui permet d'utiliser sa bibliothèque et ses collections, mais il recommande Brown à l'Amirauté pour un poste de naturaliste à bord de l'*Investigator*, un voilier de 30 mètres de long assez semblable à celui du capitaine Cook. L'expédition, dont l'objectif est d'étudier la partie ouest de l'Australie, durera de juillet 1801 à octobre 1805. Brown ramènera 3000 espèces de végétaux dont il fera la classification lors de son retour en Angleterre. En 1810, il devient bibliothécaire de Sir Joseph Banks et sera élu à la Royal Society l'année suivante. À sa mort en 1820, Banks laissera à Brown l'usage de sa maison, de sa bibliothèque et de ses collections pour le reste de sa vie.



L'*Investigator* sur lequel Robert Brown a embarqué pour l'Australie.
© Tous droits réservés.

En 1827, Brown devient le conservateur du département botanique (nouvellement créé) du British Museum. C'est à ce moment qu'il va faire les observations qui vont le rendre célèbre. Nous ne pouvons mieux résumer ces observations qu'en utilisant les mots de Jean Perrin : *« L'agitation moléculaire échappe à notre perception directe comme le mouvement des vagues de la mer à un observateur trop éloigné. Cependant, si quelque bateau se trouve alors en vue, le même observateur pourra voir un balancement qui lui révélera l'agitation qu'il ne soupçonnait pas. Ne peut-on de même espérer, si des particules se trouvent dans un fluide, que ces particules, encore assez grosses pour être suivies sous le microscope, soient déjà assez petites pour être notablement agitées par les chocs moléculaires ? »* C'est cela que Brown va décrire.

Il publie, en 1828, un article intitulé : *« Bref compte rendu d'observations microscopiques faites durant les mois de juin, juillet et août 1827, sur des particules contenues dans le pollen des plantes ; et sur l'existence générale de molécules actives dans les corps organique et inorganique »*. Nous devons remarquer ici qu'il n'est pas le premier à faire ces observations, il cite d'ailleurs un de ses précurseurs dans son article. L'année suivante,



Brown publie un article complémentaire : « *Remarques additionnelles sur les molécules actives* » et cette fois c'est dix autres auteurs qui ont fait avant lui cette observation qu'il cite, en particulier ; Leeuwenhoek, l'inventeur du microscope ; Buffon et Spallanzani (célèbres pour leur débat sur la génération spontanée) ; Bywater, qui d'après les propres mots de Brown est arrivé en 1819 à la conclusion que « *non seulement les tissus organiques, mais également les substances inorganiques, consistent en ce que nous pouvons appeler des particules animées* ». Cela dit, Brown décrit pas à pas ses observations. Il étudie le processus de fertilisation dans certaines espèces de fleurs et, en regardant le pollen dans l'eau à l'aide d'un microscope, il observe que les petites particules ont « *un mouvement d'oscillation rapide* ». L'examen du pollen d'autres espèces confirme ce résultat. Il attribue d'abord ce mouvement aux cellules sexuelles mâles des plantes mais des observations complémentaires contredisent cette première hypothèse. Il indique qu'il « *est maintenant disposé à croire que les particules sphériques minuscules, ou molécules, de taille apparemment uniforme sont en réalité des molécules élémentaires, c'est-à-dire les constituants supposés des corps organiques, d'abord considérés par Buffon et Needham* ». Après avoir examiné un grand nombre de substances organiques, il se met à étudier également les substances inorganiques et en conclut que « *ces molécules ne sont pas limitées aux corps organiques, ni même à leurs produits* ». Brown est amené à en déduire que la matière est composée de petites particules, qu'il appelle les molécules actives, et qui sont animées d'un mouvement rapide et irrégulier. Ce mouvement leur est propre et ne provient pas du fluide environnant.

Le moins que l'on puisse dire est que les observations et l'interprétation de Robert Brown, si intéressantes soient-elles n'ont pas soulevé un enthousiasme immédiat ; on ne trouve aucune publication sur ce sujet entre 1831 et 1857 ! En revanche, à partir des années 1860 plusieurs scientifiques vont faire des recherches sur le mouvement brownien et quand Einstein se penche sur la question les principaux éléments acquis sont les suivants :

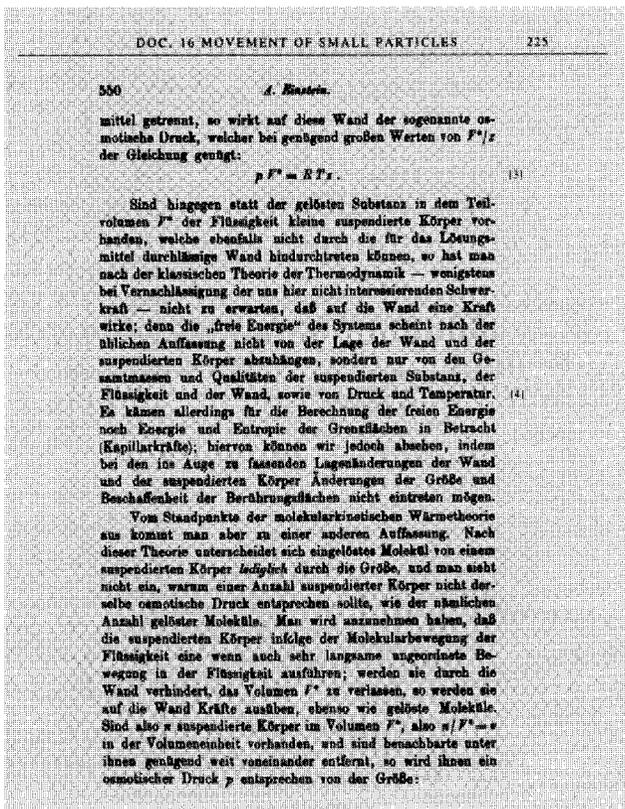
- le mouvement est très irrégulier, il est composé de translations, de rotations et de changement brusque de direction (on ne peut pas fixer une tangente à aucun point de la trajectoire) ;
- deux particules différentes ont des mouvements indépendants, même lorsqu'elles s'approchent l'une de l'autre à une distance inférieure à leur diamètre ;
- plus les particules sont petites plus le mouvement est actif ;
- la composition et la densité des particules n'ont pas d'effet ;
- moins le fluide est visqueux, plus le mouvement est actif (il est par exemple à peine perceptible dans de la glycérine, et au contraire extrêmement vif dans les gaz) ;



- le mouvement est d'autant plus actif que la température est élevée ;
- le mouvement ne cesse jamais (des observations ont été faites, par exemple, dans des inclusions liquides enfermées dans le quartz depuis des milliers d'années).

Einstein interprète le mouvement brownien

Venons-en à la contribution d'Einstein dans l'interprétation du mouvement brownien. Comme nous l'avons indiqué au 1^{er} chapitre, ses premiers travaux concernaient la physique statistique, ce domaine a d'ailleurs eu une grande influence dans toute son œuvre. Il écrit alors : « *Mon but principal était de trouver des faits prouvant autant que possible l'existence d'atomes de dimension précise et finie* ». La physique statistique était alors en pleine effervescence (voir encadré).



Article où Einstein interprète le mouvement brownien.
© Annalen der physik.



Les fondateurs de la physique statistique

Rudolf Clausius, à qui l'on doit la formulation des deux principes de la thermodynamique tels qu'on les connaît actuellement, introduit en 1865 la notion d'entropie et cherche à les relier aux lois élémentaires de la physique en remontant aux phénomènes qui ont lieu à l'échelle microscopique. Par soucis de simplification il fait l'hypothèse dans son modèle (1857) que toutes les molécules ont la même vitesse, comme il l'indique lui-même : « *Enfin il existe certainement, dans la réalité, la différence la plus variée dans la vitesse des diverses molécules. Mais dans notre analyse nous pourrions attribuer à toutes les molécules une vitesse moyenne* ». Maxwell, dès 1860, va aller plus loin en introduisant une distribution des vitesses (la fameuse *distribution de Maxwell*) : « *Il apparaît suivant cette proposition, que les vitesses sont distribuées entre les particules selon la même loi que celle qui gouverne la distribution des erreurs parmi les observations selon la méthode des moindres carrés* ». Il montre alors que le second principe n'a pas une validité absolue, dans la mesure où on peut imaginer un processus permettant de réchauffer une source chaude à partir d'une source froide : « *On pourra ainsi élever la température de B et abaisser celle de A, sans aucune dépense d'énergie, grâce uniquement à l'action intelligente d'un guide. Moralité : le second principe de la thermodynamique a le même degré de vérité que l'affirmation selon laquelle si l'on jette un verre d'eau dans la mer, on ne peut pas en retirer le même verre d'eau* ». Le guide intelligent de Maxwell sera baptisé par Ehrenfest le *Démon de Maxwell* ! Il s'en suit une période très fructueuse où les travaux de Maxwell et ceux de Boltzmann viennent se compléter de façon extrêmement efficace. Ce dernier fait la distinction entre la moyenne dans le temps sur une seule molécule et la moyenne – à un instant donné – sur beaucoup de molécules. La démonstration de l'égalité des deux situations conduit au fameux théorème ergodique (1871). Boltzmann réussit ensuite à relier la thermodynamique à la mécanique par l'intermédiaire d'un théorème également très connu : le *théorème H* (1872). Au tournant du siècle, dans les toutes premières années de 1900, le physicien américain Gibbs va approfondir ces recherches, il indique : « *Les recherches de ce type ont été appelées statistiques par Maxwell. Elles appartiennent à une branche de la mécanique qui doit son origine au désir d'expliquer les lois thermodynamique en se fondant sur des principes mécaniques, et dont les principaux fondateurs sont Clausius, Maxwell et Boltzmann* ».



Au moment où Einstein aborde la question du mouvement brownien, il n'a pas connaissance des travaux de ces augustes prédécesseurs et écrit : « *Ne connaissant pas les recherches de Boltzmann et de Gibbs, qui avaient été effectuées plus tôt et avaient littéralement épuisé le sujet, j'entrepris de développer la mécanique statistique et, à partir d'elle, la théorie cinétique moléculaire de la thermodynamique* ». Il poursuit, comme nous l'avons indiqué plus haut, en déclarant : « *Mon but principal était de trouver des faits prouvant autant que possible l'existence d'atomes de dimension précise et finie* », puis il ajoute : « *Sur ces entrefaites j'ai découvert que, suivant la théorie atomique, on devrait pouvoir observer un mouvement dont serait animées des particules en suspension, sans savoir que les observations concernant le mouvement brownien était à l'époque déjà familière* ».

Le mouvement brownien avait fait l'objet d'un assez grand nombre d'études depuis 1860 car il posait des problèmes aux physiciens : il semblait ne pas répondre au deuxième principe de la thermodynamique. Ainsi le physicien français Georges Gouy a pensé que le second principe pouvait ne pas s'appliquer aux objets de petites dimensions (inférieures au micron⁴). Commentant les travaux de Gouy, Poincaré en 1900 s'exclame : « *On croirait voir à l'œuvre le démon de Maxwell* ». Poincaré revient d'ailleurs sur la question en 1904, lors du congrès de Saint Louis, et indique : « *Brown a cru d'abord que le mouvement brownien était un phénomène vital, mais il a vu bientôt que les corps inanimés ne dansaient pas avec moins d'ardeur que les autres ; il a alors passé la main aux physiciens... Nous voyons sous nos yeux tantôt le mouvement se transformer en chaleur par le frottement, tantôt la chaleur se changer inversement en mouvement... C'est le contraire du principe de Carnot (c'est-à-dire du second principe de la thermodynamique)* ». Poincaré écrit également dans le livre qu'il a consacré à la thermodynamique : « *On peut se représenter l'Univers comme formé d'atomes incapables d'agir à distance les uns sur les autres et se mouvant en ligne droite dans des directions diverses, jusqu'à ce que ces directions soient modifiées par des chocs. Les lois du choc sont les mêmes que pour les corps élastiques. Ou bien on peut supposer que ces atomes peuvent agir à distance et que l'action mutuelle de deux atomes se réduit à une attraction ou à une répulsion dépendant seulement de leur distance. La première conception n'est évidemment qu'un cas particulier de la seconde ; je montre que toutes les deux sont incompatibles avec les principes de la thermodynamique* ».

Le premier article d'Einstein sur le sujet (reçu par l'éditeur le 11 mai 1905) s'intitule : « *Sur le mouvement de particules en suspension dans des fluides au repos requis par la théorie cinétique moléculaire de la chaleur* ».

⁴ Le micron (μm) est une unité de longueur qui vaut un millionième de mètre : $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$.



Ce titre ne contient pas le terme « mouvement brownien », et Einstein s'en explique au début de son papier : « *Il est possible que les mouvements examinés ici soient identiques au mouvement moléculaire dit brownien ; les références dont je dispose sur ce dernier sujet sont cependant trop imprécises pour que je puisse me former une opinion sur cette question* ». Einstein est le premier à effectuer une étude quantitative de ce mouvement à partir d'une analyse, fondée sur la physique statistique, du mécanisme sous-jacent. Jean Perrin, dans son admirable livre *Les atomes*, écrit à ce propos : « *L'analyse détaillée de ce mécanisme a été faite par M. Einstein, en d'admirables travaux théoriques* ». Il ajoute : « *D'autre part, et bien que la publication en soit postérieure, il est certainement juste de citer, en raison de la différence des raisonnements, l'analyse seulement approchée, mais très suggestive, que M. Smoluchowski a donnée dans le même but.* » (Voir encadré.)

Smoluchovski et le mouvement brownien

Marian Smoluchovski (1872-1917) a contribué de façon importante à l'étude du mouvement brownien mais sa renommée a été éclipsée par celle d'Einstein. Smoluchovski connaissait bien les théories précédentes du mouvement brownien. Il a été le premier à comprendre que ce mouvement résultait d'un nombre considérable de collisions (de l'ordre de 10^{20} par seconde !) sur les grains observés au microscope. Il a réfuté l'argument de l'époque suivant lequel l'effet de ces collisions devrait se compenser en moyenne en écrivant : « *C'est là une erreur conceptuelle identique à celle d'un joueur pensant qu'il ne pourra jamais perdre plus qu'une seule mise.* » Dans son article de 1906, Smoluchovski mentionne les articles publiés par Einstein en 1905, tout en précisant que son travail est indépendant (il utilise d'ailleurs une autre méthode) : « *Les découvertes d'Einstein sont tout à fait en accord avec certains résultats que j'avais obtenus plusieurs années auparavant et que je considère depuis comme un argument de poids en faveur de la nature cinétique de ces phénomènes.* » Einstein et Smoluchovski seront d'ailleurs en contact épistolaire très cordial.

Einstein n'essaie pas, contrairement à ses prédécesseurs, de raisonner sur une vitesse d'agitation moyenne, il considère le déplacement du grain pendant un temps considéré. Il montre que le carré moyen de ce déplacement (X^2) pendant une certaine durée t est proportionnel à cette durée. Le terme X^2/t est donc constant ; il mesure « l'activité » du mouvement brownien. Einstein montre alors que le mouvement brownien est un processus de diffusion des grains dans le liquide et relie le coefficient de diffusion D à la grandeur précédente



($D = \frac{1}{2} X^2/t$). Il établit ensuite une relation entre le coefficient de diffusion (qui peut être déterminé par l'observation en mesurant les valeurs de X et de t) et des grandeurs physiques suivantes : la température T du liquide ; la constante R des gaz parfait ; le nombre d'Avogadro N ; la viscosité η du liquide et le rayon a des grains supposés sphériques. Il établit la formule : $D = \frac{RT}{N} \frac{1}{6\pi a \eta}$ maintenant appelée *formule de diffusion d'Einstein*. C'est cette formule qui sera utilisée par Jean Perrin pour « compter » le nombre d'atomes, c'est-à-dire déterminer le nombre d'Avogadro.

En décembre 1905, Einstein écrit un second article sur le sujet qui s'intitule : « *Sur la théorie du mouvement brownien* ». Il considère deux autres cas : celui d'une distribution verticale d'une suspension (donc soumise à la gravitation), et celui du mouvement brownien de rotation. Les grains possèdent en plus du mouvement de translation (cas qui a été étudié par Einstein dans son premier article), un mouvement de rotation (un grain tourne irrégulièrement en même temps qu'il se déplace). Einstein, en appliquant un raisonnement similaire à celui utilisé pour la translation, établit dans son second article une relation pour le mouvement brownien de rotation. Il effectuera, un peu plus tard, deux autres publications sur ce sujet : en décembre 1906, il traite des fluctuations de potentiel entre les plaques d'un condensateur et publie un article intitulé : « *Sur un phénomène appartenant au domaine de l'électricité et ressemblant au mouvement brownien* », et en janvier 1907 il en écrit un autre pour éliminer un paradoxe apparent entre sa théorie et une loi classique de la physico-chimie (la loi de Van't Hoff).

Vérifications expérimentales

Bien que la formule de diffusion d'Einstein se prête bien à un contrôle expérimental précis, la première tentative de vérification ne sera faite qu'en 1908. Le travail majeur dans ce domaine a été publié par Jean Perrin en 1909. Combinant la formule d'Einstein et la loi donnant l'activité du mouvement Brownien, on obtient une relation entre le nombre d'Avogadro, et des paramètres mesurables (X^2 , t , a , η) décrits précédemment ($N = \frac{t}{X^2} \frac{RT}{3\pi a \eta}$). Dans une première série d'essais, une observation minutieuse du mouvement brownien sur des grains sphériques calibrés, lui a permis d'obtenir des valeurs de N comprises entre $5,5 \times 10^{23}$ et 8×10^{23} (la valeur actuelle est de 6×10^{23}). Jean Perrin a fait varier dans ses expériences la taille des grains (a) et la viscosité (η) du fluide et a montré que le résultat obtenu pour la valeur de N n'en est pas affecté, comme prévu par la formule de diffusion d'Einstein, il



indique en avoir « *ressenti une vive émotion* ». Dans une seconde série d'essais, Jean Perrin a mesuré la distribution des grains à différentes hauteurs dans une émulsion (« *13 000 grains à différents niveaux* » !) ce qui lui « *a donné pour le nombre d'Avogadro la valeur probablement meilleure de $6,8 \times 10^{23}$* ». Einstein, qui a connaissance du travail de Jean Perrin, lui écrit vers la fin de 1909 : « *Je n'aurais jamais cru possible d'étudier le mouvement brownien avec autant de précision* ». De son côté Perrin indique : « *Cette concordance décisive ne peut laisser aucun doute sur l'origine du mouvement brownien... Il devient difficile de nier la réalité objective des molécules* ». Jean Perrin, en poursuivant son travail tant minutieux que prodigieux, a finalement déterminé par *treize méthodes* différentes la valeur du nombre d'Avogadro (voir encadré ci-dessous). Il indique que l'« *on est saisi d'admiration devant le miracle de concordances aussi précises à partir de phénomènes si différents* ».

Détermination par Jean Perrin du nombre d'Avogadro par 13 méthodes différentes

(Jean Perrin, *Les atomes*, 1913)

On donne dans ce tableau les valeurs du nombre d'Avogadro obtenues par Jean Perrin par 13 méthodes différentes. Après la publication, en 1913, de ces résultats, il devenait impossible de réfuter la notion d'atomes, d'où la conclusion de Jean Perrin : « *La théorie atomique a triomphé. Encore nombreux naguère, ses adversaires enfin conquis renoncent l'un après l'autre aux défiances qui, longtemps, furent légitimes et sans doute utiles. C'est au sujet d'autres idées que se poursuivra désormais le conflit des instincts de prudence et d'audace dont l'équilibre est nécessaire au lent progrès de la science humaine.* »

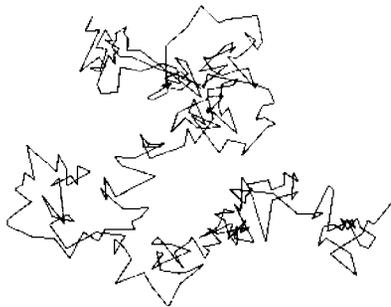
- Viscosité des gaz (éq. De Van der Waals) : $6,2 \times 10^{23}$
- Mouvement brownien (répartition des grains) : $6,83 \times 10^{23}$
- Mouvement brownien (déplacements) : $6,83 \times 10^{23}$
- Mouvement brownien (rotation) : $6,5 \times 10^{23}$
- Mouvement brownien (diffusion) : $6,9 \times 10^{23}$
- Mouvement brownien (opalescence critique) : $7,5 \times 10^{23}$
- Spectre du corps noir : $6,4 \times 10^{23}$
- Répartition irrégulière des molécules (bleu du ciel) : $6,0 \times 10^{23}$
- Charges de sphérules dans un gaz : $6,8 \times 10^{23}$
- Radioactivité (charges projetées) : $6,25 \times 10^{23}$
- Radioactivité (radium disparu) : $7,1 \times 10^{23}$
- Radioactivité (hélium engendré) : $6,4 \times 10^{23}$
- Radioactivité (énergie rayonnée) : $6,0 \times 10^{23}$
- Valeur actuelle : $6,022\ 1415 \times 10^{23}$



Einstein commentera, dans ses notes autobiographiques, l'impact des résultats expérimentaux obtenus : « L'accord entre ces considérations et l'expérience, ainsi que la détermination par Planck de la taille réelle des molécules à partir de la loi du rayonnement (à haute température) ont convaincu les septiques, qui étaient nombreux à cette époque (Ostwald, Mach), de la réalité des atomes. L'opposition de ces savants envers la théorie atomique trouve sans aucun doute son origine dans leur conviction philosophique positiviste. C'est un exemple illustrant bien le fait que même des savants audacieux et ayant un bon sens de l'intuition peuvent être trompés par des préjugés philosophiques ». Notons qu'Ostwald finira par adhérer à la théorie atomique en 1908 et parle d'une « preuve expérimentale en faveur de la constitution atomique », mais Mach ne sera jamais convaincu (il mourra en 1916).

Jean Perrin vérifie la formule de diffusion d'Einstein

Jean Perrin réalise dans son laboratoire des expériences avec des billes microscopiques (leur taille varie de 0,2 à 5,5 μm) de gomme gutte et de mastic en suspension dans l'eau. Les particules en suspension sont bombardées par les molécules d'eau et lorsque ce bombardement est plus intense d'un côté de la particule que de l'autre, elle se déplace. À température ambiante et pour un intervalle d'une seconde, le déplacement moyen est de l'ordre du micron, ce qui est tout à fait observable au microscope (voir dessin ci-dessous).



Les atomes aujourd'hui

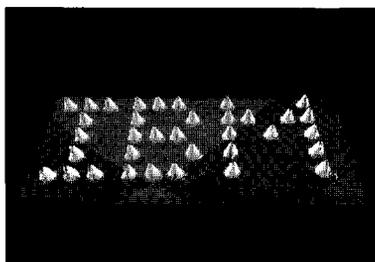
Le célèbre physicien américain Richard Feynman indique en 1959 : « Notre capacité à fabriquer des objets au niveau atomique est un développement qui me paraît inévitable », puis il pose la question suivante : « Pourquoi ne pourrait-on pas écrire les 24 volumes de l'encyclopédie Britannica sur une tête d'épingle ? » Un calcul rapide lui permet de



conclure que, pour cela, il suffit de réduire la taille des lettres d'un facteur 25 000, ce qui donne à la dimension d'un point une taille d'un peu moins de 100 Å de côté, ce point contenant encore un millier d'atomes. À cette échelle, il conclut que l'ensemble des livres du monde pourrait tenir dans le volume d'un petit magazine. Il ajoute ensuite : « *Je ne suis pas effrayé de poser finalement la question de savoir si, de façon ultime – dans un futur lointain – nous pourrions manipuler les atomes à notre guise et ce qu'il arriverait si nous y parvenions* ».

Aujourd'hui, les prévisions de Feynman sont en train de se réaliser ! C'est pourquoi on parle tant des nanotechnologies. Citons la phrase prononcée par le Président Clinton lors d'un de ses discours : « *Imaginez les potentialités : des matériaux avec une résistance dix fois supérieure à celle de l'acier mais un poids beaucoup plus faible, une concentration de toutes les informations contenues à la bibliothèque du Congrès dans un composant de la taille d'un morceau de sucre, la détection des tumeurs cancéreuses lorsqu'elles ont la taille de seulement quelques cellules.* » Si l'on en croit certains prévisionnistes nous aurons d'ici à vingt ans plus de puissance de calcul dans le volume d'un morceau de sucre que dans la totalité des ordinateurs qui existe aujourd'hui dans le monde, soit presque un milliard de Pentium en parallèle ! Tout cela passe par la maîtrise des phénomènes à l'échelle nanométrique. Un nanomètre (nm) c'est un milliardième de mètre (0,000 000 001 mètre). On se rendra mieux compte de la petitesse de cette unité en disant que c'est environ 500 000 fois plus fin que l'épaisseur du trait d'un stylo à bille ; 30 000 fois plus fin que l'épaisseur d'un cheveu ; 100 fois plus petit qu'une molécule d'ADN ou que cela représente la taille de quatre atomes de silicium (Si) mis l'un à côté de l'autre. En un mot, l'échelle nanométrique correspond au monde des atomes.

Logo d'IBM réalisé
avec des atomes.
© IBM.



L'accès à ce monde nanométrique est devenu possible grâce à l'invention en 1981 du microscope à effet tunnel par deux chercheurs d'IBM : Binnig et Rohrer (leur découverte a été récompensée par le prix Nobel de physique en 1986). Le cœur du microscope est une pointe métallique extrêmement fine (idéalement l'extrémité de la pointe n'est

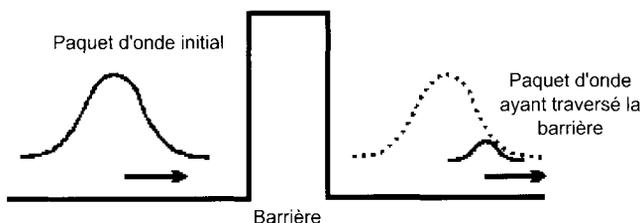


constituée que d'un seul atome). Lorsque cette pointe survole la surface du matériau examiné (nécessairement métallique) et que l'on applique une tension entre la pointe et la surface, un courant passe qui dépend (exponentiellement) de leur distance. Ce courant est appelé *courant tunnel* car il est lié à un effet quantique : *l'effet tunnel* (voir encadré). Pour une distance de 0,5 nm, la valeur de ce courant est de l'ordre d'un nanoampère, ce qui est facilement mesurable. La précision obtenue, ou plutôt la résolution, est d'environ 1 Å, c'est-à-dire la dimension typique d'un atome. En balayant toute la surface du matériau, on peut reconstituer par ordinateur le relief de cette surface et observer les atomes qui la composent. Le résultat obtenu ressemble un peu à un tas d'oranges soigneusement disposées à un étal de marché. On peut ainsi mettre en évidence l'arrangement cristallin, les défauts d'empilement, les atomes d'impureté, etc. Cet instrument révolutionnaire, initialement conçu pour observer la surface des matériaux, est maintenant aussi utilisé pour déplacer des atomes un par un, comme une « pince à atomes ».

L'effet tunnel

Si on lance une balle contre un mur à une hauteur plus faible que celle du mur, il n'y a aucune chance que cette balle traverse le mur. À l'échelle microscopique, les lois de la mécanique quantique font que les choses se passent différemment. Si l'on envoie un électron sur une « barrière de potentiel » (l'équivalent du mur), même si l'énergie de l'électron est plus faible que la hauteur de la barrière, l'électron a une certaine probabilité de franchir la barrière (c'est-à-dire de traverser le mur). C'est ce que l'on appelle l'effet tunnel. Cet effet est très bien vérifié expérimentalement, il explique la radioactivité alpha et est utilisé dans certains composants électroniques (composants Josephson).

L'effet tunnel est illustré ci-dessous, il se comprend facilement dès lors que l'on admet qu'un électron n'est pas seulement une particule mais une onde (plus précisément une superposition d'onde appelée « paquet d'onde » qui voyage à la même vitesse que la particule). Un phénomène similaire à l'effet tunnel, le phénomène d'ondes évanescentes, était connu depuis longtemps en optique.



À l'aide de la pointe, on saisit un atome, on le déplace sur la surface puis on vient le déposer à l'endroit voulu. C'est ainsi que l'on a réussi à disposer des atomes de fer en cercle sur une surface de cuivre.

Le seul inconvénient du microscope à effet tunnel c'est qu'il ne peut observer que des surfaces métalliques puisque son principe est fondé sur le passage d'un courant. Rapidement un autre type de microscope a été mis au point pour s'affranchir de cette limite, il s'agit du microscope à force atomique. Cette fois sa pointe est fixée sur un bras de levier flexible, balaye et frotte la surface du matériau à observer en suivant le relief. La déformation du levier, qui est éclairé avec un laser, est mesurée par un photodétecteur et enregistrée à l'ordinateur. On peut avec cet instrument observer la surface des matériaux isolants tels que les polymères, les céramiques et les matériaux biologiques. On peut également déplacer des atomes, c'est ainsi que la société américaine IBM a dessiné son logo !

Des atomes aux particules fondamentales

Toujours plus de particules !

Poursuivons notre quête vers l'infiniment petit. Grâce aux travaux d'Einstein et de Perrin, l'atome est définitivement accepté au début des années 1910 et à la même époque Rutherford découvre le noyau de l'atome. Parmi la moisson de découvertes faites durant l'année miraculeuse pour la physique nucléaire de 1932, on retiendra en particulier celle du neutron. Dès l'année suivante, le physicien allemand Heisenberg émet l'hypothèse que les noyaux des atomes sont formés de protons et de neutrons. Alors qu'à ce moment on ne connaît que trois particules « fondamentales », l'électron, le proton et le neutron, une nouvelle particule fait son apparition en 1937. Cette particule, dont l'existence avait été prédite dès 1934 par le physicien japonais Yukawa pour interpréter l'interaction forte⁵, a été appelée tour à tour Yukon, électron japonais, électron lourd (car sa masse est environ 200 fois supérieure à celle de l'électron), mésotron et finalement méson ! (Il s'agit du méson μ , ou muon ; il s'avèrera que la particule prédite par Yukawa est en fait le méson π – de masse égale à 264 fois celle de l'électron – découverte dans les rayonnements cosmiques par Cecil

⁵ L'interaction forte est l'une des quatre interactions fondamentales. Les trois autres sont : la gravitation, l'électromagnétisme et l'interaction faible (voir chapitre 8).



Powell en 1947.) En 1948, une nouvelle particule (le K^0), environ 1000 fois plus lourde que l'électron, est découverte, également dans le rayonnement cosmique. Puis vient l'ère des accélérateurs : le méson π est la première particule produite à l'aide d'un accélérateur (le synchrocyclotron de Berkeley) en 1948. À partir de 1953, les grands synchrotrons mettent en évidence une véritable prolifération de particules de masse supérieure à celles des nucléons. Au cours d'une conférence à Bagnères-de-Bigorre, Louis Leprince-Ringuet les baptise « hypérons » (c'est pourquoi on peut trouver un boulevard des Hypérons à Bagnères-de-Bigorre !)

Petit glossaire de la physique des particules

Les particules qui subissent l'interaction forte sont appelées hadrons. Il existe deux familles de hadrons : les baryons et les mésons. Les baryons regroupent les nucléons (neutron et proton) et les hypérons (qui sont en quelque sorte des nucléons lourds). Les mésons possèdent une masse intermédiaire entre celle de l'électron et celle du proton.

- Baryon (du grec βαρυς = lourd) : particule de spin demi-entier sensible à la force forte (les baryons sont composés de trois quarks).
- Boson (du physicien Bose) : particule de spin entier (vecteurs des interactions).
- Fermion (du physicien Fermi) : particule de spin demi-entier (matière).
- Hadron (du grec αδρος = fort) : toutes les particules sensibles à la force forte (baryons et mésons).
- Higgs (du physicien Higgs) : le boson de Higgs est la particule qui dans le modèle standard confère la masse aux particules.
- Lepton (du grec λεπτος = léger) : particules de spin $\frac{1}{2}$ insensible à la force forte.
- Leptoquarks : bosons de jauge de la grande unification.
- Méson (du grec μεσος = moyen) : particule de spin demi-entier sensible à la force forte (les mésons sont composés d'un quark et d'un anti-quark).
- Proton (du grec πρωτος = premier) : le plus léger des baryons.
- Quark : particule de charge fractionnaire constituant les hadrons.
- WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) : particule hypothétique qui permettrait d'interpréter la « masse manquante » de l'Univers.



Le spin des particules

Le spin est un moment cinétique intrinsèque. Le nom (spin = tourner) évoque l'idée d'une rotation. Le spin d'une particule élémentaire (comme l'électron) pourrait être regardé comme le mouvement de rotation de cette particule autour d'elle-même, si ce n'était qu'une particule élémentaire n'a pas de dimension (c'est un point au sens mathématique du terme). Le spin est donc une quantité (un degré de liberté) purement quantique, qui n'a pas son équivalent classique. Il joue un très grand rôle à cause d'un théorème appelé « spin-statistique » énoncé au début des années 1940 par Pauli : les particules de spin demi-entier suivent la statistique quantique de Fermi-Dirac (ce sont des fermions) tandis que les particules de spin entier suivent la statistique quantique de Bose-Einstein (ce sont des bosons). Deux fermions ne peuvent pas être dans le même état quantique, ils subissent le « principe d'exclusion de Pauli », tandis que deux bosons le peuvent, ils subissent la « condensation d'Einstein ».

La prolifération des particules pose le même problème aux physiciens des années 1960 que celle des éléments posait aux chimistes un siècle plus tôt. Il faut trouver une classification des particules de la même façon que Mendeleïev a trouvé une classification des éléments. Une première classification est proposée en 1961 (par Murray Gell-Mann et Yuval Ne'eman) ce qui permet rapidement de prévoir l'existence de nouveaux hadrons (schéma octuplet, 1964). Gell-Mann introduit en 1964 une idée révolutionnaire, celle de l'existence d'entités élémentaires de charges fractionnaires. Il les appelle quarks car ils sont au nombre de trois comme les quarks du roman *Finnegan's wake* de James Joyce « three quarks, three more quarks, for Master Mark ». Dans la théorie de Gell-Mann, les trois quarks se distinguent entre eux par un « saveur » : les trois quarks sont le quark u (up), le quark d (down) et le quark s (side). Ces quarks sont les constituants des hadrons. Trois quarks donnent un baryon comme le proton (u, u, d), tandis qu'un quark et un anti-quark donnent un méson comme le pion ($\pi^+ = u\bar{d}$). Les particules possédant un quark s s'appellent des « particules étranges » (les premières « particules étranges » ont été découvertes dans les années 50). L'existence des quarks sera démontrée expérimentalement à Stanford en 1968 par Richard Taylor (sa découverte sera récompensée par le prix Nobel de physique en 1990). L'idée de Gell-Mann se révèle donc à la fois juste et très efficace puisque malgré la découverte d'un grand nombre de particules lourdes (des hadrons) on peut les interpréter par trois particules fondamentales



(les trois quarks). En fait, les choses vont un peu se compliquer dans la mesure où la découverte, à des énergies plus élevées, de nouvelles particules va imposer le recours à de nouveaux saveurs de quark. Nous ne pouvons pas ici retracer l'historique de ces recherches, indiquons-en le résultat. L'existence d'une quatrième saveur de quark a d'abord été prévue par la théorie avant qu'une nouvelle particule, le charmonium (ou méson charmé) ait été découverte en 1974. Cette nouvelle particule (répondant au doux nom de J/ψ) est la première à posséder le nouveau quark c (c pour charme). Un peu plus de deux ans plus tard, en 1977, une nouvelle particule (le Y) se révèle porteur d'une nouvelle saveur (la cinquième) de quark : la beauté (b). Finalement, le sixième quark (le quark top t) sera découvert à la fin de 1994 ; avec une masse près de 200 fois plus grande que celle du proton c'est la particule la plus massive que l'on connaisse à ce jour.

De même qu'il existe deux types de charge (+ et -) pour l'interaction électromagnétique, il existe trois types de charge pour l'interaction forte. Par analogie avec les trois couleurs fondamentales de l'optique qui permettent de restituer n'importe quelle couleur, les trois charges de l'interaction forte sont appelées des couleurs. Chaque quark peut ainsi posséder la couleur rouge ou verte ou bleue (de la même façon qu'une particule chargée peut porter une charge + ou -). De plus, les quarks interagissent entre eux par l'intermédiaire de huit gluons capables d'en changer la couleur, tout comme les particules chargées interagissent entre elles par l'intermédiaire de photons.

D'un autre côté, le méson μ , qui avait été à tort confondu avec la particule de Yukawa, montrera des signes de parenté avec l'électron, qui comme lui est un lepton. En 1977, la famille s'agrandit avec la mise en évidence d'un cousin de l'électron encore plus massif, le lepton τ . À chacun de ces leptons, on associera une particule insaisissable : le neutrino. Le premier neutrino, le neutrino électronique (noté ν_e), avait été prédit par Pauli en 1927 et découvert expérimentalement près de 30 ans plus tard en 1956. Un second type de neutrino, le neutrino muonique ν_μ , sera identifié en 1962, puis, beaucoup plus récemment, en 2000, un troisième neutrino, le neutrino tauïque (ν_τ) sera mis en évidence.

Le monde des particules élémentaires

Finalement, on peut à ce jour faire le bilan suivant des particules « élémentaires ». Il existe six saveurs de quark réparties en trois familles (u, d) ; (c, s) et (t, b). Chaque quark existe en trois variétés de couleur : rouge, verte et bleue. Il existe de même « six saveurs » de leptons réparties également en trois familles (e^-, ν_e) ; (μ, ν_μ) ; (τ, ν_τ).



Au total, il existe donc six sortes de leptons, 18 sortes de quarks ainsi que les anti-particules associées.

Actuellement, toutes ces particules sont considérées comme ponctuelles (c'est-à-dire, à la précision des mesures actuelles, de rayon inférieur à 10^{-19} m). Elles sont donc considérées comme des particules élémentaires. Des mesures effectuées au CERN jusqu'en 2000 ont montré qu'il n'existe que trois familles (ou générations) de particules, on ne devrait donc plus trouver de nouveaux leptons ou de nouveaux quarks.

Tableau des particules élémentaires. Les particules peuvent interagir par interaction faible (f), électromagnétique (EM) ou forte (F).

Génération Type	1 ^e génération	2 ^e génération	3 ^e génération
q=2/3 quarks	Haut <i>u</i> (f EM F)	Charme <i>c</i> (f EM F)	Sommet <i>t</i> (f EM F)
q=-1/3 quarks	Bas <i>d</i> (f EM F)	Étrange <i>s</i> (f EM F)	Beauté <i>b</i> (f EM F)
Leptons neutres (neutrinos)	Neutrino d'électron ν_e (f)	Neutrino de muon ν_μ (f)	Neutrino de tauon ν_τ (f)
Leptons chargés	Électron <i>e</i> (f EM)	Muon μ (f EM)	Tauon τ (f EM)

En un siècle, depuis les travaux d'Einstein de 1905 sur le mouvement brownien, le chemin parcouru est immense. Alors qu'à cette époque l'existence des atomes n'était pas admise par tous les physiciens, aujourd'hui on peut les voir et les manipuler. Dans les composants électroniques les plus avancées, il est même indispensable de maîtriser les surfaces au plan atomique près. D'autre part, notre connaissance de la matière s'est considérablement enrichie avec la découverte du noyau de l'atome, puis de ses constituants (les protons et les neutrons), puis des structures encore plus fines, les quarks. On peut aujourd'hui sonder la matière à une échelle qui est un milliard de fois plus petite que l'atome. De nouveaux horizons restent à découvrir et ils sont aussi passionnants en 2005 qu'ils ne l'étaient en 1905 !

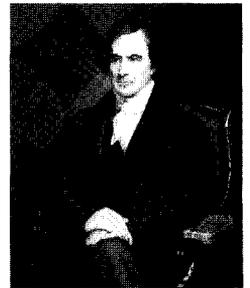
5

La relativité restreinte dans l'air du temps

Des faits troublants

Le modèle newtonien

Comme nous l'avons expliqué au chapitre 2, le cadre de la mécanique a été donné par Newton en 1687 dans ses *Principia* : il s'appuie sur la notion de temps absolu « *vrai et mathématique, sans relation à rien d'extérieur, [il] coule uniformément et s'appelle durée* » et d'espace absolu « *sans relation aux choses extérieures, [il] demeure toujours similaire et immobile.* » Newton énonce dans ces mêmes *Principia* les trois lois fondatrices de la mécanique : 1/ le principe d'inertie ; 2/ le principe fondamental de la dynamique ; 3/ le principe de l'action et de la réaction (voir chapitre 2, encadré sur les lois de Newton).



François Arago
(1786-1853).

À la fin du XIX^e siècle, on ne connaît que deux types d'interaction ; la gravitation, qui est universelle (elle s'applique à tous les corps, il n'y a pas de moyen d'y échapper) et l'interaction électromagnétique dont les lois ont été données par Maxwell. Du côté de la gravitation tout se passe à merveille, citons deux grands moments. La prévision du retour

« ... telle est la marche qu'a suivie Newton. Elle a été, en général, adoptée en France par les savants auxquels la physique doit les immenses progrès qu'elle a faits dans ces derniers temps, et c'est elle qui m'a servi de guide dans toutes mes recherches sur les phénomènes électrodynamiques »
Ampère, 1826.

de la comète de Halley, d'abord par Halley lui-même, puis par Clairaut¹ qui – tenant compte des perturbations de Jupiter et Saturne – sera capable de prédire à trois semaines près (sur une période moyenne de 76 ans) la date de sa réapparition, et la découverte effectuée par Le Verrier, d'une nouvelle planète (Neptune) par le calcul à partir des données d'observation des perturbations d'Uranus. Notons que la loi de la gravitation universelle de Newton fait l'hypothèse d'une propagation de l'interaction à une vitesse infinie. La loi de Newton est si efficace qu'elle sera utilisée comme modèle pour décrire les autres interactions connues à l'œuvre en électricité et en magnétisme. La loi de Coulomb, énoncée en 1788, est formellement identique à celle de Newton et vaut d'ailleurs tant pour les phénomènes d'attraction ou de répulsion électrique que pour ceux d'origine magnétique. Lorsque Ampère étudiera les forces d'attraction ou de répulsion entre deux courants c'est de nouveau une loi formellement identique à celle de Newton qui sera établie (formule de Biot et Savart). Ces lois sont énoncées dans le cadre de la mécanique de Newton et supposent, comme pour la gravitation, une hypothèse de propagation de l'interaction à une vitesse infinie.

La vitesse finie de la lumière

Maxwell, « le Newton de l'électricité », réussit à rassembler, dans un cadre formel unique, les lois de l'électricité, du magnétisme et de leur interaction mutuelle. Les « équations de Maxwell » permettent d'établir, conformément à l'intuition de leur géniteur, que la lumière n'est rien d'autre qu'une onde électromagnétique. La confirmation éclatante de ce point sera donnée une vingtaine d'année plus tard (1888) par Hertz. Mais on sait déjà que la lumière se propage à une vitesse finie, c , proche de 300 000 km/s. L'astronome danois Römer est le premier à le montrer. Il indique aux membres de l'Académie des sciences de Paris lors de sa séance du samedi 21 novembre 1676 : « *Le mouvement de la lumière n'est pas instantané, ce qui se fait voir par l'inégalité, des immersions et émergences du premier satellite de Jupiter* ». Un siècle et demi plus tard, l'astronome royal d'Angleterre James Bradley découvre, en 1728, que les étoiles, au cours de l'année, semblent décrire des ellipses : c'est le phénomène « d'aberration des étoiles » (que nous

¹ Alexis Claude Clairaut est d'une précocité étonnante. À dix ans, il assimile les ouvrages du mathématicien Guillaume de L'Hôpital et de douze à seize ans il fait des recherches en géométrie. Ses travaux le font entrer à l'Académie des sciences le 14 juillet 1731, à dix-huit ans ! Le règlement de l'Académie exigeant un âge minimum de vingt ans, une autorisation spéciale du Roi est nécessaire, elle est accordée par Louis XV.



avons déjà rencontré au chapitre 2). La lumière qui nous parvient d'une étoile située à la verticale du lieu d'observation fait un petit angle par rapport à cette verticale. La raison en est très simple et se comprend bien à partir d'une analogie. Imaginons qu'un jour sans vent la pluie tombe de façon strictement verticale. Si vous marchez la pluie semble alors se diriger vers vous, faisant avec la verticale un angle d'autant plus grand que votre vitesse est élevée (le phénomène est donc plus net si vous est à bord d'une moto ou d'une voiture). Le phénomène d'aberration des étoiles est similaire : la terre n'est pas fixe ; elle décrit un mouvement annuel autour du soleil à une vitesse de 30 km/s (ce qui fait tout de même un peu plus de 100 000 km/h ! Le calcul est très facile à faire sachant que la terre décrit un cercle de 150 millions de km de rayon autour du soleil en un an). L'observateur (l'astronome) est donc en mouvement par rapport à la pluie de lumière que lui envoie l'étoile, de la même façon que notre piéton ou notre automobiliste l'est par rapport à la pluie. La mesure de l'angle d'aberration permet d'en déduire la vitesse de la lumière. En 1849, le physicien français Hippolyte Fizeau réussit à déterminer directement (c'est-à-dire sans avoir recours à l'astronomie) la vitesse de la lumière grâce à un dispositif astucieux et une habilité remarquable en mesurant son temps de propagation.

Le mystérieux éther

Cette vitesse finie de la lumière présente un aspect inoffensif mais c'est en fait une première fissure dans le mur de l'édifice newtonien. La seconde fissure apparaît lorsqu'on s'interroge sur son mode de propagation. Pour Newton, la lumière est constituée de petit corpuscule. Pour interpréter une expérience qu'il vient de réaliser (celle des « anneaux de Newton »), il bâtit une théorie, dite des « accès » qu'il introduit ainsi : « *Pour que les rayons de lumière aient des accès alternés de facile réflexion ou de facile transmission, nihil aliud opus est, il suffit ainsi que ces rayons soient de petits corpuscules, qui, par leur puissance attractive, ou par quelque autre force, excitent des vibrations dans le milieu sur lesquelles elles agissent.* » Pourtant, un siècle plus tard, il est difficile de maintenir cette interprétation face aux expériences d'interférence. En effet, de la lumière ajoutée à de la lumière peut tantôt faire de la lumière, tantôt faire de l'obscurité ! Seule une nature ondulatoire peut conférer à la lumière une telle propriété. Autrement dit, la lumière a une nature similaire aux vibrations qui apparaissent à la surface de l'eau (les « ronds dans l'eau ») ou à celle du son (les ondes acoustiques). Il faut bien alors qu'il existe un support pour qu'elle se propage : pas d'eau, pas de ronds dans l'eau ; pas d'air, pas de son ! (il est bien connu que si vous mettez un réveil dans une cloche à vide, on ne l'entend plus sonner). Quel est



donc le mystérieux support matériel qui permet à la lumière de se propager depuis les étoiles jusqu'à nous ? Ce milieu, c'est l'éther. Il a d'ailleurs une longue histoire. Nous avons vu que l'éther est la partie céleste du monde d'Aristote et qu'on le retrouve chez Descartes, précisément pour véhiculer la lumière. Cependant, dans les vingt premières années de 1800 les choses se compliquent : Fresnel montre que les vibrations associées aux ondes lumineuses doivent être perpendiculaires à leurs rayons, cela implique un éther rigide... mais qui reste invisible. À mesure que l'on progresse dans l'analyse physique des phénomènes lumineux, on est amené à conférer à l'éther des propriétés de plus en plus nombreuses et, il faut bien le dire, de plus en plus curieuses. Un auteur en a fait la description imagée suivante : « *Il faut se figurer un fluide excessivement rare et léger, répandu dans tout l'espace et pénétrant jusqu'aux particules les plus intimes des corps. Sa ténuité est telle que son poids échappe à tout moyen d'observation. Qu'on se représente une balle de plomb suspendue au milieu de l'air le plus raréfié d'une machine pneumatique, on n'aura qu'une idée très imparfaite de la molécule de matière pondérable nageant au milieu de l'éther qui l'entourne de toutes parts. Ce fluide est doué en même temps d'une sensibilité extrême et d'une élasticité parfaite, de sorte que tous les mouvements qui lui sont communiqués, toutes les impressions qu'il reçoit, sont transmis au loin par lui, sans altération, sans déperdition, et avec une prodigieuse rapidité* ».

Un comportement bizarre

Pas de doute, la lumière possède une vitesse finie c et est une onde qui, pour se propager, nécessite un support matériel, aux propriétés bizarres, certes, mais qu'il faut bien admettre. Ce support doit alors pouvoir servir de système de référence absolu et permettre de mettre en évidence les mouvements qui lui sont relatifs. Prenons l'exemple précédent : la terre tourne autour du soleil à la vitesse V , donc, d'après les lois de la mécanique, si l'on envoie de la lumière dans la même direction que son mouvement elle doit avoir, par rapport au référentiel (absolu) que constitue l'éther une vitesse égale à $c + V$. Naturellement si l'on envoie de la lumière dans la direction opposée elle possédera, par rapport à l'éther, la vitesse $c - V$. Le physicien américain Michelson a imaginé une expérience où l'on pourrait mettre en évidence cette différence de vitesse. À sa grande surprise, et à la grande surprise des autres physiciens, cette expérience s'est révélée négative : impossible de mettre en évidence la moindre différence de vitesse ! Peut être fallait-il en conclure, comme l'avait fait Fresnel dès 1818, que la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de sa source mais c'est là contredire une conséquence directe des lois de la cinématique de



Newton, la loi d'additivité des vitesses. L'exemple classique est celui d'un voyageur dans le train : considérons un TGV dont la vitesse est de 300 km/h. Si un passager marche dans le wagon dans le sens du train à la vitesse de 5 km/h, il aura, par rapport au sol une vitesse de 305 km/h. S'il voyage dans la direction opposée, sa vitesse sera de 295 km/h. Alors pourquoi la lumière en provenance d'une ampoule fixée au train de vitesse v aurait-elle une vitesse égale à c par rapport au sol quelle que soit la vitesse du train et quelle que soit la direction et non pas de $c + v$ si elle se dirige dans le sens du train et de $c - v$ si elle se dirige dans l'autre sens ? Serait-ce à dire que la cinématique de Newton ne s'applique pas pour les phénomènes lumineux ? Pourtant on vient de voir que l'optique est une partie de l'électromagnétisme, laquelle est parfaitement décrite par les équations de Maxwell ! Ce sont donc les équations de Maxwell qui ne seraient pas compatibles avec la cinématique de Newton. Que faire ? Abandonner la mécanique newtonienne, au service de la physique avec une extraordinaire efficacité depuis plus de deux siècles, ou bien abandonner les équations de Maxwell qui viennent de fournir un cadre cohérent à un ensemble de phénomènes autrefois disparates ? Le choix est cornélien !

Le principe de relativité à revoir ?

En regardant de plus près les phénomènes électriques et magnétiques, on s'aperçoit que ce n'est pas la seule contradiction entre électromagnétisme et mécanique newtonienne comme on peut le constater sur un exemple très simple. On sait qu'une charge fixe crée un champ électrique et non un champ magnétique. Par ailleurs, on sait qu'une charge en mouvement crée un champ magnétique. Considérons alors deux repères en mouvement de translation rectiligne et uniforme l'un par rapport à l'autre. Selon le principe de relativité de Galilée (à l'origine, rappelons-le, de la mécanique newtonienne) les lois de la physique sont identiques dans les deux repères (« *le mouvement est comme rien* » disait Galilée). Considérons alors une charge fixe dans l'un des deux repères ; un observateur lié à ce repère doit donc constater que cette charge crée un champ électrique mais ne crée pas de champ magnétique. En revanche, vu de l'autre repère, la charge est en mouvement, et créera donc à la fois un champ électrique et un champ magnétique. Les deux situations ne sont pas identiques ! Cela veut-il dire que les phénomènes électromagnétiques ne sont pas compatibles avec le principe de relativité ? Ce principe ne vaudrait-il que pour les lois associées à la gravitation ? Bref faut-il conclure que le principe de relativité ne s'applique pas aux phénomènes électromagnétiques ?



Qu'est-ce que la relativité ?

Einstein présente la relativité

C'est à cette question que répond Einstein dans son quatrième article publié en 1905 et intitulé « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* ». En introduction de son article, Einstein présente de façon très claire la situation ainsi que la solution qu'il propose à cet épineux problème. Voici ce qu'il indique : « *On sait que l'Électrodynamique de Maxwell, telle qu'elle est conçue aujourd'hui, conduit, quand elle est appliquée aux corps en mouvement, à des asymétries qui ne semblent pas être inhérentes aux phénomènes. Rappelons, par exemple, l'action mutuelle électrodynamique s'exerçant entre un aimant et un conducteur. Le phénomène observé dépend ici uniquement du mouvement relatif du conducteur et de l'aimant, tandis que, d'après la conception habituelle, il faudrait établir une distinction rigoureuse entre le cas où le premier de ces corps serait en mouvement et le second au repos, et le cas inverse. En effet, quand l'aimant est en mouvement et le conducteur au repos, il se produit autour du premier un champ électrique correspondant à une certaine localisation d'énergie, qui engendre un courant aux endroits où se trouvent des parties du conducteur. Dans le cas où l'aimant est au repos et le conducteur en mouvement, il ne se produit pas de champ électrique autour de l'aimant. Il se produit par contre dans le conducteur une*

Article d'Einstein sur
la relativité restreinte.

© Annalen der
physik.

3. Zur Elektrodynamik bewegter Körper: von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhafien scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche



force électromotrice à laquelle ne correspond aucune énergie mais qui – en supposant le même mouvement relatif dans les deux cas – engendre des courants électriques qui sont de même grandeur et qui se manifestent de la même manière que ceux produits par les forces électriques dans le premier cas.

Des exemples du même genre, ainsi que les expériences entreprises pour démontrer le mouvement de la Terre par rapport au « milieu où se propage la lumière » et dont les résultats furent négatifs, font naître la conjecture que ce n'est pas seulement dans la mécanique qu'aucune propriété des phénomènes ne correspond à la notion de mouvement absolu mais aussi dans l'électrodynamique. Pour tous les systèmes de coordonnées pour lesquels les équations mécaniques restent valables, les lois électrodynamiques et optiques gardent également leur valeur ; c'est ce qui a été déjà démontré pour les grandeurs du premier ordre.

Nous voulons élever cette conjecture (dont le contenu sera appelé dans ce qui suit « principe de relativité ») au rang d'une hypothèse et introduire en outre la supposition, qui n'est qu'en apparence incompatible avec ce principe, que la lumière se propage toujours dans le vide avec une certaine vitesse indépendante de l'état de mouvement de la source lumineuse². En s'appuyant sur la théorie de Maxwell, on peut arriver à construire à l'aide de ces deux suppositions une Électrodynamique des corps en mouvement simple et exempte de contradictions. On verra que l'introduction d'un « éther lumineux » devient superflue par le fait que notre conception ne fait aucun usage d'un « espace absolu au repos »² doué de propriétés particulières, et ne fait pas correspondre à un point de l'espace vide, où ont lieu des processus électromagnétiques, un vecteur de vitesse.

La théorie que nous allons exposer s'appuie, comme toute Électrodynamique, sur la cinématique du corps rigide, car les énoncés de toute théorie visent aux rapports entre des corps rigides (systèmes de coordonnées), des horloges et des processus électromagnétiques. L'oubli de cette circonstance est l'origine des difficultés avec lesquelles l'Électrodynamique des corps en mouvement a actuellement à lutter. »

Les deux postulats de la relativité

Le remède d'Einstein consiste donc à poser deux principes :

- 1/ le principe de relativité, qui s'applique à tous les phénomènes, y compris électromagnétiques [cette extension du *Principe de relativité de Galilée* est appelée *Principe de relativité d'Einstein*] ;
- 2/ la vitesse de la lumière est indépendante de la vitesse de sa source.

² Souligné par l'auteur.



Ces deux principes ne sont, d'après les propres mots d'Einstein, « *qu'en apparence incompatibles* ». Ce qu'il faut changer c'est la mécanique ! L'éther « *devient superflue* », l'espace absolu au repos doit être abandonné, la notion de temps doit être révisée. Pour résoudre le problème, Einstein ne fait donc rien moins qu'abandonner la mécanique de Newton. Il expliquera plus tard la démarche qui l'a conduit à cette proposition : « ... Cette invariance de la vitesse de la lumière était toutefois en conflit avec la règle d'addition des vitesses bien connue en mécanique. J'éprouvai une grande difficulté à comprendre pourquoi ces deux faits se contredisaient mutuellement. J'avais passé presque une année en considérations infructueuses, espérant parvenir à modifier l'idée de Lorentz, mais je fus bien obligé de reconnaître que ce problème n'était pas du tout évident. Par bonheur, un de mes amis bernois [Michele Besso] vint à mon secours. Ce fut vraiment une très belle journée, ce jour où je lui rendis visite ; je commençai par lui expliquer : J'ai rencontré récemment un problème que je n'arrive pas à résoudre et je viens en débattre avec toi. Après avoir examiné avec lui pas mal de possibilités, je parvins soudain à cerner le problème. Le lendemain, je revins le voir et, sans prendre le temps de le saluer, je lui dis : Merci. J'ai entièrement résolu le problème. Ma solution résidait dans le concept même de temps, c'est-à-dire dans le fait que le temps n'est pas défini de manière absolue, mais qu'il existe une relation indissociable entre le temps et la vitesse d'un signal. Si l'on comprenait cela, on pouvait résoudre l'extraordinaire difficulté précédente. Cinq semaines après avoir reconnu ce fait, la théorie actuelle de la relativité restreinte était achevée. »³

Contraction des longueurs et dilatation des durées

C'est précisément la remise en cause du concept de temps qui a fait la gloire de la relativité et de son auteur. Poursuivons l'examen du plus célèbre des articles de 1905 d'Einstein. Ce dernier montre les conséquences de ses principes : la contraction des longueurs et la dilatation des durées. Einstein montre que si l'on considère un corps rigide (une règle) de longueur l dans le référentiel par rapport auquel il est au repos (ce que l'on appelle le référentiel propre), un observateur lié à un référentiel en mouvement rectiligne uniforme de vitesse V par rapport au premier, attribuera à ce corps une longueur inférieure à l (la mesure donnera la valeur $l\sqrt{1 - V^2/c^2}$), c'est ce que l'on appelle la « contraction des longueurs ». Il faut préciser ici que ce terme est

³ Le fameux article d'Einstein « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* » ne comporte aucune référence et un seul remerciement : « *En terminant, je tiens à dire que mon ami et collègue M. Besso m'a constamment prêté son précieux concours, pendant que je travaillais à ce problème, et que je lui suis redevable de maintes suggestions intéressantes.* »



Dilatation des durées et contraction des longueurs en relativité restreinte

La contraction des longueurs comme la dilatation des durées sont des phénomènes qui s'apparentent au phénomène de parallaxe. Pour les introduire de façon simple, il faut définir les notions de *temps propre*, *temps impropre*, *longueur propre* et *longueur impropre*.

Temps propre

On appelle intervalle de temps propre la durée séparant deux événements dans le référentiel (s'il existe) où ils ont lieu **au même point**.

Temps impropre

La durée séparant deux événements, mesurée dans tout autre référentiel, est appelée durée impropre.

Dilatation des durées

Soient alors deux événements E_1 et E_2 se produisant au même point d'un référentiel R' . Les coordonnées de ces deux événements sont (t'_1, x'_1, y'_1, z'_1) et (t'_2, x'_2, y'_2, z'_2) . D'après la définition donnée plus haut, la durée propre entre ces deux événements est : $\Delta t_0 = t'_2 - t'_1$.

Or, d'après la transformation de Lorentz pour le temps : $t = \gamma (t' + \frac{V}{c^2}x')$ où $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$ (V est la vitesse de translation uniforme du

référentiel R' par rapport au référentiel R).

Il vient donc (en tenant compte du fait que les événements ont lieu **au même point** de R' ce qui entraîne en particulier $x'_2 = x'_1$: $\Delta t = t_2 - t_1 = \gamma (t'_2 - t'_1) = \gamma \Delta t_0$.

Soit :

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}.$$

La durée impropre Δt est toujours supérieure à la durée propre Δt_0 ; c'est le phénomène de dilatation (apparente) des durées.

Longueur propre

La longueur propre est la distance séparant deux points dans le référentiel **où ils sont immobiles**.

Longueur impropre

Soit R' le référentiel dans lequel deux points (par exemple, les extrémités d'une règle) A et B sont immobiles. La longueur impropre est la distance – dans R – qui sépare les points – de R – qui coïncident simultanément dans R avec les extrémités de la règle.



Nous supposons que la règle AB est immobile dans R' et portée par l'axe x'. R' est animé d'un mouvement de translation rectiligne uniforme de vitesse V (portée par x) par rapport à R. La longueur propre de la règle est d'après la définition : $x'_B - x'_A$. Or, conformément à la transformation de Lorentz : $x' = \gamma(x - Vt)$.

Les points qui coïncident simultanément dans R (même t) avec les extrémités A et B de la règle sont donc distants de $l = x_B - x_A$ telle que : $x'_B - x'_A = \gamma(x_B - x_A)$ soit $l_0 = \gamma l$ (on a posé $l_0 = x'_B - x'_A$) ; ou encore :

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}.$$

La longueur impropre l est toujours inférieure à la longueur propre l_0 ; c'est le phénomène de **contraction apparente des longueurs**.

trompeur, il ne s'agit pas d'une contraction physique, mais plutôt d'un effet de parallaxe. Cette contraction des longueurs tire son origine du protocole précis de mesure et l'effet de contraction est lié à la vitesse finie de la lumière (voir encadré). De la même façon Einstein montre qu'il y a dilatation des durées qu'il présente ainsi : « Il en résulte la conséquence remarquable suivante : Si aux points A et B du référentiel K se trouvent des horloges au repos (considérées dans le système au repos) dont la marche est synchrone, et si l'on déplace l'horloge en A avec la vitesse v le long de la ligne qui la relie à B, on constate qu'après son arrivée en B les deux horloges ne sont plus synchrones. L'horloge qui a été déplacée de A en B retarde sur celle qui a gardé sa position invariable en B. » (Si l'horloge fixe marque le temps t l'horloge mobile marquera le temps $t/\sqrt{1 - V^2/c^2}$). Cette dilatation des durées est de la même façon un parallaxe temporel lié au protocole de synchronisation des horloges et la vitesse finie de la lumière. On remarquera d'ailleurs que la dilatation apparente des durées et la contraction apparente des longueurs sont reliées par la constance de la vitesse de la lumière. Nous reviendrons un peu plus loin sur les vérifications expérimentales associées.

La loi d'additivité des vitesses : un plus un ne fait pas deux !

Poursuivons la lecture de l'article d'Einstein. Dans un paragraphe intitulé « *Théorème de l'addition des vitesses* », Einstein établit une formule qui permet de comprendre le résultat négatif de l'expérience de Michelson. Il montre que si un corps est animé d'une vitesse v par rapport à un référentiel fixe R' et que l'on considère un référentiel R par



rapport auquel R' est en mouvement de translation rectiligne et uniforme à la vitesse V , alors la vitesse du corps mesurée par rapport à R est égale à $(v + V) / \left(1 + \frac{vV}{c^2}\right)$ (et non $v + V$ comme en cinématique

newtonienne). Le cas extrême est celui où le corps considéré est la lumière elle-même ($v = c$) et où R' se déplace par rapport à R également à la vitesse de la lumière ($V = c$) : dans ce cas la vitesse mesurée dans

R est $c \left(\frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}} = \frac{2c}{2} = c \right)$ et non $2c (c + c)$! Cette formule montre que la

vitesse de la lumière est une vitesse limite, impossible à dépasser.

Dans un paragraphe consacré à la dynamique de l'électron, Einstein montre une dépendance de la masse avec la vitesse, la formulation n'est toutefois pas définitive et il indique lui-même : « *Il est certain qu'en définissant autrement la force et l'accélération, on obtiendrait d'autres nombres pour les masses...* » Ce sont toutefois les prémisses de son cinquième article intitulé : « *L'inertie d'un corps dépend-elle de son contenu en énergie ?* » dans lequel on trouve l'équivalence entre la masse et l'énergie (voir chapitre 3).

Le temps relatif !

Comme nous l'avons indiqué au premier chapitre, l'article d'Einstein n'a pas eu l'impact que l'on pourrait imaginer a posteriori. C'est à partir de 1912 que « la relativité du temps » commence à faire sensation dans le grand public, c'est ainsi qu'un quotidien viennois titrait : « *La minute en danger, une nouvelle sensationnelle de la science mathématique* ». Le sensationnel a pris en effet rapidement le pas sur la théorie physique ; les explications vagues, mal comprises, voire presque mystiques se succédaient. La réalité est toute autre et peut, comme l'a fait Philippe Frank, le successeur d'Einstein à sa chaire de Prague, se résumer ainsi : « *La relativité du temps d'Einstein est une réforme de sémantique, non point de métaphysique* ». La physique est avant tout une science expérimentale, il y a donc évidemment lieu de soumettre les prévisions de la théorie au jugement de l'expérience.

C'est Einstein qui a été le premier à indiquer une méthode qui permettrait de vérifier le phénomène de dilatation des durées. L'idée est d'utiliser les atomes comme horloges, c'est d'ailleurs maintenant les horloges atomiques qui constituent la référence de temps officielle. Plus précisément, ce sont les fréquences d'oscillation de l'atome qui peuvent



servir d'unité naturelle de temps. De plus, par nature, tous les atomes d'un même élément sont identiques (de la même façon que tous les électrons de l'Univers sont identiques), il n'y a donc pas de problème pratique à réaliser deux horloges identiques. Si l'on compare la fréquence propre d'un atome « au repos » et celle d'un atome animé d'un mouvement rectiligne uniforme par rapport à l'observateur, on doit trouver un écart (les raies spectrales des atomes en mouvement doivent être légèrement déplacées vers les basses fréquences). L'expérience a été réalisée pour la première fois en 1936 par un physicien des Bell Lab., H. Ives, et elle a confirmée les prévisions d'Einstein (cet *effet Einstein* ne doit pas être confondu avec l'*effet Doppler*, le premier étant indépendant de la direction du mouvement).

La désintégration des muons

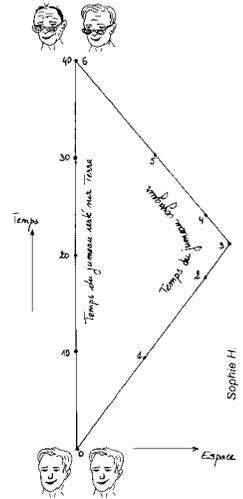
Les particules instables sont également des horloges naturelles qui peuvent être utilisées pour tester la dilatation des durées. Une expérience dans ce sens est très célèbre, elle s'appuie sur la désintégration des muons (nous avons déjà rencontré cette particule au chapitre 4). Les muons ont une durée de vie de 2,2 millionième de seconde (c'est-à-dire, qu'au bout de cette durée la moitié de ces particules s'est désintégrée). Cette durée de vie est celle que l'on mesure dans le « repère propre ». Il existe une source naturelle de muons, c'est le rayonnement cosmique (on se souvient que c'est comme cela qu'ils ont été découverts en 1937). Les muons sont produits par interaction de ce rayonnement avec la haute atmosphère, à environ 15 km d'altitude. Comme ils sont très énergétiques, ils voyagent à une vitesse très proche de celle de la lumière, ils parcourent donc pendant leur temps de vie τ une distance $d = c\tau$, soit environ 660 mètres ; cela veut dire qu'il y a moitié moins de muons à l'altitude $h - d$ qu'à l'altitude h . Si la dilatation des durées n'existait pas, on ne pourrait pas détecter de muons au niveau du sol (environ 1 sur 10^{40} atteindrait le sol !). Les premières mesures ont été réalisées en 1941, mais l'expérience de désintégration des muons décisive a été réalisée en 1963 par deux physiciens américains Frisch et Smith. Ils considéraient des muons dont la vitesse était très proche de celle de la lumière (99,5 % de c). L'application de la formule relativiste montre que, vu du référentiel terrestre, leur durée de vie est neuf fois plus longue que celle du repère propre, le taux de muons mesuré à une certaine altitude augmente d'autant. De nouveau, les mesures effectuées ont confirmé les prédictions données par la relativité. Une autre expérience a été réalisée en 1977 avec des muons mais cette fois à l'aide de l'accélérateur du CERN. Les muons étaient alors animées d'une vitesse encore plus grande (99,94 % de c), leur



durée de vie dans le référentiel du laboratoire est plus de 29 fois supérieure à leur durée de vie propre. De nouveau les prévisions ont été très bien vérifiées.

Le voyageur de Langevin

Un aspect de la dilatation des durées a fait coulé beaucoup d'encre, il s'agit du « voyageur de Langevin ». On en trouve les premières traces dès 1905 dans l'article d'Einstein : « *S'il se trouve en A deux horloges synchrones et si l'on déplace l'une d'elles avec une vitesse constante v le long d'une courbe fermée jusqu'à son point de départ, ce qui pourrait demander t secondes par exemple, cette horloge retardera de $(1/2)t\left(\frac{v}{c}\right)^2$ de seconde sur celle qui est restée immobile en A.* » Le scénario du « voyageur de Langevin » a été imaginé par ce dernier lors d'une communication au cours d'un Congrès à Bologne en 1911. Il imagine un voyageur enfermé dans un boulet de canon lancé à une vitesse proche de celle de la lumière. Lorsque au bout de deux ans, le voyageur revient sur terre, il retrouve son jumeau vieilli de deux cents ans. Il s'agit là de la comparaison à la fin du voyage, dans un même référentiel (celui de la terre), du temps propre du voyageur et celui de son jumeau, appartenant à deux référentiels différents (l'un lié au boulet de canon, l'autre à la terre). On parle du « paradoxe de Langevin » car, par suite du ralentissement des horloges en mouvement, l'horloge du voyageur doit être en retard par rapport à celle de son jumeau resté sur terre. Mais le jumeau en question peut très bien considérer que voyant s'éloigner son frère à bord du boulet de canon, c'est lui qui est en mouvement et le soi-disant voyageur qui est immobile. C'est donc lui qui doit être le plus jeune à l'arrivée, d'où la situation paradoxale. Ce paradoxe est délicat et sa discussion sort du cadre de cet ouvrage. Disons simplement qu'on lui oppose souvent l'argument suivant lequel on ne se trouve plus dans le cadre de la relativité restreinte, puisque, pour revenir sur terre, le voyageur a du faire un aller-retour et donc subir une phase pendant laquelle le mouvement est décéléré puis accéléré (et donc plus redevable de la relativité restreinte). Mais, comme l'indique la physicienne Marie Antoinette Tonnelat : « *Le rôle des temps d'accélération n'est donc pas de rétablir entre les conclusions des deux observateurs une réciprocité que n'autorisent pas les données physiques du problème. Il est, au contraire, de compenser les résultats qu'on aurait obtenu indûment en supposant la réciprocité des systèmes et de rétablir des conclusions univoques et cohérentes.* » On peut interpréter la différence de vieillissement par le fait que les deux jumeaux n'ont pas suivi le même chemin d'espace-temps. On doit à un autre physicien, Olivier Costa de Beauregard, une analogie intéressante. Il considère



Le voyageur de Langevin : expérience des deux jumeaux.



deux automobilistes (jumeaux naturellement) partant de Lille et se rendant à Bordeaux. L'un emprunte les méandres du littoral, l'autre un trajet rectiligne (disons qu'il prend l'autoroute). Supposons qu'ils partent au même instant et qu'ils arrivent simultanément, les compteurs kilométriques indiqueront des distances parcourues très différentes. Le compteur joue un rôle similaire au compteur de temps propre et, à l'arrivée, la comparaison entre les compteurs marquera bien une différence. Notons que dans cette analogie les conclusions sont inversées : un voyage dans l'espace temps diminue le vieillissement, tandis que les méandres dans l'espace augmentent le total des kilomètres.

La relativité : Einstein, Lorentz ou Poincaré ?

Importance du principe de relativité, absence d'espace absolu, relativité de la simultanéité, contraction des longueurs, dilatation des durées, limite représentée par la vitesse de lumière, nouveau théorème d'additivité des vitesses, augmentation de la masse avec la vitesse, relation entre la masse et l'énergie, ... sont autant de résultats qui permettent de conclure qu'une révolution est apparue en physique en 1905. Une analyse plus détaillée montre toutefois que ces composantes se trouvaient également dans les travaux de Lorentz et de Poincaré.

Une vieille histoire

Les premiers signes relativistes remontent à Fresnel lorsqu'il écrit, dans une lettre à Arago datée de 1818 : « *La vitesse avec laquelle se propagent les ondes lumineuses est indépendante du mouvement des corps dont elles émanent* ». Puis c'est au tour de Maxwell d'entrer en scène. Dans un article de l'Encyclopedia Britannica de 1878, il indique que l'on pourrait en principe mettre en évidence l'éther mais que « *toutes les méthodes par lesquels il est possible en pratique de mesurer la vitesse de la lumière à partir d'expériences terrestres dépendent de la mesure du temps nécessaire pour effectuer le voyage aller et retour d'un point à un autre ; l'accroissement de cette durée due à la vitesse relative de l'éther, ne serait que d'environ un cent millionième de la durée totale du trajet et serait tout à fait imperceptible...* » (le facteur indiqué par Maxwell est le facteur relativiste v^2/c^2 que nous avons rencontré, où v est la vitesse de la terre dans son mouvement autour du soleil (30 km/s) et c la vitesse de la lumière (300 000 km/s), d'où $v^2/c^2 = 10^{-8}$). Maxwell décrit toutefois une expérience dans laquelle la lumière serait séparée en deux parties dans des directions faisant entre elles un angle droit. L'un des rayons aurait une direction



parallèle à celle du mouvement de la terre dans son mouvement autour du soleil tandis que l'autre serait perpendiculaire à ce mouvement. Ces deux rayons seraient réfléchis après avoir parcouru une distance identique puis réunis pour interférer entre eux. Il fait l'hypothèse que les deux rayons voyagent à la même vitesse à travers l'éther et que donc, à cause du mouvement de la terre, l'un doit être légèrement en avance sur l'autre. La mesure interférométrique doit permettre de mettre en évidence ce mouvement. Maxwell ne croit toutefois pas à la possibilité de faire cette expérience terrestre et écrit en 1879 à David Peter Todd, directeur de l'U.S. Nautical Almanac Office de Washington et le prie de se reporter à son article de l'Encyclopedia Britannica. Un certain Albert Michelson qui à l'époque travaille avec Todd, lit la lettre de Maxwell et décide de relever le défi. Il réalise l'interféromètre de précision (qui portera son nom) qui divise, grâce à des miroirs semi-réfléchissants, une source de lumière incidente en deux ondes cohérentes de direction et de différence de phase réglable. En 1881, au cours d'un séjour en Europe, à Postdam, Michelson réalise l'expérience, trouve un résultat négatif et conclut qu'il « *n'y a pas de déplacement des franges d'interférences... Il est démontré que l'hypothèse d'un éther stationnaire est incorrecte.* » Mais en 1886, le physicien hollandais Lorentz critique l'expérience de Michelson en faisant remarquer que la vitesse de la lumière sur le bras de l'interféromètre supposé perpendiculaire au mouvement de la terre est aussi affectée par ce mouvement. La critique de Lorentz pousse Michelson à améliorer son expérience ! De retour aux États-Unis, il décide de refaire l'expérience, cette fois avec son ami chimiste Edward Morley. C'est la fameuse expérience de Michelson et Morley de 1887 mais le résultat demeure tout aussi négatif.

Un mathématicien au service de la physique

C'est à cette époque que le mathématicien et physicien français Henri Poincaré entre en scène. Il écrit en 1889 : « *Peu nous importe que l'éther existe réellement, c'est l'affaire des métaphysiciens ; l'essentiel pour nous c'est que tout se passe comme s'il existait et que cette hypothèse est commode pour l'explication des phénomènes. Après tout, avons-nous d'autres raisons de croire à l'existence des objets matériels ? Ce n'est là aussi qu'une hypothèse commode ; seulement elle ne cessera jamais de l'être, tandis qu'un jour viendra sans doute où l'éther sera rejeté comme inutile.* » On ne peut être meilleur prophète ! De son côté, Lorentz continue de travailler sur les fondements de l'électromagnétisme et de développer l'hypothèse selon laquelle les comportements de la matière et de la lumière peuvent être interprétés en termes de particules chargées. Pour interpréter le résultat négatif de Michelson, il suppose en 1892 que tout corps de longueur l animé d'un mouvement rectiligne et uniforme se contracte dans le sens



du mouvement. Il se rendra compte un peu plus tard que cette hypothèse avait également été faite indépendamment par George Fitzgerald dès 1889, dès lors il associera toujours le nom de Fitzgerald à ce phénomène, connu encore maintenant sous le nom de *contraction de Lorentz-Fitzgerald*. Toutefois, cette contraction est insaisissable (nous y reviendrons plus tard).

Poincaré déclare en 1895 : « *L'expérience a révélé une foule de faits qui peuvent se résumer dans la formule suivante : il est impossible de rendre manifeste le mouvement absolu de la matière, ou mieux le mouvement relatif de la matière pondérable par rapport à l'éther ; tout ce que l'on peut mettre en évidence c'est le mouvement de la matière pondérable par rapport à la matière pondérable.* » La même année, Lorentz, pour rendre compte de l'échec des tentatives faites pour déterminer la vitesse absolue de la terre par rapport à l'éther stationnaire, met au point le formalisme des transformations qui portent son nom.

Quelques auteurs, oubliant les travaux préliminaires de Fresnel, Maxwell, Michelson, Lorentz et Poincaré, qui viennent d'être rappelés, font remonter les origines de la relativité à un texte de Poincaré de 1898. Dans ce texte, Poincaré s'interroge sur la mesure du temps. Il écrit : « *Nous n'avons pas l'intuition directe de l'égalité de deux intervalles de temps ... On a commencé par admettre que la lumière a une vitesse constante, et en particulier que sa vitesse est la même dans toutes les directions. C'est là un postulat sans lequel aucune mesure de vitesse ne pourrait être tentée ... Ce postulat nous fournit une règle nouvelle pour la recherche de la simultanéité. La simultanéité de deux événements, ou l'ordre de leur succession, l'égalité de deux durées, doivent être définies de telle sorte que l'énoncé des lois naturelles soit aussi simple que possible.* »

Puis, la même année, faisant référence à l'expérience de Michelson et aux tentatives d'interprétation de son résultat négatif, Poincaré ajoute : « *Les termes du second ordre auraient dû devenir sensibles, et cependant le résultat a encore été négatif, la théorie de Lorentz laissant prévoir un résultat positif. On a alors imaginé une hypothèse supplémentaire : tous les corps subiraient un raccourcissement dans le sens du mouvement de la Terre ... cette étrange propriété semblerait un véritable coup de pouce donné par la nature pour éviter que le mouvement de la Terre puisse être révélé par des phénomènes optiques... Ceci ne saurait me satisfaire et je crois devoir dire ici mon sentiment : je considère comme très probables que les phénomènes optiques **ne dépendent que des mouvements relatifs des corps matériels en présence**⁴ ... et cela non pas aux quantités près de l'ordre du carré ou du cube de l'aberration, mais rigoureusement. À mesure que les expériences deviendront plus exactes, ce principe sera vérifié avec plus de précision.* » En 1900, Poincaré précise encore davantage sa pensée : « *Et maintenant il*

⁴ Souligné par l'auteur.

faut qu'on me permette une digression ; je dois expliquer, en effet, pourquoi je ne crois pas, malgré Lorentz, que des observations plus précises puissent jamais mettre en évidence autre chose que les déplacements relatifs des corps matériels. On a fait des expériences qui auraient dû déceler les termes du premier ordre ; les résultats ont été négatifs ; cela pouvait-il être par hasard ? Personne ne l'a admis ; on a cherché une explication générale, et Lorentz l'a trouvée ; il a montré que les termes du premier ordre devaient se détruire, mais il n'en était pas de même de ceux du second. Alors on a fait des expériences plus précises ; elles ont aussi été négatives ; ce ne pouvait non plus être l'effet du hasard ; il fallait une explication ; on l'a trouvée ; on en trouve toujours ; les hypothèses, c'est le fonds qui manque le moins ... Mais ce n'est pas assez ; qui ne sent que c'est encore là laisser au hasard un trop grand rôle ? Ne serait-ce pas aussi un hasard que ce singulier concours qui ferait qu'une certaine circonstance viendrait juste à point pour détruire les termes du premier ordre, et qu'une autre circonstance, tout à fait différente, mais tout aussi opportune, se chargerait de détruire ceux du second ordre ? Non, il faut trouver une autre explication pour les uns et pour les autres, et alors tout nous porte à penser que cette explication vaudra également pour les termes d'ordre supérieur, et que la destruction de ces termes sera rigoureuse et absolue. » Poincaré conclut alors : « Ce que nous avons de plus satisfaisant, c'est la théorie de Lorentz ; c'est sans contredit celle qui rend le mieux compte des faits connus, celle qui met en lumière le plus grand nombre de rapports vrais, celle dont on retrouvera le plus de traces dans la construction définitive. »

La construction définitive est en cours. Dans la science et l'hypothèse de 1902, Poincaré fait encore un pas de plus, il affirme : « Il n'y a pas d'espace absolu et nous ne concevons que des mouvements relatifs... Il n'y a pas de temps absolu ; dire que deux durées sont égales, c'est une assertion qui n'a par elle-même aucun sens et qui n'en peut acquérir un que par convention... Non seulement nous n'avons pas l'intuition directe de l'égalité de deux durées, mais nous n'avons même pas celle de la simultanéité de deux événements qui se produisent sur des théâtres différents... Ainsi l'espace absolu, le temps absolu, la géométrie même ne sont pas des conditions qui s'imposent à la mécanique... »

De son côté, Lorentz prend en compte les remarques de son collègue français et publie un nouveau mémoire en 1904 qui commence ainsi : « Poincaré a objecté à la théorie existante que, afin d'expliquer le résultat négatif de Michelson, l'introduction d'une nouvelle hypothèse a été nécessaire et que la même nécessité peut se présenter chaque fois que des faits nouveaux sont mis en lumière... On serait plus satisfait s'il était possible de montrer, par le moyen de certaines hypothèses fondamentales, et sans négliger les termes de quelques ordres de grandeur que ce soit, que les actions électromagnétiques sont entièrement indépendantes du mouvement du système. » Dans ce mémoire, Lorentz introduit l'augmentation de la masse avec la vitesse. Toujours en 1904,



Poincaré analyse les principes qui fondent la physique, et met dans sa liste « le principe de relativité, d'après lequel les lois des phénomènes physiques doivent être les mêmes soit pour un observateur fixe, soit pour un observateur entraîné dans un mouvement uniforme, de sorte que nous n'avons et ne pouvons avoir aucun moyen de discerner si nous sommes oui ou non entraînés dans un pareil mouvement. » Il conclut son discours par ces phrases prémonitoires : « De tous ces résultats, s'ils sont confirmés, émergerait une mécanique entièrement nouvelle, qui serait, par dessus tout caractérisée par le fait qu'aucune vitesse ne pourrait dépasser celle de la lumière⁵, de même qu'aucune température ne peut descendre en dessous du zéro absolu, parce que les corps opposeraient une inertie croissante aux causes qui tendraient à les accélérer dans leur mouvement, et cette inertie deviendrait infinie lorsque l'on approcherait la vitesse de la lumière » ! Poincaré ne s'arrête pas en si bon chemin, l'année suivante il publie un mémoire consacré à la dynamique de l'électron, dans lequel il indique : « Le point essentiel, établi par Lorentz, c'est que les équations du champ électromagnétique ne sont pas altérées par une certaine transformation (que j'appellerai du nom de Lorentz) de la forme ... » C'est là l'origine des **transformations de Lorentz**, qu'il serait d'ailleurs juste d'appeler transformations de Lorentz-Poincaré tant le rôle de Poincaré dans leur genèse a été important.

De tout ceci que pouvons-nous conclure ? Sans aller jusqu'à parler de deux théories de la relativité⁶, nous pouvons dire qu'il y a deux interprétations, nettement différentes, des aspects caractéristiques de la théorie de la relativité restreinte comme l'importance du principe de relativité, la contraction des longueurs, la dilatation des durées, l'augmentation de la masse avec la vitesse, la limite représentée par la vitesse de lumière, la relation entre la masse et l'énergie, qui sont communs aux travaux de Lorentz-Poincaré et à ceux d'Einstein. La théorie de Lorentz-Poincaré, édifiée de 1892 à 1905 s'appuie sur l'hypothèse de « l'électron déformable » et considère comme réelle la contraction des longueurs. Celle d'Einstein, élaborée en 1905, qui s'appuie sur l'hypothèse de l'identité des étalons de mesure des durées et des longueurs et qui traite l'électron comme un objet sans structure, ne considère pas la contraction des longueurs comme réelle mais comme l'analogie dans l'espace-temps à quatre dimensions de l'effet de perspective dans l'espace ordinaire à trois dimensions.

Lorentz et Poincaré ont prolongé l'œuvre de Maxwell, ils ont donné à l'électromagnétisme une structure complète et cohérente. Cette structure reste compatible avec le modèle de l'éther. Einstein, lui, rejette purement et simplement ce modèle de l'éther et le cadre cinématique

⁵ Souligné par l'auteur.

⁶ Comme l'a fait Yves Pierseaux dans sa thèse « *La structure fine de la relativité restreinte* ».



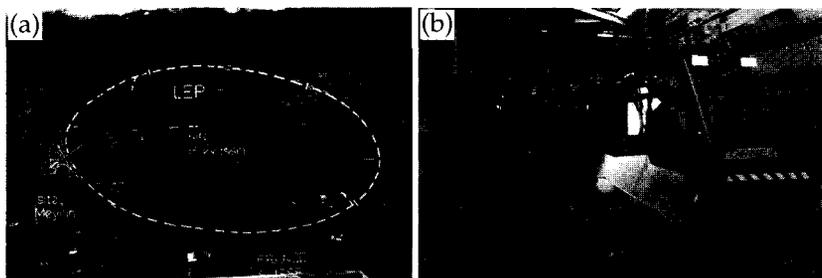
qu'il instaure convient non seulement à l'électromagnétisme mais aussi à l'ensemble de la mécanique. Ce cadre a pu accueillir, sans avoir à être remis en cause, l'ensemble des développements ultérieurs, en particulier ceux de la théorie quantique des champs qui réalise le mariage de la relativité restreinte et de la théorie des quanta. C'est pourquoi, et ceci n'enlève rien au mérite de Lorentz et Poincaré, c'est bien l'approche d'Einstein que la physique retiendra.

De riches applications

Lorsque des électrons tournent dans un accélérateur, ils émettent un rayonnement électromagnétique appelé rayonnement synchrotron. Comme la langue d'Esopé, le rayonnement synchrotron est la meilleure ou la pire des choses. La pire des choses car plus on cherche à accélérer l'électron, plus il rayonne et donc moins l'énergie qu'on lui communique sert à augmenter sa vitesse. L'origine de ce phénomène est purement relativiste : la masse (ou plutôt l'inertie) augmente avec la vitesse et donc plus l'électron va vite, plus il est difficile de lui faire acquérir une vitesse plus grande. À la limite il faudrait dépenser une énergie infinie pour le faire aller à la vitesse de la lumière. Dans l'accélérateur du CERN appelé LEP (pour Large Electron Positron Collider) les électrons pouvaient atteindre $0,9999999999875 c$. La meilleure des choses car ce rayonnement peut être très utile. Cette émission dépend de la vitesse des électrons. Lorsque ceux-ci voyagent à une vitesse proche de celle de la lumière, l'émission du rayonnement se fait tangentiellement à la trajectoire et le faisceau est très directif, c'est donc en quelque sorte un phare très puissant. Mais à la différence d'un phare classique, on peut générer ici toute une gamme de longueur d'onde allant de l'infrarouge aux rayons X. Par ailleurs, cette lumière est extrêmement intense, jusqu'à 10 000 fois plus que celle du soleil. C'est à partir du début des années 1970 que l'on a songé à l'utiliser pour différentes applications. Le rayonnement synchrotron peut s'appliquer à un large ensemble d'activités en recherche fondamentale pour les sciences de la matière et celles du vivant, en recherche appliquée et pour des applications industrielles. En recherche fondamentale, on l'utilise en physique, en chimie, en sciences des matériaux, en sciences du vivant, en sciences de la terre et de l'atmosphère, etc. En recherche appliquée, il intéresse des domaines très divers tels que : la pharmacie (pour la recherche de nouveaux médicaments), le médical, la chimie (détection de substances polluantes dans l'environnement, optimisation du fonctionnement des pots catalytiques, élaboration de nouveaux matériaux, etc.) et la pétrochimie, l'environnement, le nucléaire, l'industrie automobile, mais aussi les nanotechnologies, la micromécanique et la microélectronique, etc.

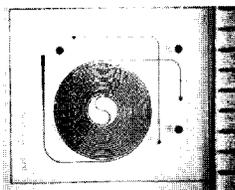


Le CERN : (a)
présentation ;
(b) tunnel du LEP.
© CERN.



Dans un tunnel circulaire de 27 km de long creusé sous la campagne genevoise, des électrons tournent dans un tube à vide. Ils peuvent atteindre la vitesse faramineuse de $0,9999999999875 c$. À cette vitesse, ils effectuent environ 11 000 tours par seconde et leur énergie atteint 100 GeV (c'est comme s'ils étaient accélérés sous une différence de potentiel de ...cent milliards de volt !).

Le rayonnement synchrotron peut graver une résine (c'est ce que l'on appelle de la « gravure profonde »), ce qui permet de fabriquer les moules de minuscules pièces avec une précision inégalée. Le moule de résine peut ensuite être reproduit dans des matériaux très divers : métaux, céramique, verre, polymères, utilisés par exemple en microchirurgie.



Microfluidique LIGA.
© LURE 2003.

L'image ci-contre montre des exemples de micro-objets obtenus par cette technique ; les microcanaux obtenus ont une largeur de 25 microns et une profondeur de 500 microns. De tels objets peuvent être utilisés en analyse médicale (microcolonne chromatographique, électrophorèse) ou pour le refroidissement de composants électroniques (microfluidique).

On peut également voir la matière en trois dimensions, même lorsque l'objet n'absorbe que très peu la lumière. Cette technique d'imagerie (dite par « contraste de phase ») est particulièrement adaptée pour visualiser des détails de la matière vivante, car à l'inverse des radiographies X habituelles, elle permet d'obtenir une image contrastée même si la matière absorbe peu le rayonnement. Cela permet, par exemple, de faire l'imagerie des vaisseaux sanguins, des tissus osseux ou des constituants de la cellule.

6

La relativité générale et l'infiniment grand

Un coup de génie : la généralisation de la relativité

L'équivalence entre l'accélération et la gravitation

Nous avons indiqué les éléments à l'origine de la relativité : il existe deux types d'interaction, la gravitation et l'interaction électromagnétique. La théorie de Newton donnait toute satisfaction tandis que les équations de Maxwell entraînaient des contradictions avec la mécanique. On en comprend la raison profonde : les équations de Maxwell sont relativistes (elles sont invariantes par rapport aux transformations de Lorentz et non par rapport aux transformations de Galilée) et il ne peut pas en être autrement puisqu'elles « contiennent » les lois de propagation de la lumière, laquelle, on l'a vu, est à la base de la relativité ! La loi de Coulomb ne vaut plus pour les charges en mouvement, ces dernières sont redevables des équations de Maxwell, plus générales. Or, comme nous l'avons fait remarquer, la loi de Coulomb est formellement identique à la loi de Newton, en conséquence cette dernière devrait être remplacée par des équations plus générales. Il reste donc à rechercher l'équivalent des équations de Maxwell pour la gravitation ! Ces nouvelles équations devront tenir compte de la vitesse finie de la

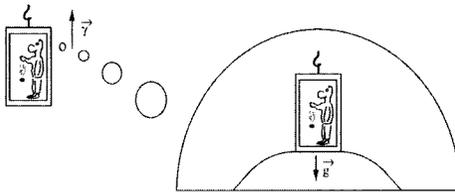


propagation de l'interaction. Einstein s'attèle à la tâche dès 1907, mais le chemin va s'avérer rempli d'embûches. Il parvient aux équations recherchées (justement appelées *équations d'Einstein*) après neuf ans d'effort, il dira lui-même : « *À côté de ce problème, la première théorie de la relativité est un jeu d'enfant* ». Les difficultés sont à la fois mathématiques (il faut mettre au point un formalisme spécifique, le calcul tensoriel, qui généralise le calcul vectoriel) et conceptuel : notre espace n'est pas, comme on le pensait jusque-là, plat (euclidien) mais courbe (riemannien) !

La relativité de 1905 est appelée restreinte car elle ne s'applique qu'aux référentiels inertiels (ou galiléens, c'est-à-dire en mouvement rectiligne à vitesse uniforme les uns par rapport aux autres). Einstein se demande, en 1907, s'« *il est pensable que le principe de relativité vaille également pour des systèmes qui sont accélérés les uns par rapport aux autres* ». Cette tentative semble irrémédiablement vouée à l'échec pour une raison très simple : autant le mouvement rectiligne uniforme est « comme rien », autant il ne peut pas en être de même d'un mouvement accéléré : un coup de frein brusque ou une accélération soudaine sont bien clairement ressentis ! Chacun d'entre nous n'a aucun mal à faire la différence entre être sur le quai du métro et être dans le métro freinant brusquement suite, par exemple, à un signal d'alarme actionné. C'est en réfléchissant à un tout autre problème qu'Einstein va franchir un premier pas vers la solution. Lors du célèbre dialogue de Galilée, on peut lire l'échange suivant entre Simplicio (le représentant de la physique prégaliléenne) disant : « *Vous n'avez pas, je suppose, l'intention de nous prouver qu'une balle de liège tombe à la même vitesse qu'une balle de plomb ?* » et Salviati (porte parole des idées de Galilée) répondant : « *Ayant vu, dis-je, tout cela, j'en arrive à cette opinion que si l'on éliminait complètement la résistance du milieu, tous les corps tomberaient à la même vitesse.* » Newton traduira cela en équation : le mouvement d'un corps de masse m soumis à la pesanteur \vec{g} est déterminé par $m\vec{g} = m\vec{a}$; l'accélération \vec{a} est donc indépendante de la masse du corps ($\vec{g} = \vec{a}$). C'est en réfléchissant sur l'origine de cette simplification qu'Einstein va être amené à poser un principe dit d'équivalence. En fait l'équation écrite plus haut devrait s'écrire $m_p\vec{g} = m_i\vec{a}$ car rien ne permet de dire a priori que la masse pesante m_p (qui intervient dans l'attraction du corps soumis à la gravitation) est identique à la masse inerte m_i qui traduit le principe fondamental de la dynamique (si la force considérée était d'origine électrique on écrirait $q\vec{E} = m_i\vec{a}$ et il n'y aurait pas de simplification possible). La simplification qui intervient dans le cas de la pesanteur traduit précisément le constat expérimental suivant lequel « *si l'on éliminait complètement la résistance du milieu, tous les corps tomberaient à la même vitesse.* »



Einstein indique que « l'égalité des masses inertes et des masses pesantes lui apparut alors dans sa signification profonde. » Il imagine une expérience de pensée, connue sous le nom « d'ascenseur d'Einstein » parce qu'il met en scène un physicien qui se trouve dans un laboratoire qui est un ascenseur. À cause de l'égalité entre masse inerte et masse pesante aucune expérience ne pourra lui permettre de dire s'il est dans un ascenseur au repos dans un champ de gravitation \vec{g} ou bien s'il est dans un ascenseur non soumis à un champ de gravitation mais tiré vers le haut avec une accélération uniforme \vec{a} . Autrement dit, il n'y a pas de différence entre un référentiel accéléré et un champ de gravitation. Ils sont équivalents. Einstein peut ainsi conclure : « Nous devons supposer l'équivalence physique complète d'un champ gravitationnel et de l'accélération correspondante du système de coordonnées de référence. Cette hypothèse étend le principe de relativité au cas d'un mouvement uniformément accéléré de ce référentiel. » Il peut donc de nouveau songer à généraliser le principe de relativité à des référentiels dont la vitesse n'est pas uniforme.



Test du principe d'équivalence

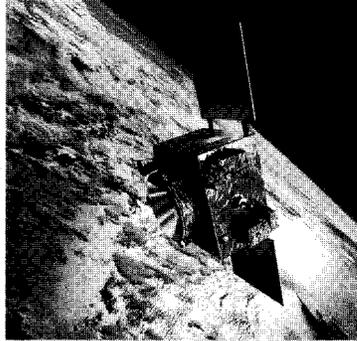
On peut faire remonter les premiers tests du principe d'équivalence (égalité entre masse inerte et masse pesante) à Laplace. S'il n'était pas vérifié, le Soleil n'attirerait pas de la même façon la Terre et la Lune et leurs mouvements en seraient perturbés. À l'époque de Laplace, les observations permettent d'obtenir une précision de 1 pour 1 million. Entre 1889 et 1908, le Baron Eötvös fait un test plus précis à l'aide d'un pendule de torsion : la direction de la verticale résulte d'une part de la force d'attraction de la Terre, d'autre part de la force centrifuge due à sa rotation, la première fait intervenir la masse pesante, la seconde la masse inerte. Eötvös a constaté la parallélisme strict des pendules les plus variés, montrant que la direction résultant ne varie pas avec la nature du corps suspendu à la balance de torsion. La précision atteinte par Eötvös était de 10^{-9} (1 pour un milliard). Dans les années 1970 des expériences similaires ont été effectuées par Dicke à Princeton et Bradinski à Moscou, ils portèrent la précision à respectivement 10^{-11} et 10^{-12} . L'étude précise du mouvement de la Lune donne actuellement une précision comparable (10^{-12} , soit 1 pour mille milliards).

L'ascenseur d'Einstein : un référentiel uniformément accéléré (symbolisé à gauche par un ascenseur tiré vers le haut avec une accélération \vec{a}) est équivalent à un référentiel au repos (« inerte ») plongé dans un champ de gravitation constant \vec{g} . Aucune expérience de physique ne peut distinguer les deux cas : c'est le « principe d'équivalence », l'idée « la plus heureuse » d'Einstein.



L'expérience française MicroScope, prévue pour 2008, qui consiste à étudier la chute libre de deux corps de composition différente dans un satellite autour de la Terre, permettra d'améliorer d'un facteur mille cette performance (précision de 10^{-15} , soit 1 pour un million de milliards).

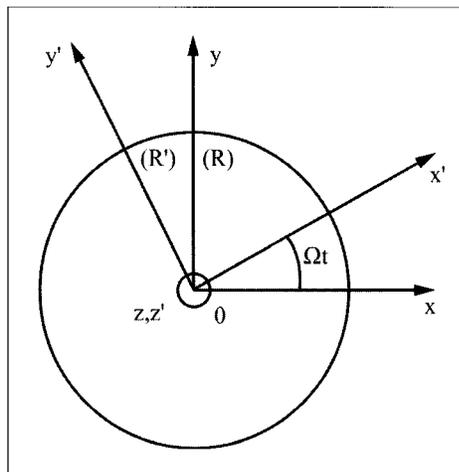
MicroScope. © CNES.



Un espace courbe

Toutefois, une nouvelle difficulté survient. Comme on le sait, les lois de la physique sont connues dans les référentiels galiléens. Étendre le principe de relativité à tous les repères, ce qui est le but de la relativité générale, impose donc de considérer des référentiels accélérés, par exemple en rotation. Soit donc un référentiel (appelons le R') en rotation par rapport à un référentiel galiléen R . Mesurons (dans R) le rapport entre le périmètre P et le diamètre D d'un cercle solidaire de R en disposant de petites allumettes tout autour du cercle et le long de son

R est un référentiel galiléen, R' effectue un mouvement de rotation par rapport à R , il est donc accéléré relativement à R . Les lois de la physique sont connues dans R puisque c'est un référentiel galiléen. D'après la relativité générale, l'espace euclidien n'est pas adapté à la description des lois physiques dans R' .



diamètre. On trouvera naturellement $P/D = \pi$. Si maintenant le cercle est solidaire de R' , la contraction des longueurs dans le sens du mouvement (et qui n'intervient pas dans la direction perpendiculaire à ce mouvement), fera qu'un observateur de R trouvera un rapport $P/D > \pi$. Vu de l'observateur de R , l'espace dans le référentiel accéléré n'est donc pas euclidien mais à cause du principe d'équivalence, cela signifie que lorsque l'on considère un champ de gravitation (équivalent rappelons-le à une accélération), l'espace n'est plus euclidien ! Nous vivons dans un champ de gravitation (produit par la terre), c'est-à-dire dans un espace courbe !

Il est possible de construire des géométries non euclidiennes cohérentes, c'est-à-dire pour lesquelles on ne pose pas l'axiome des parallèles. C'est Gauss qui imaginera la première géométrie non euclidienne, ses travaux seront prolongés par son élève Riemann et, indépendamment, par le mathématicien russe Lobatchevski. Cela fera dire à Hermann Weyl : « *Le vrai continuateur de Riemann, celui dont le génie mathématique et physique est du même ordre que le génie de l'illustre géomètre, celui qui accomplit, soixante-dix années après, les prophéties que Riemann avait énoncées avec précision, c'est Einstein.* »

La partie n'est toutefois pas gagnée car il faut mettre tout cela en équation. Par chance, Einstein trouve l'aide de l'un de ses anciens condisciples du Polytechnicum de Zürich, Marcel Grossmann, devenu entre temps professeur de mathématiques dans cette École. Ils ont recours au formalisme du calcul tensoriel, outil très mathématique inconnu des physiciens (voir encadré). Einstein aboutit ainsi à une égalité tensorielle qui est le fondement de la gravitation relativiste. Cette équation s'appelle l'équation d'Einstein. Elle généralise l'équation de Newton de la même façon que les équations de Maxwell généralisent l'équation de Coulomb. C'est le 25 novembre 1915, dix ans après son article sur la relativité restreinte, qu'il publie les équations définitives. Il peut enfin dire : « *La théorie de la relativité générale possède désormais une structure logiquement complète* ».

L'intuition d'Einstein a réellement été fantastique : le mathématicien français Elie Cartan montrera plus tard qu'à partir des hypothèses que s'étaient fixées Einstein la seule solution mathématiquement possible était celle à laquelle il avait aboutit de façon intuitive ! Le grand physicien russe Landau (prix Nobel de physique 1962) dit à propos de la théorie d'Einstein : « *Je fus frappé par l'invraisemblable beauté de la relativité généralisée* ». Quant à son collègue E. Lifchitz il en parle comme de « *la plus belle des théories physiques existantes* ».



Les tenseurs et la relativité générale

Le calcul tensoriel permet de trouver des propriétés et des relations entre des êtres mathématiques indépendamment des coordonnées choisies. Ils ont donc une valeur intrinsèque et c'est ce qui en fait leur intérêt en physique. Ce sont les travaux de Voigt sur la déformation des milieux cristallins qui ont permis de dégager cette notion de tenseur (d'où leur nom). Le calcul tensoriel a été développé ensuite par les mathématiciens Ricci et Levi-Civita.

Les tenseurs permettent de traduire naturellement l'exigence imposée par la relativité générale : les lois de la physique doivent prendre la même forme dans tous les repères, galiléens ou non (on dit qu'elles doivent satisfaire la covariance générale). Einstein fait alors une analogie avec la théorie classique de la gravitation. À partir de la loi de Newton, on peut relier le potentiel de gravitation à la distribution de matière qui en est à l'origine. La relation (appelée en physique *équation de Poisson*, du nom du mathématicien français qui l'a établie) relie la dérivée seconde du potentiel à la masse volumique de la source du champ. Pour satisfaire la contrainte imposée par la relativité générale, on doit maintenant avoir une égalité entre deux tenseurs. Einstein cherche une telle égalité entre la dérivée seconde du tenseur généralisant le potentiel de gravitation et un tenseur généralisant la masse (il s'agit du tenseur impulsion-énergie, puisque l'énergie généralise la masse).

Cette égalité s'écrit (équation d'Einstein) $R_{ij} - \frac{1}{2} g_{ij} R = \chi T_{ij}$ (à gauche du signe égal on trouve le tenseur de Ricci (R_{ij}), la courbure de l'espace (R) et les potentiels de gravitation (g_{ij}), tandis qu'à droite du signe égal on trouve le tenseur impulsion-énergie (T_{ij})). Einstein en faisait le commentaire suivant : « *Le membre de gauche est sculpté de marbre pur, tandis que celui de droite est fait d'un bois vil, très ordinaire* ». En effet le membre de gauche traduit la « géométrisation » de la physique. Les tentatives d'Einstein pour géométriser ensuite toute la physique se solderont par un échec. Mais dans le vide on a simplement $R_{ij} = 0$, c'est sur cette équation que les premières vérifications de la relativité générale seront fondées.

La relativité générale confirmée

La relativité générale est bien une construction magnifique, probablement la plus belle de la physique. Einstein disait que : « *L'importance de la théorie de la relativité générale n'est pas à rechercher dans la confirmation expérimentale de certains effets très faibles, mais bien plutôt dans la simplicité* ».



de ses fondements et sa cohérence interne ». Cette validation est toutefois essentielle. D'ailleurs, les trois premières vérifications ont toutes été imaginées par Einstein pendant l'élaboration de sa théorie. Il s'agit du *décalage vers le rouge*, premier effet imaginé, mais dernier à avoir été vérifié ; de *l'avance du périhélie de Mercure*, qui confortera la confiance d'Einstein lors de l'élaboration de sa théorie ; et *la déviation des rayons lumineux*, qui le propulsera vers la gloire. Voilà pour les tests réalisés du vivant d'Einstein. Mais, alors qu'à partir de la fin des années 1920, la relativité générale cesse d'être un sujet d'actualité pour les physiciens, qui préfèrent se tourner vers la mécanique quantique naissante (voir chapitre 7), on assistera à une véritable renaissance de la relativité générale au début des années 1960. Nous aborderons ci-dessous quelques thèmes d'actualité comme la recherche des ondes gravitationnelles, les mirages gravitationnels (qui sont maintenant un outil très utile à l'astrophysique), la mise en évidence de l'entraînement de l'espace-temps par la terre dans son mouvement de rotation diurne qui fait l'objet d'un test extraordinairement délicat, ainsi que le test de l'éventuelle non constance des « constantes » fondamentales.

Avance du périhélie de Mercure : plus fort que Newton !

Le périhélie d'une planète est le point de sa trajectoire le plus proche du Soleil. Ce point tourne lentement autour du Soleil, l'effet est d'autant plus marqué que la planète est proche du Soleil, et Mercure est la planète qui en est le plus proche. L'astronome français Urbain Le Verrier a calculé par la théorie de Newton, en 1839, l'influence de la perturbation induite par les différentes planètes sur le mouvement de Mercure ; Vénus (la planète la plus proche de Mercure) ; Jupiter et la Terre principalement. Le résultat de son très long calcul a donné 526,83 secondes d'arc (") par siècle (c'est-à-dire que le déplacement du point le plus proche du Soleil se déplace d'un angle de moins de 1° par siècle !) Les observations astronomiques donnaient une valeur plus élevée que celle-ci de 38 secondes d'arc par siècle. Le Verrier imagina l'existence d'une autre planète, non encore découverte, pour expliquer cet écart. En 1859, un astronome amateur, Lescarbault, observa une petite tache noire passant devant le Soleil. Le Verrier trouva que cette éventuelle nouvelle planète (qu'il baptisa Vulcain, car la planète devant être très proche du Soleil était sans doute très chaude) ne pouvait pas être à l'origine de l'avance trop faible du périhélie de Mercure. En 1880, le calcul fut refait par l'américain Newcomb (1835-1909) qui porta la valeur du résidu à 43" par siècle (qui est la bonne valeur). Il proposa, pour interpréter cette différence, de changer la loi de Newton de l'inverse du carré ($1 / r^2$) en une loi légèrement différente



Avance du périhélie de mercure : le périhélie d'une planète est le point de sa trajectoire le plus proche du Soleil. Ce point tourne lentement autour du Soleil ; pour Mercure le périhélie avance de 526,83 secondes d'arc par siècle, dont 43 (par siècle) ne pourront être expliquées que par la relativité générale.



($1 / r^{2,0000001574}$) ! Cependant, cette modification était en désaccord avec l'observation précise de l'orbite de la Lune. D'autres hypothèses ont ensuite été examinées, comme l'influence d'un éventuel aplatissement du Soleil ou la prise en compte des corrections liées à la relativité restreinte. Mais rien n'y fit, le mystère demeurait entier... jusqu'au dix-huit novembre 1915, jour où Einstein a annoncé qu'il avait réussi à expliquer quantitativement « la rotation séculaire¹ de l'orbite de Mercure... sans faire la moindre hypothèse ». Dans une lettre de vœux adressée le 1^{er} janvier 1916 à Lorentz, Einstein lui dit qu'il « savourait actuellement la compréhension si durement acquise du périhélie de Mercure et son accord avec l'observation ». Quinze jours plus tard, il écrit à son ami Paul Ehrenfest : « Figurez-vous ma joie en trouvant que les équations donnent le mouvement exact du périhélie de Mercure. Je fus littéralement transporté de bonheur pendant quelques jours ». Un des principaux biographes (et collaborateur) d'Einstein (Abraham Pais) indique qu'il « est persuadé que cette découverte fut, et de loin, la plus grande expérience émotionnelle qu'Einstein ait connue dans sa vie scientifique, peut-être même de son existence ». Notons pour conclure ce point, qu'Einstein avait, dès le début de ses travaux sur la relativité générale, bien en tête les conséquences possibles, puisqu'il écrit dès décembre 1907 à son ami Conrad Habicht : « ... j'espère expliquer ainsi la modification séculaire encore inexpiquée du périhélie de Mercure. »

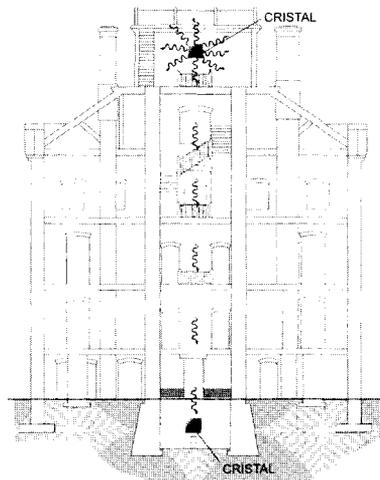
Encore un ralentissement dans les horloges

Le phénomène de ralentissement des horloges dans un champ de gravitation est le premier qui ait été découvert par Einstein, mais la vérification expérimentale de cet effet n'a été réalisée de manière satisfaisante que beaucoup plus tard, en 1960. L'origine de ce ralentissement est directement liée au fait qu'il y a équivalence entre un référentiel accéléré et un champ de gravitation. Considérons un référentiel accéléré (R') qui s'éloigne, par exemple, d'un référentiel au repos (R). Mesurée dans R, une horloge solidaire de R' retarde (effet de dilatation des durées). À cause de l'équivalence rappelée ci-dessus, une horloge placée dans un champ de gravitation retardera. Or comme nous l'avons déjà indiqué, les atomes sont des horloges naturelles, qui de plus sont toutes identiques. Un retard s'exprime par une fréquence plus faible, c'est-à-dire par une longueur d'onde plus grande ; il y a *déplacement vers le rouge* (car dans le visible la plus grande longueur d'onde est le rouge, au delà le rayonnement devient infrarouge et est invisible). Ainsi, dès 1907, Einstein consacre, dans un article, un paragraphe tout entier à décrire l'« influence du champ de gravitation sur

¹ C'est-à-dire en un siècle.



les horloges », prévoyant en particulier « que la lumière qui vient de la surface solaire... possède une longueur d'onde supérieure d'environ deux millièmes à celle de la lumière émise sur la terre par des substances identiques ». Cette différence est à l'époque indétectable car le Soleil étant très chaud, les atomes (ou plutôt les ions) qui le composent sont très agités et l'effet Doppler est largement prédominant. Pour le prendre en compte de façon exacte, il faudrait connaître de façon précise la température du Soleil, laquelle est connue grâce à ... l'effet Doppler. Einstein reviendra de façon plus détaillée en 1911 sur ce décalage vers le rouge des raies spectrales, mais la vérification ne sera vraiment faite qu'après sa mort. L'expérience sera réalisée en 1960 par deux physiciens américains, Pound et Rebka, de l'Université de Harvard, dans des conditions pour le moins surprenantes. Bien que l'effet du champ de gravitation sur la marche des horloges soit intrinsèquement extrêmement faible, les deux physiciens décident de mettre en évidence une variation de longueur d'onde émise par deux sources situées à des altitudes différentes ; en bas et en haut de la tour



Pound et Rebka mettent en œuvre l'effet Mössbauer sur l'isotope 57 du fer (^{57}Fe), ce qui leur permet d'avoir une largeur de raie du photon γ émis extrêmement fine (la variation relative de la fréquence ν est de $d\nu/\nu = 10^{-12}$), mais néanmoins la raie spectrale est encore plus de mille fois plus large que l'effet à mesurer. Ils réussissent toutefois la mesure en compensant le décalage gravitationnel par un décalage Doppler obtenu en déplaçant la platine sur laquelle est fixé l'émetteur γ (^{57}Fe) à une vitesse de 2 mm par heure !

Expérience de Pound et Rebka réalisée dans la tour du Jefferson Building de Harvard.
© Tous droits réservés.



du Jefferson Building de Harvard ! Compte tenu de la faible hauteur de la tour (environ 25 mètres), le décalage prévu par la théorie est infime : 2×10^{-15} (deux millièmes de milliardième) en valeur relative ! La mesure effectuée sera tout à fait conforme aux prévisions de la relativité générale. Ce n'est que plus tard que la mesure pourra être également faite à partir d'observations astronomiques, d'abord sur le Soleil (1964), puis sur des naines blanches² (1967).

D'autres vérifications, plus directes encore, ont été effectuées depuis. Il s'agit d'expériences comparant les données délivrées par des horloges atomiques (de même construction) embarquées. Ces expériences, réalisées d'abord sur avion (1971) puis sur fusée (1976), ont confirmé que l'horloge subissant le champ de gravitation le plus intense (i.e. celle restée sur terre) retarde par rapport à celle qui est en vol (voir encadré). La confrontation entre mesure et théorie est excellente : 1 % pour l'avion et 0,01 % pour la fusée.

Mesures du décalage des horloges

C'est à partir de 1971 que le ralentissement des horloges dans un champ de gravitation a pu être mesuré directement grâce à des horloges atomiques. L'expérience, réalisée par J.C. Hafele et R. Keating, consistait à comparer les données de deux horloges atomiques, l'une à Terre, l'autre placée à bord d'un avion. La différence de temps donnée par les deux horloges résulte de deux effets relativistes : la dilatation des durées (l'horloge de l'avion retarde par rapport à celle restée à Terre à cause de la vitesse de l'avion) et

l'effet de gravitation (l'horloge de l'avion avance par rapport à celle restée à Terre car elle est soumise à un champ de gravitation plus faible). La prévision théorique (somme algébrique des deux effets) est en accord avec les observations expérimentales (la précision obtenue est de 1 %).

Hafele et Keating près
de leur horloge
atomique embarquée
dans un avion.
© Tous droits
réservés.



² Lorsqu'une étoile de masse semblable à celle du Soleil a consommé tout son « carburant thermonucléaire » elle s'effondre sur elle-même et devient une naine blanche. Sa densité est très grande : une naine blanche de la masse du Soleil a la taille de la Terre. La chaleur emmagasinée durant l'effondrement rend les naines blanches très chaudes : elles émettent donc une lumière blanche, d'où leur nom.

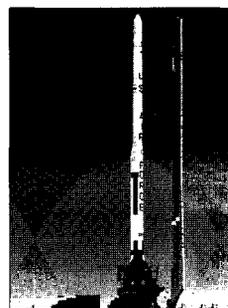
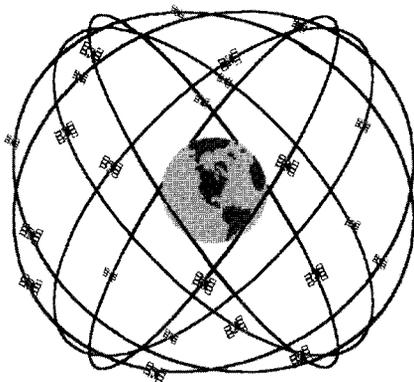


En 1976, Robert Vessot et Martin Levine ont utilisé une fusée de façon à obtenir un effet plus important et donc une précision plus grande (0,01 % soit 10^{-4}). Dans les deux cas, l'accord avec la théorie a été total.

L'expérience française Pharaon (horloge atomique dans l'espace) qui doit être placée en 2007 dans la Station Spatiale Internationale, permettra encore d'améliorer la précision de ce test. Grâce à la fabuleuse stabilité de l'horloge (10^{-16} sur une durée de 10 jours, ce qui correspond à une erreur inférieure à une seconde en ... 300 millions d'années), l'effet du décalage vers le rouge pourra être testé à 2×10^{-6} près c'est-à-dire 50 fois mieux que pour le test avec une fusée.

Relativité générale et GPS

Les horloges atomiques du GPS (Global Positioning System) subissent quatre effets relativistes : le plus important (avance de $45,8 \mu\text{s}$ par jour) est lié au champ de gravitation plus faible à l'altitude des satellites de la constellation ($\sim 20\,000 \text{ km}$) que sur Terre, le second est lié à la dilatation des durées (retard de $7,2 \mu\text{s}$ par jour) induite par la vitesse des satellites GPS (environ 4 km/s), les deux autres sont beaucoup plus faibles (133 ns et 46 ns par jour). Au total, les horloges atomiques du GPS avancent de $38 \mu\text{s}$ par jour par rapport à celles sur Terre. Si ces effets n'étaient pas pris en compte, il en résulterait une erreur sur la position délivrée par les récepteurs GPS de ... 10 km par jour ! (à comparer à la précision d'un récepteur commercial qui est d'environ 15 m).



Fusée Scout D lancée le 18 juin 1976 pour vérifier le ralentissement des horloges dans un champ de gravitation. © NASA.

Constellation GPS.



Déviations des rayons lumineux et gloire universelle

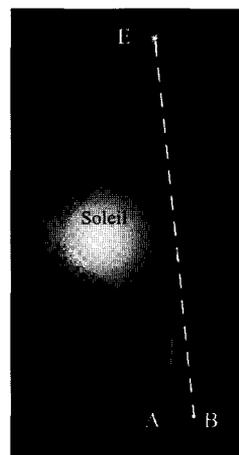
C'est le résultat des observations faites lors de l'éclipse de 1919 qui fit connaître Einstein au grand public et qui le propulsera au sommet de sa gloire. Curieusement, on peut faire remonter cette histoire au XVIII^e siècle ! Le révérend John Michell a en effet été le premier à vouloir, dès 1783, étudier l'influence de la gravitation sur la lumière. L'idée était d'ailleurs naturelle dans la mesure où l'on pensait avec Newton que la lumière est constituée de corpuscules. On sait qu'une fusée doit posséder une vitesse minimum (dite de libération) pour s'extraire du champ de pesanteur terrestre (11 km/s). On peut donc se poser la question inverse : quel est le champ de gravitation à partir duquel la lumière (qui possède la vitesse de 300 000 km/s) ne peut pas s'en extraire ? Le calcul donna comme réponse le champ produit par une étoile de même densité que le Soleil mais de diamètre 500 fois supérieur. À ceci près qu'un tel corps ne pourrait pas émettre de lumière, le révérend Michell venait de trouver, avec près de deux siècles d'avance, le concept de trou noir³ ! Laplace, introduit également ce concept, d'abord de façon qualitative, dans sa fameuse *Exposition du système du monde* de 1796, puis de façon quantitative en 1799. Von Soldner, en 1803, calcule que, d'après la théorie de Newton, la lumière provenant d'une étoile et passant près du Soleil, doit être déviée par ce dernier d'un angle de 0,875 seconde d'arc (cette valeur est extrêmement faible puisque c'est l'angle sous lequel on voit une balle de golf distante de ... 20 km). On ignorait quelle pouvait être la masse du corpuscule hypothétique associé à la lumière et l'on sait aujourd'hui que la lumière n'a pas de masse, mais peu importe puisque le résultat est indépendant de cette masse (elle s'élimine à la fin du calcul).

Dès le début de ses travaux sur la relativité générale, en 1907, Einstein imagine cet effet de déviation des rayons lumineux, mais sans donner de valeur numérique ; il indique alors : « Il résulte de ceci que les rayons lumineux ... sont courbés par le champ de gravitation ». En 1911, il publie un article qu'il introduit ainsi : « J'ai essayé de répondre, dans un article paru il y a trois ans, à la question de savoir si la propagation de la lumière est influencée par la gravité. Je reviens à nouveau sur ce sujet, parce que la présentation que j'en ai faite à l'époque ne me satisfait plus, mais surtout parce que, maintenant, je me rends compte après coup que l'une des conséquences les plus importantes de cette réflexion est accessible à la vérification expérimentale. Il résulte en effet de la théorie proposée que des rayons lumineux passant au voisinage du Soleil subissent, sous l'effet de son

³ Le champ gravitationnel est si intense que la lumière ne peut pas s'échapper d'un tel astre. Il apparaît donc totalement obscur à un observateur extérieur, c'est pourquoi on lui a donné le nom de trou noir.



champ de gravitation, une déflexion, si bien qu'il se produit une augmentation apparente d'une seconde d'arc de la distance angulaire du Soleil à une étoile fixe paraissant proche de lui. » Il quantifie plus précisément, à la fin de son papier, la valeur de cette déviation : « Un rayon lumineux passant au voisinage du Soleil subirait en conséquence une déviation de 0,83 seconde d'arc ». À l'automne 1914, Einstein, en utilisant un formalisme plus élaboré confirme cette valeur pour la déviation de la lumière. La vérification doit être faite par l'astronome Erwin Freundlich lors de l'éclipse solaire de 1914, mais l'effet prédit est à la limite de ce que les instruments peuvent détecter, et l'expédition se solde par un échec. Einstein l'a échappé belle ! En effet, il s'aperçoit en 1915 que la courbure de l'espace-temps (qu'il a introduit dès 1912 dans sa théorie) affecte également les rayons lumineux. Il donne la valeur définitive de cette déviation dans son article du 18 novembre 1915 : elle est de $1''70$ d'arc, le double de la valeur précédente. À la fin de la première guerre mondiale, une nouvelle expédition, dirigée par Eddington, a lieu à l'occasion de l'éclipse du 29 mai 1919. Deux expéditions quittent l'Angleterre, l'une conduite précisément par Eddington se place sur l'île de Principe, au large des côtes de la Guinée espagnole, l'autre, conduite par Crommelin s'installe à Sobral, au Nord du Brésil. À la mi-septembre 1919, Eddington présente un rapport préliminaire sur les résultats de l'expédition : la déviation de la lumière est comprise entre $0,87''$ et le double de cette valeur. Lorentz, qui apprend ce résultat, envoie le 22 septembre un télégramme à Einstein : « Eddington trouvé déplacement stellaire au bord du Soleil entre pour l'instant neuf dixièmes de seconde et double de cette valeur. Salutations. Lorentz. » Les résultats définitifs de l'expédition d'Eddington confirment la prévision d'Einstein. Ils sont présentés à la Royal Society de Londres le 6 novembre 1919. L'astronome Royal, Dyson, annonce que les prédictions d'Einstein sont confirmées. Finalement, Joseph John Thomson, Président de la *Royal Society*, indique qu'il s'agit du « plus important résultat lié à la théorie de la gravitation obtenu depuis l'époque de Newton, et il convient qu'il soit annoncé lors d'une réunion de la Société qui est si intimement liée à son nom », puis il ajoute que « ce résultat est l'une des plus grandes – et peut-être la plus grande – des réalisations de l'Histoire de la pensée humaine ». C'est à partir de ce jour là qu'Einstein entre dans la légende, on peut en comprendre la raison. Le résultat annoncé par Einstein, et confirmé par l'éclipse, est le double de celui que l'on obtient avec un calcul newtonien, la différence venant du fait que l'espace temps est courbe ! Ainsi le concept de courbure de l'espace temps, qui défie notre imagination, est confirmé ! Par ailleurs, nous sommes en 1919 à la fin d'une guerre mondiale terrifiante de quatre ans, le besoin de penser à autre chose, de rêver à nouveau, est énorme et, qui plus est, les scientifiques de deux pays qui étaient en conflit se complètent. Eddington écrit à Einstein « ... toute l'Angleterre parle de votre théorie.



Déviation des rayons lumineux par un champ de gravitation : E est une étoile fixe. Lorsque le rayon lumineux passe près du soleil on observe une étoile en A (l'observation doit être faite pendant une éclipse pour ne pas être aveuglé par l'éclat du soleil). À une autre époque de l'année, le soleil ne s'interpose pas sur le trajet lumineux, le rayon n'est alors pas courbé et l'on observe l'étoile en B.



Elle a fait sensation... C'est ce qu'on pouvait espérer de mieux pour l'amélioration des relations scientifiques entre l'Angleterre et l'Allemagne. »

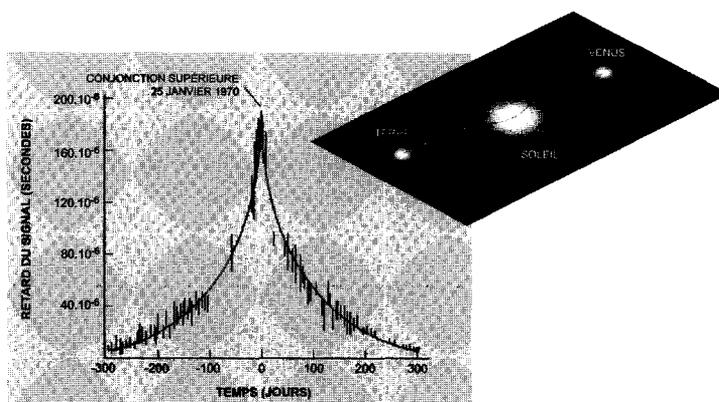
Einstein ne doutait pas, semble-t-il, des résultats de l'expédition. Lorsque Ilse Rosenthal-Schneider, qui est alors son étudiante, lui demande quelle aurait été sa réaction si les observations avaient infirmé la théorie, il répond : « *J'en aurais été navré pour Dieu, car la théorie est exacte* ». Ernst Strauss, qui est l'assistant d'Einstein de 1944 à 1948, rapporte l'anecdote suivante. À la mort de Planck, Einstein lui confie : « *C'était un des êtres les plus intelligents que j'ai jamais connu, et un de mes meilleurs amis ; mais, vous savez, il n'a jamais vraiment compris la physique* » ; à Strauss qui lui demande comment il peut dire une chose pareille, il répond : « *Pendant l'éclipse de 1919, il est resté debout toute la nuit pour voir si elle allait confirmer la déviation de la lumière dans le champ gravitationnel solaire. S'il avait vraiment compris la façon dont la théorie de la relativité générale explique l'équivalence de la masse inerte et de la masse gravitationnelle, il serait allé se coucher comme moi.* »

La relativité générale au service de l'astrophysique

De nouveaux tests

Les trois tests de confirmation de la relativité générale que nous venons d'analyser ont été imaginés par Einstein lui-même. Un regain d'intérêt pour cette théorie de la gravitation relativiste est apparu au début des années 1960 et, très rapidement, un quatrième test a été imaginé qui est principalement dû à l'américain Irwin Shapiro. L'idée est de mesurer le temps de parcours aller-retour d'une onde radar se réfléchissant sur

Le test de Shapiro consiste à mesurer le temps de parcours aller-retour d'une onde radar se réfléchissant sur une planète (ici Venus).



une planète. Ce temps doit être selon la relativité générale légèrement supérieur à celui prévu en théorie newtonienne. L'espace-temps est en effet « incurvé » au voisinage du Soleil à cause de son champ de gravitation. Ainsi une onde radar venant de la Terre, frôlant le Soleil, se réfléchissant sur la planète puis revenant sur Terre parcourt un chemin un peu plus long que si l'espace était plat, de la même façon que si vous considérez deux points sur une feuille et une droite joignant ces deux points, la distance entre ces points sera plus longue si la feuille est légèrement incurvée, que si elle est parfaitement plane. Le principe est simple, le calcul de l'effet l'est beaucoup moins et la vérification expérimentale extrêmement délicate : si l'on considère un écho radar se produisant sur Vénus et un radar émettant 400 kW, le signal de retour à détecter n'est que de un millième de milliardième de milliardième de watt (10^{-21} W) ! Le défi a toutefois été relevé et des échos radar sur Vénus ont confirmé, en 1967, l'effet prévu par Shapiro. La précision n'était toutefois pas très satisfaisante (20 %), aussi il fut décidé

L'expérience Gravity Probe B

Une expérience, imaginée il y a plus de quarante ans, a été lancée au 1^{er} semestre 2004 : elle s'appelle Gravity Probe B. Il s'agit d'une part, de vérifier avec une précision jamais atteinte (un centième de %) la déformation de l'espace-temps produite par le champ de gravitation terrestre (effet géodésique) et d'autre part, de vérifier (ce qui n'a jamais encore été fait) un effet prédit par la relativité générale : l'entraînement (très partiel) de l'espace-temps induit par le mouvement de rotation diurne de la terre. Il s'agit d'effets extrêmement faibles : l'effet géodésique est de 6,6'' par an, alors que l'effet d'entraînement est de 0,042'' par an.

Des trésors d'imagination et de technologie ont été nécessaires. Quatre gyroscopes sont embarqués à bord d'un satellite orbitant à 650 km d'altitude. La précision avec laquelle se fait la mesure du changement de direction du gyroscope est de 0,0001 arc seconde par an (c'est un angle minuscule, c'est par exemple l'angle sous lequel on voit l'œil de la statue de la liberté de New York depuis Paris !). Le gyroscope est constitué d'une sphère supraconductrice parfaite de 4 cm de diamètre polie à 40 Å près (si la terre était aussi sphérique ses plus hautes montagnes culmineraient à 2 m de hauteur !), refroidie à -271 °C, maintenue en lévitation et entraînée par un jet d'hélium 3 gazeux superfluide. La mesure de la position de l'axe du gyromètre se fait par un détecteur quantique, le SQUID (Super Quantum Interference Device), capable de mesurer un champ magnétique de 5×10^{-14} gauss, ce qui correspond à un dix millième de milliardième de fois le champ magnétique terrestre.



d'améliorer la mesure. La seconde cible choisie a été Mars, ou plutôt la sonde Mariner, que les américains avaient déposée sur cette planète. L'effet calculé était de 250 millièmes de seconde sur une durée de trajet aller-retour de trois quart d'heure, il a été vérifié cette fois (en 1970) avec une précision de 3 %. D'autres expériences se sont poursuivies ; écho sur Mercure (1970 ; 5 % de précision) ; écho sur Mars (1972 ; 2 % de précision), puis finalement écho sur la sonde Viking qui avait été déposée sur Mars. Lors de cette dernière expérience la précision a atteint la valeur extraordinaire de 0,1 % grâce à la détermination de la distance Terre-Mars à 7,5 mètres près (on sait mesurer actuellement la distance Terre-Lune à quelques millimètres près grâce à des échos laser).

Ondes gravitationnelles

Les équations d'Einstein de la relativité générale prévoient l'existence d'ondes gravitationnelles, de la même façon que les équations de Maxwell de l'électromagnétisme imposaient l'existence d'ondes électromagnétiques. Mais alors que les ondes électromagnétiques ont été mises en évidence par Hertz « seulement » vingt ans après l'établissement des équations de Maxwell, la recherche des ondes gravitationnelles fait encore l'objet d'une intense activité. De la même façon que les ondes électromagnétiques sont créées par des charges en mouvement, les ondes gravitationnelles sont créées par des objets dont la masse change de forme ou se déplace.

Le principe de la détection est simple. Considérons un cylindre de matière, lorsqu'une onde gravitationnelle passe à travers cet objet dans une direction perpendiculaire à son axe, il se produit un effet de marée qui attire, puis éloigne les deux extrémités du cylindre, une oscillation s'en suit. La première tentative de détection a été faite par Joseph Weber en 1965 avec un cylindre en aluminium de 50 cm de diamètre et de 2 mètres de long, mais sans succès. Il faut dire que l'effet est pour le moins ténu : l'effondrement d'une étoile en trou noir dans notre galaxie (événement violent, mais rarissime) entraîne un allongement relatif de la barre de un cent millièmes de milliardième (10^{-17}), ce qui revient à mesurer le rayon terrestre à ... un atome près ! Un tel challenge n'est pas de nature à décourager les physiciens, au contraire ! La mise en œuvre de la détection a simplement évolué. Elle consiste à réaliser un interféromètre de Michelson dont chaque bras a ... quelques kilomètres de long, et de détecter des changements dans la position des franges d'interférence induits par le passage d'une onde gravitationnelle. Plusieurs réalisations sont finalisées ou en cours. L'expérience LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) aux États-Unis est constituée de deux interféromètres, l'un situé à Hanford, dans l'état



de Washington, l'autre à Livingstone en Louisiane. Si une onde gravitationnelle en provenance de notre galaxie ou d'au-delà est interceptée, elle impactera naturellement les deux interféromètres simultanément, tandis que si un évènement « terrestre » (passage d'un camion ou autre) affecte l'un des interféromètres il ne pourra pas affecter l'autre situé à plus de 3000 km de distance ! Ainsi, cette technique de corrélation entre les deux instruments permet de réduire considérablement les fausses alarmes. LIGO est opérationnel, et des mesures sont en cours. Une autre expérience, franco-italienne cette fois, répondant au nom de Virgo, est également prête : les premières observations débiteront au début de 2005. Un instrument anglo-allemand (GEO 600) et un autre japonais (TAMA 300) ont également été réalisés et un interféromètre australien est en projet.

Quelles sont les performances exceptionnelles de ce type d'instrument ? Dans le cas de VIRGO, la sensibilité atteint 10^{-23} , valeur extraordinaire puisque c'est par exemple le rapport entre la dimension d'un atome et 100 fois la distance Terre-Soleil ! Les bras de l'interféromètre ont une longueur de 3 km, ils sont constitués d'un tube de 1 mètre de diamètre dans lequel on fait un vide poussé (mieux que un dix milliardième de fois la pression atmosphérique). Grâce au repliement du faisceau laser, tout se passe comme si chaque bras avait une longueur de 150 km. L'isolation sismique est meilleure que un pour un milliardième, etc.

Les équipes de recherche, associées aux interféromètres mentionnés plus haut, coopèrent étroitement et fonctionnent en réseau, alors gageons que la détection directe des ondes gravitationnelles n'est plus très loin. Il n'est pas impossible d'espérer la détection d'une onde gravitationnelle en 2005, pendant l'année mondiale de la physique, 100 ans après la naissance de la relativité restreinte et 90 ans après la relativité générale !

Une telle confiance est permise car les ondes gravitationnelles existent ! Elles ont été mises en évidence en 1974 et leurs découvreurs, Joseph Taylor et Russel Hulse, récompensés par le prix Nobel de physique 1993. Hélas, la détection n'a été qu'indirecte et le libellé du Nobel mentionne simplement qu'il récompense « *la découverte d'un nouveau type de pulsar, découverte qui a ouvert de nouvelles possibilités pour l'étude de la gravitation* ». Les pulsars sont des étoiles à neutron en rotation rapide (période 0,01 seconde à quelques secondes) qui ont été découvertes tardivement, en 1967. Le « nouveau type de pulsar » de Taylor et Hulse est en fait un pulsar double répondant au doux nom de PSR 1913 + 16. Il s'agit de deux pulsars de taille semblable orbitant l'un autour de l'autre (l'un a une masse égale à $1,4 M_{\odot}$, où M_{\odot} désigne la masse solaire,



l'autre de $1,42 M_{\odot}$). C'est donc comme un système solaire simplifié, l'un des pulsars pouvant être assimilé au Soleil, l'autre à une planète. Toutefois, dans ce cas, la période de révolution orbitale est de 7h75 (27 906,98163 s exactement !) et la période intrinsèque de 0,05902 999 5271 s (le pulsar, dont la masse est plus grande que celle du Soleil, tourne autour de lui-même en $1/20^{\text{e}}$ de seconde !). Voilà bien des objets de masse significative qui ont un mouvement rapide, donc ils doivent émettre des ondes gravitationnelles, perdre de l'énergie et il doit s'en suivre une diminution de la période orbitale. L'application des équations de la relativité générale prévoit que l'émission d'ondes gravitationnelles entraîne une diminution de cette période de 75 millièmes de seconde par an et la mesure donne 76 ± 2 millièmes de seconde par an ! L'accord est total.

LISA

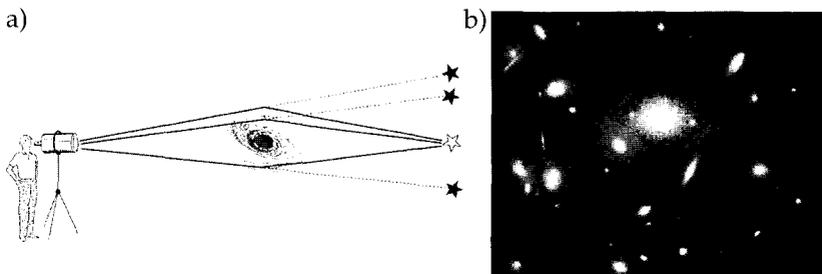
LISA (Laser Interferometer Space Antenna) est un projet d'envergure lancé par l'Agence Spatiale Européenne (ESA) en collaboration avec la NASA. Cet interféromètre spatial est constitué de trois satellites placés sur un triangle équilatéral dont le coté (le bras de l'interféromètre) a ... 5 millions de kilomètres ! Le passage d'une onde gravitationnelle provoque un très faible mouvement relatif entre ces satellites. Ce mouvement étant infinitésimal, il faut pouvoir mettre en évidence une variation relative de l'un des « bras de l'interféromètre » aussi faible que 10^{-11} m (un cent millièmes de millimètre !) sur une distance de 5 millions de km (la longueur des bras de l'interféromètre est mesurée à 10 mètres près, mais les variations de cette longueur doivent être déterminées à un cent millième de millimètre près, soit un dixième de la taille d'un atome). LISA permettra de mesurer la partie basse fréquence du spectre d'ondes gravitationnelles (de 0,1 Hz à 0,1 mHz). Les mesures obtenues seront donc complémentaires de celles faites par les interféromètres « terrestres » de détection d'ondes gravitationnelles VIRGO et LIGO (qui mesurent la partie haute fréquence du spectre, de quelques Hz à quelques kHz). Le lancement de LISA est prévu pour 2012.

Expérience LISA pour
la détection
des ondes
gravitationnelles.
© NASA.



Mirages gravitationnels

On sait l'origine des mirages. Prenons, par exemple, le cas d'une route asphaltée exposée aux rayons ardents du Soleil. La température est plus chaude au sol qu'à 1 ou 2 mètres au-dessus. Le gradient de température induit un gradient d'indice, et les rayons lumineux en provenance du ciel bleu s'incurvent par suite de la loi de Descartes. L'observateur pense que la lumière, se propageant en ligne droite, provient du sol. Il voit donc le ciel bleu dans le sol et pense qu'il s'agit d'une flaque d'eau. C'est le mathématicien français Gaspard Monge, lors de l'expédition d'Égypte de Bonaparte, qui a le premier compris l'origine de ce phénomène qui est finalement dû à une déviation des rayons lumineux. L'observation faite, en 1919, de la déviation des rayons lumineux par le champ de gravitation produit par le Soleil a conduit le physicien anglais Oliver Lodge à imaginer un processus de même nature que les mirages. Cette fois, ce n'est pas le gradient de température qui courbe les rayons, mais une masse importante : les mirages gravitationnels sont nés ! Einstein et Zwicky, en 1936, se sont penchés plus en détail sur la question qui restait, à cette époque, purement théorique. Ce n'est qu'en 1979 que le premier mirage gravitationnel sera observé. La découverte tire à nouveau son origine de l'étude des quasars. Cette année-là, des astronomes de l'observatoire de Kitt Peak, en Arizona, découvrent sur un cliché deux quasars jumeaux ! Ils comprennent rapidement que ces deux quasars n'en sont qu'un seul. Les rayons de lumière du quasar situé au fin fond de l'Univers avaient dû être déviés par une galaxie ou un amas de galaxie situé entre le quasar et la Terre. La lumière pouvait donc emprunter des chemins différents et à l'arrivée ce n'est pas une image, mais deux, qui s'inscrivaient sur le cliché. En fait, suivant la configuration relative du quasar, de la galaxie « lentille » et de la Terre, il y a une infinité de possibilité de déformation de l'image. On peut observer plusieurs images, ou un arc (*arc d'Einstein*) ou même un anneau (*anneau d'Einstein*). L'observation de mirage gravitationnel a d'abord été lente ; une dizaine seulement était recensée en 1985, une quinzaine en 1988, une vingtaine en 1993, mais maintenant les mirages gravitationnels sont monnaie courante. Ils sont même devenus un outil



(a) Lentille gravitationnelle : un observateur regarde un quasar très éloigné de la Terre. La lumière envoyée par le quasar est courbée par le champ de gravitation d'une galaxie interposée entre le quasar et la Terre et semble provenir d'une autre direction : on observe donc plusieurs images du même objet. (b) Mirage gravitationnel. © NASA.



de recherche en astrophysique, car à partir des observations faites et en utilisant les lois de la relativité générale, on peut en déduire des informations précieuses sur les lentilles gravitationnelles que sont les galaxies et amas de galaxies.

La relativité au service de la cosmologie

Einstein, père de la cosmologie scientifique

On peut conférer à Einstein le titre de « père de la cosmologie scientifique ». En effet, non seulement la relativité générale permet d'appréhender l'Univers dans son ensemble, mais de plus, en écrivant dès 1917 ses « *considérations cosmologiques sur la relativité générale* », Einstein a signé le premier article du domaine. Einstein a conscience de l'aspect novateur, pour ne pas dire frondeur, de son article. Il écrit à son ami Paul Ehrenfest qu'il a « *de nouveau commis quelque chose sur la théorie de la gravitation qui lui fait quelque peu risquer l'internement à l'asile* ». Il est effectivement le premier à imaginer un Univers fini (mais sans limite) : son Univers à la géométrie d'une « hypersphère », s'il n'avait que deux dimensions, il serait analogue à une sphère car de courbure positive, finie et sans limite. Bien qu'Einstein indique dans son article fondateur que « *le caractère courbe de l'espace varie dans le temps et dans l'espace en fonction de la distribution de matière* », il est amené, pour différentes raisons, à faire l'hypothèse que l'Univers est immuable, statique. Ainsi, l'Univers d'Einstein ressemble-t-il à celui d'Aristote ! Pourtant, les équations de la relativité générale ne conduisent pas à ce schéma, Einstein est donc obligé de les modifier, il ajoute un terme, mathématiquement permis par la théorie, qui permet d'aboutir à un Univers invariable dans le temps. Ce terme, le prix à payer pour un Univers éternel, c'est la fameuse constante cosmologique. Le principe est très simple : la matière est en attraction mutuelle à cause des forces de gravitation, ceci doit être compensé par un terme répulsif, qui n'est sensible qu'à l'échelle de l'Univers (sinon il aurait déjà été identifié), afin d'aboutir à une situation immuable. Einstein dira plus tard que l'introduction de la constante cosmologique a été la plus grande erreur scientifique de sa vie. Pas sûr ! Car cette constante réapparaît dans les modèles actuels comme nous le verrons plus bas. En cette même année 1917, l'astronome Willem De Sitter donne une autre solution cosmologique aux équations de la relativité générale. Il suppose que la densité de matière est nulle et que la courbure de l'espace est due à la constante cosmologique. Dans cet Univers, deux points, disons deux étoiles (rappelons qu'en 1917 on





Einstein et l'abbé
Lemaître.
© « Archives
Lemaître ».
Université catholique
de Louvain. Institut
d'Astronomie et de
Géophysique
G. Lemaître.
Louvain-la-Neuve.
Belgique.

ignore qu'il existe d'autres galaxies que la nôtre) se séparent l'une de l'autre sous l'effet d'une dilatation générale produite par la constante cosmologique. De Sitter va même jusqu'à imaginer que les raies spectrales des étoiles éloignées doivent être décalées vers le rouge, mais il ne franchira pas le pas qui aurait pu le mener à l'introduction d'un Univers en expansion, car pour lui, comme pour Einstein, l'Univers est essentiellement statique. C'est un jeune physicien russe, Alexandre Friedmann, qui franchit ce pas. Il ose imaginer, en 1922, un Univers non statique qu'il présente ainsi : « *Le type d'Univers variable engendre une famille beaucoup plus générale de modèles : dans certains cas, le rayon de courbure de l'Univers part d'une certaine valeur et augmente constamment au cours du temps ; dans d'autre cas, le rayon de courbure varie de façon périodique, l'Univers se contractant en un point puis, à partir de ce point, augmentant de rayon jusqu'à une certaine valeur maximale, puis diminuant à nouveau pour redevenir un point, et ainsi de suite.* » Cette phrase aurait pu être écrite en 2005, on y aurait alors trouvé le vocabulaire contemporain de « Big Bang » pour marquer l'origine de l'expansion et de « Big Crunch » pour marquer l'éventuel point de recontraction. Friedmann, fort de son modèle, va même jusqu'à calculer l'âge de l'Univers et trouve « *quelques dizaines de milliards de nos années actuelles* » ce qui est tout à fait remarquable lorsque l'on sait qu'à l'époque où il écrivait ces lignes on donnait à la Terre un âge qui n'excédait pas le milliard d'années (on pense actuellement que l'âge de la Terre est de 5 milliards d'années et que celui de l'Univers est d'environ 14 milliards d'années). Malheureusement, Friedmann meurt brutalement en 1925 et ne connaîtra pas les succès obtenus par sa théorie. Einstein s'oppose d'abord au modèle de Friedmann, puis admet qu'il ne comporte pas d'erreur, tout en restant convaincu que l'Univers n'a pas d'origine temporelle. C'est un abbé belge, Georges Lemaître, qui va être le continuateur de Friedmann. Comme ce dernier, mais de façon indépendante, il montre que les équations de la relativité générale ont des solutions qui conduisent à un Univers non statique. Mais Lemaître va plus loin. Il a en effet fait un premier séjour à Cambridge chez



l'astronome Arthur Eddington, qui écrivait, dès 1922 : « *L'un des problèmes les plus mystérieux en cosmologie sont les grandes vitesses de nombreuses nébuleuses. Leurs vitesses radiales sont de l'ordre de 600 km/s, et la majorité des nébuleuses s'éloigne du système solaire* ». Lemaître a fait ensuite un second séjour à Boston au MIT (Massachusetts Institute of Technology) chez Vesto Slipher et Edwin Hubble. Hubble comprend en 1925 que les nébuleuses spirales ne sont autres que des galaxies et Slipher met en évidence un décalage vers le rouge des raies émises par ces galaxies. Lemaître voit dans ces observations les indices d'un Univers en expansion, c'est ainsi qu'il est amené à écrire en 1927 un article décrivant « *Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant, rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques* ». Il va même jusqu'à calculer la vitesse d'expansion qu'il trouve égale à « *625 km/s à 1 million de parsec⁴* ». Pour l'abbé Lemaître, il y a une relation de proportionnalité entre la distance des objets cosmiques et leur vitesse d'éloignement (ce que l'on appelle la vitesse de récession). Einstein séjourne à Bruxelles en octobre 1927 pour participer au très célèbre cinquième Conseil Solvay. Il en profite pour rencontrer Lemaître, et le félicite pour ses calculs, tout en lui indiquant que ses idées lui paraissent « *tout à fait abominables* »⁵. Einstein lui signale, par ailleurs, l'existence des travaux de Friedmann, dont Lemaître ignorait l'existence, mais qu'il citera de façon systématique à partir de ce moment-là. Ce n'est que deux ans plus tard, qu'Edwin Hubble énoncera la loi qui porte son nom indiquant la proportionnalité entre vitesse de récession des galaxies et leur distance. La constante de proportionnalité (« constante de Hubble ») est identique à celle qu'avait donnée Lemaître en 1927 ! Notre abbé ne s'arrête pas en si bon chemin puisqu'en 1931 il publie deux articles dans lesquels il décrit son hypothèse de l'atome primitif et où se trouvent tous les ingrédients de ce que l'on appelle à présent la théorie du « Big Bang ». Voici comment Lemaître, en 1931, décrit sa théorie : « *Nous pouvons concevoir que l'espace a commencé avec l'atome primitif et que le commencement de l'espace a marqué le commencement du temps. Le rayon de l'espace est parti de zéro ; les premiers stades de l'expansion ont consisté en une expansion rapide déterminée par la masse de l'atome initial, égale à peu près à la masse actuelle de l'Univers... L'expansion s'est donc faite en trois phases : une première période d'expansion rapide où l'atome-univers s'est brisé en atomes-étoiles, une période de*

⁴ Le parsec (pc) est une unité de longueur très utilisée en astronomie. 1 parsec est la distance à laquelle le rayon de l'orbite terrestre est vu sous un angle d'une seconde. $1 \text{ pc} = 3,26 \text{ années lumière} = 3 \times 10^{16} \text{ m}$.

⁵ Lemaître a lui même commenté cette rencontre de la façon suivante : « *En se promenant dans les allées du parc Léopold, Einstein me parla d'un article, peu remarqué, que j'avais écrit l'année précédente sur l'expansion de l'Univers et qu'un ami lui avait fait lire. Après quelques remarques techniques favorables, il conclut en disant que du point de vue physique cela lui paraissait tout à fait abominable.* »



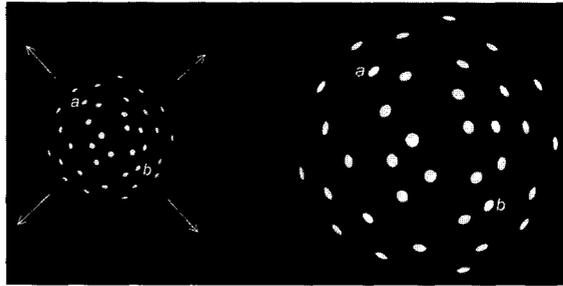
ralentissement, suivie d'une troisième d'expansion accélérée. C'est sans doute à cette troisième période que nous nous trouvons maintenant... Il est probable que l'expansion ne sera pas suivie d'une contraction. Dans ce cas nous ne devons plus nous attendre à rien de sensationnel : les soleils se refroidiront, cendres et fumées du feu d'artifice originel achèveront de se refroidir et de se disperser. » On peut mesurer, dans ces phrases, à quel point Georges Lemaître a été visionnaire. Il reprend ses idées, en 1945, dans un ouvrage intitulé *L'hypothèse de l'atome primitif. Essai de cosmogonie* mais ses idées ne sont pas dans l'air du temps. Une théorie alternative, dite de « l'état stationnaire », est en passe de triompher (momentanément). Son principal promoteur est Fred Hoyle. Il décrit en 1948 un Univers invariable dans le temps (« stationnaire ») dans lequel l'effet de dilution, dû à la fuite des galaxies, est compensé par une création spontanée et continue de matière. Ce modèle de « création continue » est donc opposé à celui de « l'atome primitif ». Lors d'une réunion scientifique qui se tient en 1960, Fred Hoyle accueille Georges Lemaître en disant « *Tiens voici l'homme du Big Bang* » ! Hoyle utilise ce terme par dérision, mais il sera repris par George Gamov, ancien étudiant d'Alexandre Friedmann, et deviendra le symbole moderne de la cosmologie standard. Gamov complète le modèle de Lemaître par un élément très important : à l'origine l'Univers n'étant pas seulement très petit, il était également très chaud. Cette température très élevée a permis de synthétiser les éléments hydrogène, hélium, lithium, carbone, oxygène, etc. qui font aujourd'hui la richesse de l'Univers (en fait, seuls les éléments légers ont été créés au début de l'Univers, mais nous y reviendrons). Par ailleurs, Gamov a imaginé que lors de son refroidissement l'Univers est passé par une phase où les photons se sont « découplés » de la matière, ils n'avaient plus assez d'énergie pour disparaître en ionisant l'hydrogène (on sait maintenant que cela s'est passé environ 300 000 ans après le Big Bang). À cet instant, l'Univers avait une température d'environ 3000 K⁶ et le rayonnement était celui d'un corps noir (voir chapitre 7) à cette température. Du fait de l'expansion, le volume occupé par ces photons « cosmiques » a augmenté et l'effet de dilution a fait baissé la température. Gamov a calculé que la température de ce rayonnement fossile devait maintenant être d'environ 5 K. En 1965, Arno Penzias et Robert Wilson qui réglaient une antenne d'un radiotélescope ont découvert un bruit de fond correspondant à un rayonnement millimétrique qui était indépendant de tous les paramètres de réglage. De plus, lors du fonctionnement de l'antenne, ils ont constaté que le signal enregistré avait la même intensité quelle que soit la direction de pointage de l'antenne, quelle que soit l'heure de l'enregistrement (jour ou nuit), et quelle que soit la période dans l'année (hiver ou été). L'origine de ce « bruit de fond » est

⁶ 1 K = 273,15 °C (équivalence degré Kelvin – degré Celsius).



À cause de l'expansion de l'Univers deux galaxies (a et b) s'éloigneront d'autant plus rapidement l'une de l'autre qu'elles seront éloignées. C'est la loi de Hubble : la vitesse de récession des galaxies est proportionnelle à leur distance. Une analogie simple permet de comprendre le phénomène : si l'on marque deux points sur un ballon de baudruche, lorsqu'on gonfle le ballon on observe facilement que les deux points s'éloigneront d'autant plus l'un de l'autre qu'ils sont éloignés.

visiblement d'origine extragalactique et sera rapidement interprété, par les physiciens Robert Dicke et James Peebles, comme étant le rayonnement fossile prédit par Gamov. Lemaître, qui avait de son côté imaginé un « *éclat disparu de la formation des mondes* », sera informé quelques jours avant sa mort de cette découverte.



Big Bang : la preuve par trois

Le Big Bang est maintenant le modèle standard de la cosmologie contemporaine, en un mot son paradigme. Trois éléments essentiels viennent en effet le corroborer : le décalage spectral vers le rouge, le rayonnement fossile et l'abondance des éléments légers.

Nous avons déjà parlé du décalage spectral vers le rouge : plus un objet cosmique (galaxie, amas de galaxie, quasar) est éloigné, plus sa vitesse de récession est importante (loi de Hubble) et plus les photons des raies spectrales émises par ce corps sont décalés vers les grandes longueurs d'onde. Tout ceci peut s'exprimer très simplement : appelons H la constante de Hubble et V la vitesse de récession d'une galaxie située à une distance D , la loi de Hubble s'écrit $V = H \times D$. Si, par ailleurs, on appelle f_e la fréquence d'émission d'une raie spectrale sur la galaxie et f_r la fréquence de réception de cette raie sur terre⁷, alors

le décalage spectral est défini par la quantité $z = \frac{f_e - f_r}{f_r} = \frac{f_e}{f_r} - 1$. La vitesse

de récession est reliée très directement à z par la relation $z = V/c$, où c désigne la vitesse de la lumière (dans le cas relativiste la relation

devient $1 + z = \sqrt{\frac{1 + V/C}{1 - V/C}}$). Les astronomes repèrent maintenant les

galaxies et autres objets cosmiques directement par la valeur de leur décalage z qui mesure à la fois un éloignement dans l'espace et dans le

⁷ La fréquence f est reliée à la longueur d'onde par la relation $\lambda f = c$.

temps. Cela permet de s'affranchir de la valeur de la constante de Hubble (H) qui n'est pas connue précisément. La valeur actuellement admise pour H est de 71 km/s/Mpc (km par seconde et par million de parsec). Elle est à comparer à celle donnée à la fin des années 20 par Lemaître et Hubble d'environ 600 km/s/Mpc. On admet que la constante de Hubble est connue actuellement à 5 % près : sa valeur conduit à un âge de l'Univers de 13,7 milliards d'années. La question qui a fait pendant très longtemps l'objet de débat est naturellement de savoir si le décalage vers le rouge n'est pas attribuable à une autre cause que l'expansion de l'Univers. Des hypothèses ont été avancées mais aucune autre que celle de l'expansion ne peut rendre compte d'une propriété spécifique observée : ce décalage est identique quelle que soit la longueur d'onde d'émission, des ondes radio aux rayons X.

Nous avons également évoqué la découverte, en 1965, par les astrophysiciens Arno Penzias et Robert Wilson d'un rayonnement cosmique fossile micro-onde. La température de ce rayonnement est de 2,73 K (soit environ -270 °C), c'est-à-dire une valeur très proche de la première estimation théorique donnée par Gamov. La NASA a lancé, en 1989, le satellite COBE (COsmic Background Explorer) de façon à mesurer avec précision les propriétés du rayonnement fossile. Les résultats obtenus ont montré que le CMB (Cosmic Microwave Background) a un spectre de corps noir parfait, de température de $2,725 \pm 0,002$ K, de plus il est isotrope (c'est-à-dire identique dans toutes les directions). Le rayonnement doit être isotrope, mais pas trop, sinon comment expliquer les grandes structures de l'Univers telles que les amas de galaxies ? Heureusement, les enregistrements faits par COBE laissent apparaître des fluctuations de température de corps noir d'un point à un autre, certes très faibles (un cent millième) mais compatibles avec les observations de l'Univers actuel. Il était toutefois nécessaire d'approfondir ce point car la résolution spatiale de COBE n'était pas suffisante pour conclure définitivement. Plusieurs expériences sont venues compléter nos connaissances sur ce sujet et d'autres sont planifiées dans un proche avenir. En 2002, l'expérience BOOMERANG (Ballon Observations Of Millimetric Extragalactic Radiation ANd Geophysics), qui a permis d'avoir une résolution 40 fois supérieure à celle de COBE (mais sur une portion de ciel plus petite), a confirmé que les fluctuations observées dans le fond cosmique galactique sont bien compatibles avec les observations de l'Univers actuel. Plus récemment encore (2003), la mission WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, du nom de David Wilkinson, un pionnier dans l'étude du CMB), après deux ans d'observation, a affiné les résultats obtenus par COBE et BOOMERANG. La sensibilité de WMAP est impressionnante puisqu'elle atteint 20 millièmes de degré Celsius et une résolution spatiale de $0,3^\circ$. D'autres projets, comme Planck (en hommage



naturellement à Max Planck qui a été le premier à donner la loi du corps noir), encore plus ambitieux sont prévus très prochainement (lancement programmé en 2007).

Un troisième fait milite en faveur de la théorie du Big Bang. Il s'agit de la nucléosynthèse des éléments légers, c'est-à-dire tout simplement de leur origine. Les éléments tels que le deutérium, l'hélium 3 ou le lithium 7 n'ont pas pu être synthétisés dans les étoiles. Leur origine remonte au tout début de l'Univers, lorsque celui-ci avait une température de quelques milliards de degrés. On peut constater que l'abondance calculée à partir du modèle du Big Bang coïncide avec les observations astrophysiques. Il faut d'ailleurs souligner que l'abondance prédite par la théorie du Big Bang repose sur des résultats très récents obtenus en physique des particules : elle est liée au nombre de famille de leptons et de quarks, nombre égal à trois (voir chapitre 4). Ainsi, l'infiniment grand (la cosmologie) rejoint l'infiniment petit (la physique des particules). Un siècle après l'année miraculeuse de 1905, on ne peut qu'être admiratif devant les travaux d'Einstein qui se trouvent être à la fois à l'origine de la cosmologie et à celle des premières théories du monde microscopique (atome et quanta).

Les trois premières minutes de l'Univers

Le titre de ce paragraphe est emprunté au célèbre livre de Steven Weinberg. Ce physicien illustre, prix Nobel de physique, est le premier, en 1976, à avoir popularisé la genèse de l'Univers. Les travaux de Weinberg sont associés à la physique de l'infiniment petit, mais comme il l'indique lui-même dans la préface de son livre : « *C'est au commencement de l'Univers, et en particulier durant le premier centième de seconde, que s'effectue la liaison entre la théorie des particules élémentaires et la cosmologie* ». La physique de l'infiniment petit et celle de l'infiniment grand se retrouvent dans ce moment privilégié au point que la cohérence des modèles de genèse de l'Univers est un excellent (et redoutable) test pour les théories élaborées en physique des particules. Nous donnons ci-dessous une image très simplifiée des principales étapes qui semblent avoir conduit l'Univers du point chaud initial à la structure que nous pouvons observer maintenant.

Première période

Elle commence 10^{-43} s après le Big Bang, c'est ce que l'on appelle le temps de Planck (voir encadré « L'échelle de Planck »). Nous ne connaissons rien de sûr de la physique en œuvre (voir encadré « Avant le Big Bang ») avant cet instant (et, avouons le, pas grand chose de ce



L'échelle de Planck

Max Planck a introduit en 1899 un système d'unités naturel, ne reposant que sur les constantes fondamentales de la physique. Selon ses propres termes : « À l'aide des deux constantes a et b , on a la possibilité de poser des unités de longueur, de masse, de temps et de température qui peuvent donc être qualifiées d'unités de mesure naturelles. Les moyens d'établir les quatre unités de longueur, masse, temps et température, sont donnés par les deux constantes mentionnées, a et b , ainsi que par la valeur de la vitesse de la lumière dans le vide, c , et par la constante de gravitation f ». Les constantes a et b mentionnées par Planck sont directement reliées aux constantes h et k c'est-à-dire à la constante de Planck, h , dont Einstein donnera la signification physique (voir chapitre 7) et la constante de Boltzmann k , directement reliée à la notion d'atomes (voir chapitre 4). La constante a est égale à h/k et b est égale à h . En notation actuelle (on utilise G comme symbole de la constante de gravitation), les unités de Planck s'expriment de la façon suivante :

$$\begin{aligned} \text{Temps de Planck } t_p &= (hG/c^5)^{1/2} \# 10^{-43} \text{ s} \\ \text{Longueur de Planck } l_p &= (hG/c^3)^{1/2} \# 4 \cdot 10^{-35} \text{ m} \\ \text{Température de Planck } T_p &= h/k (c^5/hG)^{1/2} \# 3 \cdot 10^{32} \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{Masse de Planck } M_p &= (hc/G)^{1/2} \# 5 \cdot 10^{-8} \text{ kg} \end{aligned}$$

Avant le Big Bang

Avant le Big Bang, la gravitation elle-même est quantifiée. Les deux approches les plus porteuses pour cette nouvelle physique sont la gravitation quantique à boucles et la théorie des cordes. En gravitation quantique, l'espace-temps est granulaire. En théorie des cordes, les composants fondamentaux de la matière ne sont plus des particules mais de minuscules cordes sans masse. Ce sont les différents modes de vibration de ces cordes qui permettent de retrouver la vision classique des particules et de leurs interactions. L'espace-temps a alors 11 dimensions : parmi les 10 dimensions spatiales, sept sont repliées et ne sont pas observables. L'application de la théorie des cordes à la cosmologie conduit à un scénario pré Big Bang dans lequel l'Univers antérieur au Big Bang est une image miroir de l'Univers postérieur au Big Bang. Il existe un autre modèle, dit *ekpyrotique* (du grec conflagration) dans lequel notre Univers est une membrane multidimensionnelle (on dit une *brane*) ; le Big Bang résulterait de la collision entre deux branes. Ces différents modèles (y compris le scénario de l'inflation, que l'on pourrait presque qualifier de classique) pourraient subir le verdict



de l'expérience dans un avenir proche car ils prédisent des spectres d'émission d'ondes gravitationnelles primordiaux différents. Or, d'une part, ces ondes gravitationnelles entraînent une certaine polarisation du CMB, ce qui pourra être mesuré par le satellite Planck, d'autre part, le spectre de ces ondes pourrait être mesuré en partie sur terre (grâce aux interféromètres LIGO et VIGO), d'autre part dans l'espace (grâce à la mission LISA).

qui se passe immédiatement après). Les quatre interactions (gravitation, électromagnétisme, interaction forte et interaction faible) n'en faisaient alors probablement qu'une, le temps lui-même n'était pas un paramètre continu, mais discret, quantifié. On pense que la taille de l'Univers 10^{-43} s après le Big Bang, n'était que de quelque 10^{-35} m, c'est-à-dire égal à la longueur de Planck, longueur parcourue par la lumière pendant une durée égale au temps de Planck. C'est vraiment très petit : cent milliards de milliards de fois plus petit que la dimension d'un noyau atomique (et dix millions de milliards de fois plus petit que la plus petite dimension que nous savons étudier à l'heure actuelle). La température, en revanche, y était très élevée, de l'ordre de 10^{32} K (soit cent mille milliards de milliards de milliards de degrés !). Deux interactions seulement étaient en œuvre : la gravitation et l'interaction de grande unification (qui regroupe électromagnétisme, interaction forte et interaction faible). L'énergie des particules hypothétiques de cette ère était en conséquence : 10^{19} GeV, c'est-à-dire dix millions de milliards de fois supérieure à ce que l'on sait faire dans les plus grands accélérateurs de particules du monde.

Deuxième période

Elle débute 10^{-36} s après le Big Bang. L'Univers mesure environ 10^{-28} m, sa température est voisine de 10^{28} K, ce qui correspond à une énergie de 10^{15} GeV. Il se produit alors une brisure de symétrie (voir chapitre 8) qui sépare l'interaction de grande unification en deux : l'interaction forte d'une part, l'interaction électrofaible d'autre part. Cette brisure de symétrie serait intervenue immédiatement après un phénomène bien particulier : l'inflation. L'inflation correspond à une expansion colossale de l'Univers qui aurait eu lieu entre 10^{-35} et 10^{-32} s, sa taille aurait augmenté dans un rapport 10^{20} à 10^{30} : ainsi l'expansion produite dans ce très court instant (10^{-32} s) aurait-elle été supérieure à celle observée depuis lors (soit environ 14 milliards d'années !). On peut se poser la question de savoir d'où vient la nécessité d'introduire une telle hypothèse inflationniste. La réponse est que, sans cette hypothèse, une énorme quantité de monopôles magnétiques devrait être observable et que ... aucun n'a encore été observé ! Sans l'inflation, on commet une



erreur d'un facteur égal à un million de milliards sur la densité de monopôle prédite. Aussi, pour certains, l'hypothèse de l'inflation apparaît donc comme une hypothèse *ad hoc* permettant de concilier la cosmologie avec la physique des particules. Il est vrai que notre connaissance de la physique en œuvre à ce stade du développement de l'Univers est très spéculative. Le recours à des hypothèses est obligatoire et la confiance ne peut venir que de la cohérence de la théorie. L'observation n'est toutefois pas complètement hors de portée. La violence des phénomènes en jeu a dû générer une grande quantité d'ondes gravitationnelles, dont on peut espérer aujourd'hui observer les résidus. Tout comme les photons du fond cosmique, ces ondes gravitationnelles possèdent un certain spectre, que l'on pourra étudier en partie grâce à l'interféromètre spatial LISA (voir encadré de la page 120). Les ondes pouvant être détectées auraient été émises seulement 10^{-15} s après le Big Bang, ce qui constituerait la plus vieille photo de l'Univers jamais réalisée !

Troisième période

Après cette éventuelle inflation, l'Univers ressemble à une soupe faite de quarks et d'anti-quarks. La troisième période s'enclenche 10^{-12} s après le Big Bang. La température de l'Univers « n'est plus » que de 10^{16} K (cela correspond à une énergie de 10^3 GeV), ce qui est l'ordre de grandeur de l'énergie accessible par les plus grands accélérateurs de particules. Il se produit alors une seconde brisure de symétrie qui sépare cette fois l'interaction électrofaible en deux : l'interaction faible d'une part, l'interaction électromagnétique d'autre part. On commence à retrouver le domaine de la physique établie.

Quatrième période

La température continue de chuter : en début de quatrième période, 10^{-6} s (une microseconde) après le Big Bang, il ne fait plus que 10^{13} K (c'est-à-dire tout de même dix mille milliards de degrés), ce qui correspond à une énergie d'environ 1 GeV et donc aux transitions quark \rightarrow hadron. Les quarks cessent d'être libres, ils s'assemblent pour donner des particules lourdes, en particulier des neutrons et des protons (rappelons que l'énergie de masse d'un neutron ou d'un proton est un peu inférieure au GeV). La matière est en très léger excédent (une partie pour un milliard) par rapport à l'anti-matière.

Cinquième période

Elle apparaît 0,01 s après le Big Bang. L'Univers continue à croître rapidement (sa taille double tous les deux centièmes de seconde), la température (qui est inversement proportionnelle à sa taille) décroît et



passer en dessous des 100 milliards de degrés. Les nucléons (neutrons et protons) sont stables (l'énergie n'est plus suffisante pour les casser), l'Univers est dominé par les leptons (électrons, positrons, neutrinos) en équilibre thermique avec les nucléons ($n + \bar{\nu}_e \rightarrow p^+ + e^-$). On se trouve dans l'ère leptonique (il n'y a environ qu'un nucléon pour un milliard de leptons), et le nombre de protons est sensiblement équivalent à celui des neutrons.

Sixième période

Elle commence un dixième de seconde après le Big Bang, la température est de 30 milliards de degrés (c'est-à-dire une énergie de 3 MeV), les leptons continuent à être en équilibre, toutefois à mesure que la température baisse, les protons (moins massifs que les neutrons) prennent le dessus car la réaction $n \rightarrow p^+$ est plus probable que la réaction inverse $p^+ \rightarrow n$.

Septième période

Nous sommes une seconde après le Big Bang, la température est de 10 milliards de degrés, l'énergie d'agitation moyenne est de 1 MeV, elle correspond au découplage des neutrinos. Ces derniers poursuivent maintenant librement leur chemin, on peut donc espérer les détecter car ils forment un fond cosmique ayant une température voisine de 2 K (-271 °C). Le satellite Planck, dont il a été déjà question, relèvera peut être le défi dès 2007. On observerait alors l'Univers tel qu'il était 1 s après le Big Bang !

Huitième période

Lorsque la température chute en dessous de 3 milliards de degrés (soit 0,3 MeV), 15 s après le Big Bang, les électrons et les positrons ne peuvent plus être matérialisés et disparaissent rapidement. Les éléments légers commencent à se former (nucléosynthèse) : $n + p \rightarrow D + \gamma$; $D + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$; ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p$. Les neutrons continuent à perdre du terrain : il y avait 24 % de neutrons contre 76 % à la période précédente, il n'y en a plus maintenant que 17 %.

Neuvième période

Nous voici arrivés à notre dernière période, trois minutes après le début de l'Univers. La température est de 1 milliard de degrés (soit une énergie de 0,1 MeV), la nucléosynthèse est en œuvre, la proportion de neutron s'est stabilisée à 13 % contre 87 % de protons.



L'Univers observable

Il n'est pas très raisonnable de s'arrêter là puisqu'il reste tout de même 13,7 milliards d'années (moins trois minutes !) à décrire. Quatre minutes après le Big Bang, les réactions nucléaires sont terminées. La composition de l'Univers est stabilisée, il y a environ 10 % d'hélium et 90 % d'hydrogène.

Trente minutes plus tard, la température est de 300 millions de degrés (soit une énergie de 30 keV), les positrons se sont annihilés avec les électrons, seul le léger surplus d'électrons (un pour un milliard) subsiste, ce qui est juste nécessaire pour assurer l'équilibre électrique avec les protons (charge totale nulle).

Avec le temps, l'Univers continue à se dilater et la température à baisser. 380 000 ans après le Big Bang, il ne fait plus que 4000 degrés (l'énergie équivalente est de 1 eV), les électrons sont maintenant prisonniers des protons dans les atomes d'hydrogène. L'énergie thermique devient insuffisante pour ioniser l'hydrogène (à 5000 K, 99 % de l'hydrogène est ionisé, contre 1 % à 3000 K). Les photons devenant incapables de produire cette ionisation, l'Univers devient transparent. Juste avant ce « découplage » matière-photons, ces derniers étaient répartis suivant un spectre de corps noir d'environ 4000 K. Du fait de l'expansion de l'Univers, la température a continué de baisser, l'énergie des photons a diminué, le corps noir est maintenant de 2,7 K et c'est lui que l'on observe quand on mesure le fond cosmique (CMB). Le CMB est aujourd'hui la trace la plus ancienne de l'Univers observable, il correspond à un décalage spectrale de $z = 1500$.

L'Univers est maintenant dominé par la matière. À un âge compris entre 380 000 ans et 75 millions d'années (c'est-à-dire entre $z = 1500$ et $z = 30$), l'Univers est trop froid pour que l'on puisse observer un rayonnement, cette période correspond à son « âge sombre ». Toutefois, du fait de la gravitation et des fluctuations de température (aujourd'hui visibles dans le CMB), de grandes masses de matière se concentrent, les premières étoiles se forment. Les violents phénomènes astrophysiques devraient être analysés dans un avenir assez proche (2010 ou 2011) par le détecteur d'ondes gravitationnelles spatiales LISA, qui pourra ainsi repousser l'Univers observable directement à $z = 30$. En 2004, la galaxie la plus lointaine observée correspond à un *red shift* de $z = 10$, ce qui veut dire que nous l'observons telle qu'elle était il y a près de 13 milliards d'années. Cette galaxie a dû être créée immédiatement après l'âge sombre. Plus on voit loin, plus on voit « vieux ». Les observations astronomiques couvrent actuellement la période allant de nos jours à l'époque où l'Univers avait un peu moins d'un milliard



d'années. Cependant rappelons que notre connaissance la plus lointaine que nous ayons de l'Univers vient de l'observation du CMB. Espérons que dans un futur proche nous puissions observer le découplage des neutrinos (1 s après le Big Bang) ainsi que l'émission des ondes gravitationnelles primordiales (10^{-15} s après le Big Bang).

La composition de l'Univers

On pense actuellement que l'Univers est constitué d'environ 5 % de matière ordinaire, d'environ 23 % de matière noire et d'environ 72 % de matière exotique. Examinons de plus près chacune de ces composantes.

La matière « ordinaire » est la matière connue de l'Univers : elle est constituée de protons, de neutrons et d'électrons. 93 % de cette matière ordinaire se trouve dans les plasmas chauds des galaxies, un peu plus de 5 % constituent les étoiles, un peu moins de 2 % sont répartis dans les gaz froids, et le pour cent restant est lié à l'énergie du rayonnement électromagnétique (les photons), celle des neutrinos et (très accessoirement) à la matière contenue dans les planètes (0,002 %).

L'étude du mouvement des galaxies et des amas de galaxies montre toutefois que ces objets contiennent davantage de masse que ce que nous voyons. Il doit donc exister de la matière non visible, appelée pour cette raison « matière noire », ou masse cachée de l'Univers. L'absence de cette masse cachée conduirait à l'abandon de la théorie de la gravitation. Cependant, les succès remportés par la dynamique céleste et la relativité générale conduisent les astronomes à privilégier l'hypothèse d'une masse cachée.

L'observation récente de l'accélération de l'expansion de l'Univers conduit à penser qu'il existe une matière « exotique », aux propriétés complètement différentes de celles des autres formes de matière. Cela correspond à ce que l'on appelle de plus en plus souvent « l'énergie sombre ». Cette énergie sombre est répulsive car elle conduit à une accélération de l'expansion (la force de gravitation étant attractive tend au contraire à une contraction), l'une des hypothèses est qu'elle coïncide avec la constante cosmologique.



7

Un siècle de quanta

Une constante encombrante

Le corps noir

Tout le monde a remarqué que les corps chauffés émettent de la lumière. Il en va ainsi de la flamme d'une bougie ou d'un feu de cheminée. C'est un céramiste, dont la manipulation des fours est essentielle à son art, qui fait la première observation importante dans ce domaine : en 1792, le célèbre céramiste anglais Josiah Wedgwood découvre que tous les corps chauffés deviennent rouges à la même température. Cette découverte sera la première d'une longue série devant amener à l'introduction des quanta en physique grâce à l'étude de la *loi du corps noir*. C'est au physicien allemand Gustav Kirchhoff que l'on doit ce nom : il appelle rayonnement du corps noir le rayonnement contenu à l'intérieur d'une enceinte fermée dont les parois sont maintenues à une température donnée¹. On l'observe en perçant un petit trou dans cette enceinte, ce qui permet de mesurer le spectre émis par ce corps noir.

¹ Kirchhoff a peut-être été inspiré par l'œuvre de J. Wedgwood, ce dernier avait en effet inventé en 1768 le black body (corps noir). Les céramistes anglais appellent « body » le matériau dont est constitué une poterie et Wedgwood avait réalisé un « black body » de propriétés semblables à celles du basalte naturel.



Gustav Kirchhoff montre durant l'hiver 1859-1860 que le rayonnement émis par une telle enceinte ne dépend ni de la nature des parois, ni des corps qui sont présents à l'intérieur de la cavité, mais uniquement de la température T à laquelle est portée l'enceinte. L'émission du corps noir a donc un caractère universel, ce qui est de nature à exciter les ardeurs des physiciens. Plus précisément, Kirchhoff montre que le rapport des pouvoirs d'émission (capacité du corps à émettre un rayonnement) et d'absorption (capacité du corps à absorber un rayonnement) d'un corps ne dépend que de sa température et de la longueur d'onde considérée. Il reste à trouver cette fonction, cette *loi du corps noir*. Peu de temps après, en 1879, un éminent professeur de l'université de Vienne, Joseph Stefan montre expérimentalement que la quantité totale d'énergie par unité de volume rayonnée par le corps noir est proportionnelle à la quatrième puissance de sa température (mathématiquement on écrit que l'émittance M d'un corps noir à la température T est donnée par la formule $M = \sigma T^4$, où σ est une constante appelée constante de Stefan). Son plus brillant élève, Ludwig Boltzmann, donne en 1884 une interprétation théorique à cette loi qui sera appelée *loi de Stefan-Boltzmann*.

L'étape suivante est réalisée par l'allemand Wilhelm Wien. Il montre, en 1893, grâce à la thermodynamique, que la loi cherchée est nécessairement le produit du cube de la fréquence par une fonction ne dépendant que du rapport de la fréquence à la température [$\nu^3 g(\nu/T)$]. C'est un progrès important car cela lui permet d'une part, de retrouver la loi de Stefan Boltzmann et d'autre part, d'établir que le rayonnement d'un corps noir à la température T est maximal pour une certaine longueur d'onde λ_m telle que $\lambda_m \times T = 2897 \text{ K} \cdot \mu\text{m}$ (résultat connu sous le nom de loi du déplacement de Wien). Ces travaux sont si importants qu'ils vaudront à Wien de recevoir le prix Nobel de physique en 1911. La relation mentionnée plus haut est très utile, c'est grâce à elle que nous savons que la température du Soleil est d'environ 6000 degrés Celsius (puisque'il émet de la lumière visible), que l'homme (ou la Terre) rayonne dans l'infrarouge (aux environs de 10 μm), que le fond cosmique galactique est à 3 K puisque'il est détectable dans le spectre électromagnétique à une longueur d'onde millimétrique, que l'environnement des étoiles à neutron se trouve à 100 millions de degrés (grâce à l'émission de rayons X), etc.

Wilhelm Wien franchit un pas de plus en 1896 : il propose une expression de la loi du corps noir (la fonction g qu'il a introduite ne peut pas être déterminée par la thermodynamique, mais il suppose $g(\nu/T) = \nu^3 \exp[-\beta \times \nu/T]$ par analogie avec la théorie cinétique des gaz). La confirmation expérimentale n'est pas simple car il faut utiliser des détecteurs infrarouges (le rayonnement infrarouge n'a été découvert



par William Herschel qu'en 1800). En 1895, Friedrich Paschen montre expérimentalement que la longueur d'onde du maximum d'émission du corps noir, λ_m , est inversement proportionnelle à sa température absolue, T , confirmant ainsi la loi du déplacement de Wien et en janvier 1897, il indique à propos de l'expression de Wien [en $\nu^3 \exp[-\beta \times \nu/T]$] « qu'il paraît très difficile de trouver une autre fonction représentant les données avec aussi peu de constantes ». Cette opinion était largement partagée, et il semblait que le problème du corps noir était ainsi résolu. Toutefois, début 1900, deux physiciens allemands (Lummer et Pringsheim), après avoir fait des mesures précises de l'émission du spectre du corps noir, notent quelques écarts entre l'expérience et la loi de Wien, et proposent une nouvelle relation. En juin 1900, c'est au tour de Lord Rayleigh de proposer une autre formule qui présente un meilleur accord (dans l'infrarouge) que celle de Wien (cette loi sera précisée en 1905 par le physicien anglais James Jeans, c'est pourquoi elle est connue sous le nom de loi de « Rayleigh-Jeans »).

La découverte de Planck

À l'automne 1905, les choses se précipitent. Deux équipes de physiciens allemands (Lummer et Pringsheim d'une part, Rubens et Kurlbaum d'autre part) confirment les écarts entre l'expérience et la loi de Wien. C'est très probablement en début de soirée, le dimanche 7 octobre, que Planck a découvert la loi qui porte son nom. Ce jour-là, Rubens et sa femme sont venus rendre visite aux Planck dans l'après-midi. Au cours de la conversation, Rubens glisse à Planck qu'il a établi que la densité d'énergie émise par le corps noir est proportionnelle à la température pour les grandes longueur d'onde (c'est-à-dire dans le domaine infrarouge). Après leur départ, Planck se remet au travail et trouve une interpolation entre ce résultat et la loi de Wien. Le soir même, il envoie sa formule à Rubens, sur une carte postale, et la rendit publique le 19 octobre (cette célèbre formule s'écrit $\rho(\nu, T) = 8\pi h \nu^3 / c^3 [\exp(h\nu/kT) - 1]^{-1}$).



Max Planck
(1858-1947).

Planck dira plus tard : « Sans l'intervention de Rubens, la formulation de la loi de la radiation, et par conséquent la fondation de la théorie quantique aurait peut-être eu lieu de manière totalement différente, et peut-être même pas du tout en Allemagne ».

La formule de Planck est pleinement conforme à l'expérience. Elle se confond avec celle de Wien pour les petites longueurs d'onde et avec celle de Rayleigh pour les grandes longueurs d'onde. Planck, qui a obtenu sa formule par une interpolation simple mais profondément



réfléchi, veut maintenant la démontrer de façon rigoureuse. Il introduit alors deux constantes : l'une, h , sera appelée constante de Planck, et l'autre, k , est baptisée par Planck « constante de Boltzmann » en hommage au physicien autrichien qui lui a fait découvrir la théorie atomique². La constante h allait révolutionner la physique, mais pour l'heure Planck pense qu'il pourra s'en débarrasser, c'est pourquoi il utilise cette lettre, la première de *hilfe grösse* qui veut dire ... grandeur auxiliaire ! Finalement, les constantes h et k apparaissent pour la première fois dans une communication faite par Planck le 14 décembre 1900 à la Société Allemande de Physique : c'est pourquoi, comme l'a dit Max von Laue « *ce jour est vraiment le jour de naissance de la théorie des quanta* ».

Natura non facit saltus

La nature ne fait pas de saut, disait Leibniz. Effectivement, la physique classique est fondée sur l'hypothèse du continu (c'est pourquoi le calcul différentiel est l'outil fondamental de la physique). Planck en a bien conscience, il dira à propos de sa loi du corps noir : « *Toute cette affaire peut se résumer en trois mots : un acte de désespoir. Car je me suis éloigné de la nature en toute conscience...* ». Il ajoute : « *Pendant six ans [1894-1900], je m'étais battu avec la théorie du corps noir. Je devais trouver une explication théorique à n'importe quel prix, sauf en renonçant au caractère intangible des deux principes de la thermodynamique ... J'essayai donc immédiatement de rattacher d'une manière quelconque le quantum élémentaire d'action au cadre de la théorie classique. Mais la constante se révélait encombrante et récalcitrante à chacun de mes essais...* ». Max Planck ne reprend ses publications sur le corps noir qu'en 1906. Einstein va entre-temps donner une interprétation audacieuse de la constante de Planck.

L'interprétation d'Einstein

Un article « révolutionnaire »

Cette interprétation d'Einstein va même inaugurer son année miraculeuse. Le 10 mars 1905, il écrit à son collègue Conrad Habicht : « *Je te promets en échange quatre articles... dont le premier... est très révolutionnaire* ». Dans cet article, qui s'intitule : « *Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière* », Albert Einstein indique que « *le rayonnement monochromatique de faible densité se comporte vis-à-vis des phénomènes thermiques comme s'il était constitué de quanta d'énergie $k\beta v$ [i.e. $h\nu$] indépendants* ». En clair, la lumière est

² Auparavant Planck utilisait deux autres constantes : a ($\sim h/k$) et b ($\sim h$).



Erzeugung und Verwandlung des Lichtes. 133

Experiment wohl denkbar, daß die mit kontinuierlichen Raumfunktionen operierende Theorie des Lichtes zu Widersprüchen mit der Erfahrung führt, wenn man sie auf die Erscheinungen der Lichterzeugung und Lichtverwandlung anwendet.

Es scheint mir nun in der Tat, daß die Beobachtungen über die „schwarze Strahlung“, Photoelektrizismus, die Erzeugung von Kathodenstrahlen durch ultraviolette Licht und andere die Erzeugung bez. Verwandlung des Lichtes betreffende Erscheinungsguppen besser verständlich erscheinen unter der Annahme, daß die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei. Nach der hier im Auge zu fassenden Annahme ist bei Ausbreitung eines von einem Punkte ausgehenden Lichtstrahles die Energie nicht kontinuierlich auf größer und größer werdende Räume verteilt, sondern es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten, welche sich bewegen, ohne sich zu teilen und nur als Ganze absorbiert und erzeugt werden können.

Im folgenden will ich den Gedankengang mitteilen und die Tatsachen anführen, welche mich auf diesen Weg geführt haben, in der Hoffnung, daß der darzulegende Gesichtspunkt sich einigen Forschern bei ihren Untersuchungen als beachtbar erweisen möge.

§ 1. Über eine die Theorie der „schwarzen Strahlung“ betreffende Schwierigkeit.

Wir stellen uns zunächst auf den Standpunkt der Maxwell'schen Theorie und Elektromagnettheorie und betrachten folgenden Fall. In einem von vollkommen reflektierenden Wänden eingeschlossenen Räume befindet sich eine Anzahl Gasatome und Elektronen, welche freibeweglich sind und aufeinander konvergente Kräfte ausüben, wenn sie einander sehr nahe kommen, d. h. miteinander wie Gasatome nach der kinetischen Gastheorie zusammenstoßen können.¹⁾ Man stelle

1) Diese Annahme ist gleichbedeutend mit der Voraussetzung, daß die mit einem Atomstoße beengten von Gasatomen und Elektronen bei Temperaturerhöhung ebenfalls erwärmt sind. Mit dieser letzten Voraussetzung ist Hr. Drude's Behauptung des Fortschritts von Gasatomen auf elektrischen Leitungsvermögen der Metalle auf kinetischem Wege abgeleitet.

Article d'Einstein sur
l'interprétation de
l'effet
photoélectrique.
© Annalen der
physik.

constituée de petits grains d'énergie, de la même façon que l'électricité est constituée de petites charges électriques indivisibles (les électrons). Mais comment peut-on affirmer une chose pareille quand on sait depuis un siècle que la lumière est une onde ? La théorie ondulatoire de la lumière est même très bien établie, elle a été élaborée par Young, Fresnel et Arago au début du XIX^e siècle, puis est venue en 1873 l'admirable synthèse faite par Maxwell entre l'optique et l'électromagnétisme, synthèse confirmée vingt ans plus tard par Hertz. Comment alors, un jeune inconnu peut-il remettre en question tous ces résultats fondamentaux et revenir deux siècles en arrière, c'est-à-dire à l'hypothèse corpusculaire de la lumière évoquée par Newton dans son *Optics* de 1704 ? Il ne le peut tout simplement pas, c'est pourquoi Einstein parle « *d'un point de vue heuristique* », en un mot son approche est utilitaire, sa démarche permet simplement d'expliquer les phénomènes décrits de façon synthétique. Au fond de lui-même, Einstein sait qu'il introduit un concept révolutionnaire. Pour Einstein, le rayonnement est constitué de quanta d'énergie et cela lui permet d'interpréter l'effet photoélectrique. Par ailleurs, Einstein donne dans son article une autre démonstration de la loi de « Rayleigh-Jeans » et montre qu'elle n'est compatible qu'avec une théorie classique. La formule de Planck est donc bien liée à une hypothèse non classique, celle de la quantification de l'énergie.



La découverte de l'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est découvert fortuitement par Hertz en 1887. Il cherchait alors à produire des ondes électromagnétiques (que l'on appellera ensuite « ondes hertziennes ») pour valider la théorie de Maxwell de l'électromagnétisme. Il avait inventé pour cela un « diapason électrique » qui émettait des étincelles produites par la décharge à haute fréquence d'un circuit oscillant. Le détecteur n'était autre qu'une simple boucle coupée en un point présentant deux petites billes métalliques en regard. Lorsque l'onde passait à travers cette boucle, une étincelle se produisait par induction entre les deux billes mais Hertz remarqua que l'éclat de l'étincelle de son diapason électrique facilitait la création de l'étincelle à la réception. Il remédia à cet artéfact de mesure en placant un cache en bois entre l'émetteur et le récepteur. En étudiant le phénomène parasite, il comprit que c'était le rayonnement ultraviolet de l'étincelle émettrice (qui se comporte un peu comme une lampe à arc) qui était la cause de l'étincelle parasite apparaissant aux bornes de la boucle réceptrice. Il venait de découvrir l'effet photoélectrique ! Les circonstances de cette découverte sont curieuses si l'on songe que Hertz a, presque en même temps, validé les équations de Maxwell (grâce à la découverte des ondes) et trouvé leur limite (puisque l'effet photoélectrique ne peut pas être interprété par ces équations !) L'année suivante (1888), le physicien allemand Hallwachs confirme qu'un éclaircissement permet aux charges négatives de s'échapper d'une feuille métallique. En 1891, Hertz prend un assistant, Philip Lénard, qui fera l'étude expérimentale complète de cet effet photoélectrique et identifiera les charges de Hallwachs à des « électrons ». Lénard recevra le prix Nobel de physique en 1905 pour ces travaux, tandis que, en cette même année, Einstein en donnera l'interprétation.

L'interprétation de l'effet photoélectrique

En supposant que la lumière est constituée de grain d'énergie, Einstein écrit tout simplement que cette énergie ($h\nu$) permet d'extraire un électron de l'atome (en lui communiquant une énergie qui est égale à son énergie de liaison) le reste étant emporté par l'électron sous forme d'énergie cinétique. Cette interprétation, à la fois extrêmement simple et élégante, permet de retrouver les constats expérimentaux faits par Lénard. La relation $E = h\nu$ relie le caractère ondulatoire de la lumière (représenté par sa fréquence ν) à son caractère corpusculaire (représenté par le grain d'énergie E). C'est la constante de Planck qui fait le lien entre ces deux mondes (ondulatoire et corpusculaire), le fait que cette constante ne soit pas nulle montre la dualité de la lumière (c'est à



la fois une onde **et** un corpuscule). Einstein donne ainsi une interprétation physique à cette constante h , contrairement à Planck qui essaie à cette époque de la faire disparaître. Pour l'heure, Einstein est le seul physicien à croire à cette interprétation. Ce n'est que onze ans plus tard, en 1916, après des mesures très précises, que Millikan annonce « *qu'Einstein avait prédit exactement les résultats observés* ». Toutefois, même en 1916, Millikan pense que l'hypothèse des quanta de lumière est « *une hypothèse hardie pour ne pas dire téméraire* », il écrira plus tard : « *J'ai passé dix ans de ma vie à vérifier expérimentalement l'équation trouvée par Einstein en 1905, et contrairement à toutes mes prévisions, je fus contraint, en 1915, d'affirmer que sa confirmation était indiscutable en dépit de son caractère déraisonnable, car elle semblait contredire tout ce que nous savions sur les interférences lumineuses* ». Einstein recevra le prix Nobel de physique en 1922 (attribué au titre de l'année 1921) pour ses mérites en physique mathématique, spécialement pour sa découverte de la loi de l'effet photoélectrique.

Vers un monde discontinu

De lents débuts

La signification physique de la constante de Planck pourrait sembler aujourd'hui avoir été un thème central de la physique dans les premières années du XX^e siècle, mais il n'en est rien. Seule une poignée de physiciens, parmi lesquels Planck, Einstein et Lorentz, travaillaient sur ce sujet. Il en a été ainsi jusqu'au premier Conseil Solvay, qui s'est tenu à Bruxelles en octobre 1911. Son thème était précisément *Rayonnement et quanta*. Dans son intervention, Max Planck donne un éclairage précis de la situation d'alors. Il écrit au sujet de l'interprétation d'Einstein : « *D'après cette hypothèse, l'énergie d'un rayon lumineux de fréquence ν n'est pas distribuée de manière continue dans l'espace, mais se propage en ligne droite par quanta déterminés de grandeur $h\nu$ de la même manière que les particules lumineuses dans la théorie de l'émission de Newton* ». Puis il résume les réticences des physiciens de l'époque : « *Il va sans dire que de telles hypothèses sont inconciliables avec les équations de Maxwell et avec toutes les théories électromagnétiques de la lumière proposées jusqu'ici... Quand on songe à la confirmation expérimentale complète qu'a reçue l'électrodynamique de Maxwell par les phénomènes d'interférence les plus délicats, quand on songe aux difficultés extraordinaires que son abandon entraînerait pour toute la théorie des phénomènes électriques et magnétiques, on éprouve quelques répugnances à en ruiner de prime abord les fondements* ».



Les débats qui ont lieu lors de cette réunion allaient toutefois faire évoluer les choses. Les quanta commençaient à sortir de l'ombre. En 1913, le physicien danois Niels Bohr introduit son modèle d'atome (le fameux « atome de Bohr ») dans lequel il « quantifie » l'énergie que possèdent les électrons sur leurs orbites autour du noyau. Cette énergie ne peut pas être quelconque, elle est reliée à un nombre entier (qui sera appelé nombre quantique principal). Il interprète l'émission de lumière comme étant due à la transition d'un électron entre deux états d'énergie autorisés. De même l'absorption de la lumière se traduit par le passage d'un électron d'une orbite autorisée à une autre. Cette description est très efficace, elle permet à Bohr de retrouver l'énergie des raies spectrales observées depuis de longues années par les spectroscopistes. Par ailleurs, la description de Bohr est confirmée, la même année, par une belle expérience faite par Frank et Hertz (qui leur vaud le prix Nobel de physique en 1925). James Franck avait été l'assistant de Rubens (qui avait fait les mesures précises du spectre du corps noir montrant une déviation par rapport à la loi de Wien) et Gustav Hertz était le neveu de Heinrich Hertz, le découvreur des ondes électromagnétiques. Une jolie anecdote en relation avec cette « expérience de Franck et Hertz », rapportée par Georges Gamov, mérite d'être racontée : *« Chacun sait qu'un physicien théoricien est incapable de manipuler des appareils de laboratoire ; ceux-ci se brisent dès qu'il y touche. Pauli était un si bon physicien théoricien qu'il suffisait en général qu'il franchisse la porte d'un laboratoire pour qu'il y ait un malheur. Un mystérieux incident, sans lien apparent avec la présence de Pauli, se produisit un jour au laboratoire du professeur James Franck, à Göttingen... Au début de l'après-midi, sans qu'on sache pourquoi, un appareil compliqué, destiné à l'étude de phénomènes atomiques, s'effondra. Franck écrivit à ce sujet une lettre humoristique à Pauli, qu'il lui adressa à Zürich ; dans sa réponse, qui portait un timbre danois, Pauli expliquait qu'il était allé voir Bohr et qu'au moment où l'appareil s'était cassé son train était arrêté pour quelques minutes en gare de Göttingen ! »*

Le corps noir à l'origine du laser

La loi du corps noir est universelle, elle ne dépend pas de la nature des parois. Pourquoi alors ne pas essayer de retrouver la loi du corps noir en imaginant que les parois sont constituées d'atomes de Bohr en interaction avec le rayonnement qui serait constitué, quant à lui, de grains lumineux. C'est la démarche qu'Einstein va suivre en 1916. Il s'aperçoit vite que la prise en compte des processus d'émission et d'absorption ne redonne pas la loi de Planck, mais la loi « classique » de Rayleigh-Jeans. Au mois d'août, il tient l'affaire et écrit à son ami et confidant Michele Besso : *« ... J'ai eu un trait de lumière à propos de l'absorption et de l'émission du rayonnement... une conséquence tout à fait*



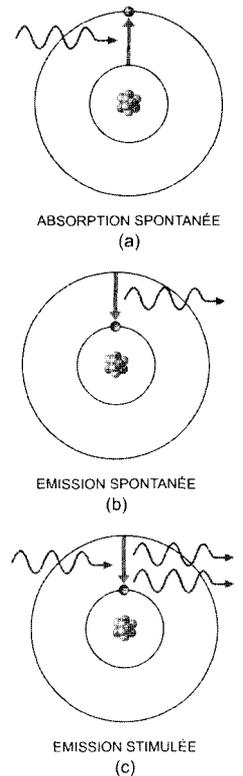
étonnante de la formule de Planck, je dirais même la conséquence », il ajoute un peu plus tard « ... Le développement est purement quantique et il fournit la formule de Planck. En les poursuivant, on peut montrer de façon convaincante que les processus élémentaires de l'émission et de l'absorption sont des processus dirigés... » Pour retrouver la loi de Planck, Einstein a introduit un nouveau processus, l'émission stimulée. Considérons un électron qui se trouve dans un état excité de l'atome de Bohr. Si un grain de lumière (un photon) arrive, il va faire « chuter » l'électron vers une orbite moins énergétique, donc plus stable, et l'excédent d'énergie sera emportée par un photon. Ce processus intervient si le photon incident a une énergie égale à la différence d'énergie des niveaux « haut » et « bas » de l'électron. Le photon est émis à la même énergie que le photon incident, qui lui continue son chemin. Finalement on est en présence de deux photons jumeaux. D'un point de vue théorique le résultat obtenu par Einstein est capital, puisqu'il réussit à démontrer par une méthode complètement différente la loi de Planck. Dans sa démonstration, il utilise une interprétation physique très claire du quanta de Planck ($E = h\nu = E_2 - E_1$, où E désigne l'énergie du photon incident, ν sa fréquence, E_2 et E_1 les niveaux « haut » et « bas » de l'électron). Du point de vue pratique, les conséquences seront également considérables, puisque le nouveau processus introduit par Einstein, l'émission stimulée, est à la base du laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation). D'ailleurs les équations de base de la physique du laser sont appelées équations d'Einstein. En septembre 1916, Einstein confiera à son ami Besso : « Ainsi, l'existence des quanta de lumière est établie ».

Quelques années plus tard, en 1921, deux physiciens, Stern et Gerlach, font une expérience de physique atomique et montrent que l'espace lui-même est quantifié. Certains vecteurs ne peuvent avoir une direction quelconque dans l'espace, seules des directions privilégiées, quantifiées, sont autorisées. Ce résultat laisse les physiciens dans l'expectative. Il devient urgent de disposer d'une théorie cohérente pour interpréter l'ensemble des phénomènes expérimentaux constatés. Mais avant cela, une autre découverte sensationnelle allait être faite.

Vers un monde dual

Un prince de la physique

C'est un français, issu d'une illustre famille, qui a franchi le pas suivant, qui a « soulevé un coin du grand voile », selon les propres mots d'Einstein. Ce français, c'est Louis de Broglie. Il fait sa découverte lors de sa thèse, en 1923. Il relate lui-même sa démarche : « Mon attention



La transition entre le niveau fondamental (NF) et le niveau excité (NE) d'un atome peut se faire suivant trois processus : (a) le photon (flèche ondulée) transfère son énergie à l'électron (point) qui passe de NF à NE ; (b) l'électron passe de NE à NF et émet un photon ; (c) le photon provoque la transition d'un électron de NE à NF, ce qui provoque l'émission d'un photon jumeau du photon initial.



avait été particulièrement retenue par les travaux de Planck, d'Einstein et de Bohr sur les quanta et je voyais dans la coexistence des ondes et des particules dans les rayonnements, découverte par Einstein en 1905 dans sa théorie des quanta de lumière, un fait fondamental dont il importait de préciser la véritable nature. Ayant suivi les travaux que mon frère Maurice poursuivait sur les spectres des rayons X, je voyais toute l'importance dans ce domaine du double aspect des radiations électromagnétiques et, ayant étudié la théorie d'Hamilton Jacobi, j'y voyais une sorte de préfiguration d'une théorie synthétique de l'union des ondes et des particules. Enfin, j'avais aussi beaucoup étudié la théorie de la relativité et j'étais persuadé qu'elle devait être à la base de toutes les tentatives théoriques nouvelles ». Il ajoute : « Puis soudain me vint, en 1923, l'idée que la coexistence des ondes et des particules n'existait pas seulement dans le cas étudié par Einstein et qu'elle devait être généralisée pour toutes les particules. » Ce que de Broglie énonce c'est la dualité des ondes et des particules. Un électron que l'on conçoit comme un corpuscule est aussi une onde ! La formule qui exprime cette dualité est extrêmement simple, elle s'écrit $\lambda = \frac{h}{p}$. Dans cette formule, p désigne la quantité de mouvement de la particule (c'est-à-dire le produit de sa masse m par sa vitesse v) et λ désigne la longueur d'onde de l'onde associée. Cette formule est très voisine de celle d'Einstein $E = h\nu$, et de la même façon la constante de Planck relie deux mondes, le monde corpusculaire et le monde ondulatoire³. Ici encore les conséquences seront très nombreuses, tant du point de vue théorique (naissance de la « mécanique ondulatoire ») que du point de vue pratique (microscope électronique, par exemple).

Des années miraculeuses

Dans les années 1925 à 1928, les idées brillantes pour construire une nouvelle physique s'enchaînent à un rythme effréné. Entre le printemps et l'été 1925, Werner Heisenberg développe la « mécanique des matrices » ou « mécanique quantique », terme qui fera date. Le formalisme de Heisenberg est très complexe, mais Pauli réussit à l'utiliser pour retrouver des lois de spectroscopie. Entre l'automne et l'hiver 1925, Paul Dirac développe à Cambridge une approche très différente fondée sur les q-nombres, dont la propriété essentielle est de ne pas être commutative (pq n'est pas égal à qp). En janvier 1926, Schrödinger développe une troisième approche directement inspirée des travaux de de Broglie et fondée sur l'onde ψ ; il formalise ainsi la mécanique ondulatoire. La confusion est à son comble avec l'apparition, en quelques mois, de trois approches distinctes de la nouvelle mécanique. Toutefois dès

³ En utilisant deux formules établies par Einstein $E = mc^2$ et $E = h\nu$ on peut retrouver la formule de de Broglie : $p = mc = mc^2/c = E/c = h\nu/c = h/\lambda$.





Pauli, Heisenberg et Fermi à la conférence de Côme en 1927.
© CERN.

En mars 1926, Schrödinger montre l'équivalence de son approche avec celle d'Heisenberg et bientôt avec celle de Dirac. De toutes les théories, c'est celle de Schrödinger qui triomphe. Elle est simple, donne une image compréhensible de la physique en terme d'onde et permet de retrouver les autres représentations d'Heisenberg et de Dirac. Au sommet de la vague entre mars et juillet 1926, la nouvelle théorie permet enfin d'interpréter dans les moindres détails des observations expérimentales précédemment effectuées (effet Zeeman et effet Stark). Ce triomphe est toutefois de courte durée. En effet, en juin 1926, Max Born donne une interprétation probabiliste de l'onde ψ qui allait diviser les physiciens en deux camps.

Intronisation du photon et Congrès historique

Tous les acteurs de la nouvelle mécanique se réunissent en octobre 1927 lors du cinquième Conseil Solvay. Ce congrès est présidé par Lorentz. On trouve à ses côtés : Planck, Einstein, Bohr, Louis de Broglie, Heisenberg, Schrödinger, Dirac, Pauli, ... Au total sur 29 participants, 17 sont ou seront lauréats du prix Nobel. Le thème des discussions porte sur « Les électrons et les photons ». Le terme *photon* est tout nouveau, il a été introduit en 1926 par le chimiste Lewis (qui écrit : « *La lumière consiste en un nouveau type d'atomes... qui ne se créent ni se détruisent et pour lesquels je propose le nom de photon* »). Les sujets d'actualité ne manquent pas : les formalisations introduites par Heisenberg, Dirac et Schrödinger, l'interprétation indéterministe de Born, le principe de complémentarité de Bohr, le principe d'incertitude d'Heisenberg... ! Toute ces notions ébranlent les concepts classiques de la physique. Pour Max Born « *les ondes sont des ondes de probabilité. Ce ne sont pas, à vrai dire, les probabilités elles-mêmes, mais certaines amplitudes de probabilité qui se propagent continuellement et satisfont à des équations différentielles ou intégrales comme dans la physique du continu classique* ». Les conséquences sont très importantes, le calcul ne donne plus accès





qu'à une probabilité de présence. L'origine profonde de cette situation vient du caractère duale de la matière ; la lumière est à la fois onde et corpuscule, de même que les particules sont à la fois des corpuscules et des ondes. Bohr exprime cela par son *principe de complémentarité* selon lequel les représentations ondulatoire et corpusculaire permettent tour à tour de décrire la réalité, mais c'est l'expérience qui détermine la nature ondulatoire ou corpusculaire. Bohr indique par exemple, lors du Conseil Solvay, que « *les deux conceptions de la nature de la lumière représentent deux tentatives d'adaptation des faits expérimentaux à notre manière ordinaire de concevoir le monde par laquelle la limitation des notions classiques est exprimée de façon complémentaire* ».

C'est un peu avant le Conseil Solvay qu'Heisenberg avait énoncé son fameux « principe d'incertitude ». Suivant ce principe, on ne peut pas connaître simultanément à la fois la position et la vitesse d'une particule avec une précision quelconque. Prenons un exemple (connu sous le nom de « microscope d'Heisenberg ») : on souhaite observer un électron avec un microscope afin de déterminer sa position et sa vitesse. Pour observer l'électron, il faut l'éclairer avec de la lumière mais alors la lumière va interagir avec l'électron, donc le déplacer et lui conférer une vitesse supplémentaire. Nous ne saurons donc pas avec une précision infinie sa position et sa vitesse avant l'observation. Ce mécanisme est diabolique, d'innombrables expériences de pensées ont été imaginées pour le contourner, mais rien n'y fait. À chaque fois que l'on veut mesurer plus précisément la position, l'incertitude sur la

vitesse augmente et réciproquement. Une anecdote illustre bien ce point, il s'agit de la « boîte à photons » qui a opposé Einstein et Bohr (voir encadré).

Les physiciens n'étaient pas d'accord entre eux : un camp (Bohr, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac...) était partisan de l'interprétation purement probabiliste, l'autre (Planck, Einstein, de Broglie, Schrödinger, Lorentz...) pensait que l'on ne pouvait pas admettre une semblable interprétation et réaffirmait avec force leur conviction que la physique théorique devait rester déterministe. Lors de ce Conseil Solvay, Lorentz exprime bien le second point de vue. Il dit à Heisenberg : *« C'est donc de l'indéterminisme que vous érigez en principe. D'après vous, il y a des événements que nous ne pouvons prédire, alors que jusqu'ici nous avons toujours admis la possibilité de ces prédictions »*. Il ajoute : *« L'image que je veux me former des phénomènes doit être absolument, nette et définie ... Pour moi, un électron est un corpuscule qui, à un instant donné, se trouve en un point déterminé de l'espace. Et, si cet électron rencontre un atome et y pénètre et qu'après plusieurs aventures il quitte cet atome, je me forge une théorie dans laquelle cet électron conserve son individualité, c'est-à-dire que j'imagine une ligne suivant laquelle cet électron a passé à travers cet atome. »*

Einstein est également contre l'abandon de la description déterministe en physique. Il avait exprimé son opinion peu avant par une phrase restée célèbre *« Dieu ne joue pas aux dés »* (lettre d'Einstein à son ami Besso du 4 décembre 1926). Bohr en fera le commentaire suivant : *« La réticence à renoncer à la description déterministe a été particulièrement exprimée par Einstein, qui proposait des alternatives suggérant la possibilité de prendre en considération l'interaction entre les objets atomiques et les instruments de mesure plus explicitement. Bien que nos réponses concernant la vanité de cette perspective n'aient pas convaincu Einstein, qui est revenu sur ces problèmes durant les conférences suivantes, les discussions furent une inspiration pour une exploration ultérieure de la situation relative à l'analyse et la synthèse en physique quantique et ses analogies dans d'autres domaines de la connaissance humaine, où la terminologie usuelle implique l'attention aux conditions dans lesquelles l'expérience est acquise. »*

Finalement, à la fin du cinquième Conseil Solvay, Max Born et Werner Heisenberg déclarent : *« Nous tenons la mécanique des quanta pour une théorie complète, dont les hypothèses fondamentales physiques et mathématiques ne sont plus susceptibles de modifications »*. Cette conception allait triompher, on la qualifie de conception orthodoxe de la mécanique quantique ou d'interprétation de Copenhague, compte tenu du rôle essentiel joué par Niels Bohr et ses élèves de l'Institut de physique théorique de Copenhague.



La boîte à photons

Dans l'expérience de pensée ci-dessous, décrite par Bohr, suite à un débat qu'il a eu avec Einstein, ce dernier pensait pouvoir s'affranchir de la relation d'incertitude d'Heisenberg entre l'énergie et le temps $\Delta E \times \Delta t \approx h$:

« Lors de notre rencontre suivante, à l'occasion du Congrès Solvay de 1930, les discussions entre Einstein et moi prirent un tour dramatique. Cherchant un argument à l'encontre du point de vue selon lequel on ne peut contrôler l'échange de quantité de mouvement et d'énergie entre les objets et les instruments de mesure, dès lors que ces instruments servent à ce pour quoi ils sont faits, à savoir définir un cadre spatio-temporel pour les phénomènes, Einstein avança l'argument selon lequel un tel contrôle était possible si l'on tenait compte des exigences de la théorie de la relativité. En particulier, la fameuse formule d'Einstein : $E = mc^2$ reliant l'énergie et la masse, devait permettre, par simple pesée, de mesurer l'énergie totale de n'importe quel système et donc en principe d'établir un contrôle sur l'énergie transférée à ce système lors de son interaction avec un objet atomique.

Einstein proposa à cette fin le dispositif représenté sur la figure ci-dessous, comportant une boîte percée d'un trou que l'on peut laisser ouvert ou fermé à volonté grâce à un obturateur, lui-même actionné par un mécanisme d'horloge situé à l'intérieur de la boîte. Si, au départ, la boîte contenait une certaine quantité de rayonnement et si l'horloge était réglée de manière à ce que l'obturateur s'ouvre pendant un très court intervalle de temps, à un instant choisi, on pourrait s'arranger pour qu'un seul photon s'échappe de la boîte en passant par le trou à un instant que l'on pourrait déterminer avec toute la précision souhaitée. De plus, il devrait apparemment être possible, en pesant la boîte et son contenu avant et après l'évènement, de mesurer aussi l'énergie du photon avec une précision aussi bonne que l'on voudrait – en contradiction manifeste avec l'indétermination réciproque affectant les mesures de temps et d'énergie en théorie quantique.

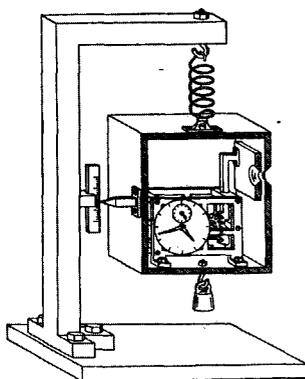
Cet argument posait un problème sérieux qui fut examiné avec le plus grand soin. Mais, au terme d'une discussion à laquelle Einstein lui-même prit une large part, il devint manifeste que cet argument ne tenait pas.

Cette discussion, qui illustre à merveille la puissance et la cohérence des arguments relativistes, mit donc une fois de plus l'accent sur l'obligation où nous sommes d'avoir à distinguer, lors de l'étude des phénomènes atomiques, les instruments de mesure proprement dits (qui servent à définir le système de référence) des parties que l'on doit considérer comme les objets étudiés (et à propos desquels les effets quantiques ne peuvent être



négligés). En dépit de ce que tout cela pouvait avoir de réconfortant quant au caractère général et « sain » de la description que donne la mécanique quantique, Einstein – comme il m'en fit part dans une conversation que nous eûmes ultérieurement – restait inquiet à l'idée que nous manquions apparemment, en matière de description de la nature, de principes solidement établis auxquels tous puissent souscrire. »

L'indétermination sur la position de l'aiguille entraîne une variation de la position de la boîte, donc de sa masse, donc de son énergie. Mais une variation de position entraîne une variation du champ de gravitation, donc d'après la relativité générale une variation du temps. On peut montrer très simplement que l'indétermination sur l'énergie ΔE et celle sur le temps Δt est telle que $\Delta E \times \Delta t \geq h$. Ainsi, c'est en utilisant un argument associé à la relativité générale d'Einstein que Bohr a pu contrer son raisonnement !



Des usines à photons, les lasers

Les premiers lasers

Lors de son année miraculeuse de 1905, Einstein considère que la lumière est constituée de grain d'énergie $h\nu$. En conférant à ces particules de lumière une impulsion (ou quantité de mouvement) $h\nu/c$ et en introduisant le mécanisme d'émission stimulée, il réussit, en 1916, à retrouver la loi de Planck du corps noir par une voie totalement nouvelle. Ses travaux vont plus de quarante ans plus tard, bouleverser l'optique et s'immiscer jusque dans notre vie quotidienne. Planck et Einstein étaient tous les deux de fins mélomanes et ils ne pouvaient pas



alors se douter que leurs réflexions sur le mécanisme d'interaction d'une onde électromagnétique avec les atomes des parois de la cavité d'un corps noir, permettraient moins d'un siècle plus tard de bénéficier d'une reproduction musicale quasi parfaite ! Cela sera permis par l'invention du laser et par le formidable développement qu'il a connu.

L'histoire des lasers commence en 1953 lorsque Charles Townes pose un brevet sur un nouveau dispositif qu'il baptise MASER pour Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Certains de ses collègues, sceptiques sur les débouchés de recherches aussi coûteuses, avaient proposé une autre signification pour cet acronyme : Means of Acquiring Support for Expensive Research ! En 1958, il propose avec Schawlow d'en étendre le principe aux ondes lumineuses. Les deux auteurs déposeront un brevet qui sera accepté en 1960, et cette même année Theodore Maiman réalise le premier LASER, le M de Microonde ayant été remplacé par le L de Lumière. Il s'agit d'un objet de laboratoire et Schawlow déclarera plus tard : « *Nous pensions qu'ils pourraient y avoir des utilisations scientifiques, mais nous n'avions pas d'application en tête* ». De fait les lasers sont d'abord des instruments de laboratoire utiles dans les recherches fondamentales telles que la spectroscopie. Ses qualités intrinsèques, monochromaticité (c'est-à-dire émission d'une longueur d'onde bien précise), directivité, forte luminence spectrale (c'est-à-dire capacité à émettre beaucoup de puissance dans une surface, une direction et une longueur d'onde précises) intéressent d'abord les militaires. Les progrès réalisés permettent d'envisager, vers le début des années 1980, des utilisations plus larges. Actuellement, les lasers sont devenus très courants, que l'on songe aux pointeurs laser utilisés en cours, aux lecteurs de CD et autres DVD, aux lecteurs de code barre qui équipent les caisses des supermarchés, etc. Pour donner une idée de la diversité des lasers disponibles actuellement, nous allons les envisager sous trois critères successifs : l'aspect temporel de l'émission (en continue, en pulsée, ou modulée) ; la longueur d'onde et la puissance.

Des pulses de un millionième de milliardième de seconde !

Les premiers lasers fonctionnaient en mode pulsé, car pour obtenir l'émission il faut d'abord faire une « inversion de population », c'est-à-dire mettre plus d'atomes dans le niveau excité que dans le niveau fondamental. Sous l'impulsion d'un photon incident, les atomes se dés excitent, l'électron retrouve son niveau inférieur en émettant un photon d'émission stimulé, frère jumeau de celui qui lui a donné naissance. Or, il faut une certaine énergie de « pompage » pour



produire l'inversion de population. Dans les premiers lasers, la durée du pompage était plus longue que celle de l'émission, ils fonctionnaient donc en régime pulsé (suivant un mode connu en physique sous le nom d'oscillations de relaxation). En faisant en sorte que le niveau excité ait une « durée de vie » assez longue, et que le niveau inférieur ait, au contraire, une durée de vie très courte, les physiciens ont amélioré la situation et réussi à faire une émission continue (que l'on baptise souvent émission CW pour Continuous Waves). Naturellement, en parallèle des progrès effectués en émission continue (amélioration du rendement), la voie pulsée continuait d'être explorée. Les progrès dans ce secteur allaient également être très rapides et très impressionnants, la durée des impulsions obtenues devenant de plus en plus courte. En un peu plus de quarante ans, la réduction de la durée du pulse a gagné neuf ordres de grandeur, c'est-à-dire un facteur un milliard ! Juste avant l'avènement des lasers en 1960 on ne savait pas très bien faire de courtes impulsions lumineuses : l'on atteignait des durées qui ne pouvaient pas être inférieures à la microseconde (un millionième de seconde). Les lasers ont permis un gain très rapide et au début des années 1970, le seuil de la picoseconde (un million de fois plus court, soit un millième de milliardième de seconde) était franchi. Le rythme s'est ensuite ralenti, mais le but à atteindre était extrêmement ambitieux : obtenir des pulses qui se mesurent en femtosecondes (1 femtoseconde (fs) = 10^{-15} s, soit un millionième de milliardième de seconde, on se rend un peu mieux compte de cette échelle en remarquant qu'une femtoseconde est à la seconde ce que la seconde est à trente millions d'années). Un pulse de 12 fs a été obtenu en 1984, puis 8 fs en 1994, 6 fs en 1996 et 4,5 fs en 1999. À cause de la relation temps-fréquence, il n'est guère possible d'aller plus loin dans le domaine de la lumière visible, la limite théorique étant de l'ordre de la fs pour le visible⁴. Le record actuel est de 0,65 fs (ou 650 attoseconde (as), 1 as = 10^{-18} s). Il est obtenu dans le domaine des rayons X pour la raison qui vient juste d'être évoquée. Pour se rendre compte de la petitesse de ces valeurs, considérons le record actuel dans le visible, soit 4,5 fs : pendant cette durée la lumière ne parcourt qu'environ 1 μm ce qui correspond à une longueur environ deux fois plus grande que la longueur d'onde, autrement dit, si l'on était capable de visualiser l'onde nous n'en verrions que deux arches ! On peut imaginer que dans ces conditions les propriétés classiques de l'optique soient mises en défaut.

Il est un domaine pour lequel les lasers jouent un rôle particulièrement important, c'est celui des télécommunications optiques. Le principe est

⁴ $\Delta E \times \Delta t \approx h \Rightarrow \Delta \nu \times \Delta t \approx 1 \Rightarrow \Delta t \approx \frac{\lambda^2}{c \Delta \lambda}$ et au minimum en utilisant toute la bande spectrale ($\Delta \lambda = \lambda$) on a $\Delta t_{\min} \approx \frac{\lambda}{c}$.



simple : le signal à transmettre vient moduler une source laser, la lumière se propage dans une fibre optique (qui est un guide d'ondes pour les fréquences optiques), puis le signal lumineux est détecté et traduit en signal électrique par une photodiode. Les avantages par rapport à la transmission filaire classique sont nombreux : la fibre est beaucoup plus compacte et le débit est beaucoup plus grand. Ce haut débit est dû à deux propriétés propres à la lumière : sa fréquence est très élevée (la bande passante de la liaison est donc très grande) et comme les photons n'interagissent pas entre eux (contrairement aux électrons) on peut transmettre plusieurs signaux en parallèle à des longueurs d'onde différentes (on parle de multiplexage spectral). On est ainsi capable de faire passer 40 signaux (chacun à une longueur d'onde distincte), dans une fibre, chaque signal ayant un débit de 10 Gbit/s, soit au total 400 Gbit/s ce qui correspond à la transmission de ...6 millions de communications téléphoniques ! En 2003, Alcatel a même réussi à atteindre le débit fabuleux de 4 Tbit/s sur une distance de 6250 km et plus récemment à coupler 256 lasers indépendants chacun modulés à 40 Gbit/s, ce qui correspond à un débit de 10 Tbit/s soit ... quatre fois le besoin actuel mondial !

Des lasers de toutes les couleurs

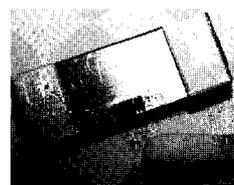
On sait aujourd'hui réaliser des lasers dans une gamme extrêmement large de longueur d'onde. Nous mettons de côté les masers, qui peuvent émettre des ondes hyperfréquences, pour ne nous intéresser qu'aux vrais lasers. En fait la frontière entre micro-onde et optique est assez floue, disons qu'elle est située à une fréquence de l'ordre du térahertz ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$), ce qui correspond à des longueurs d'onde de l'ordre de la centaine de micron. Ce domaine térahertz fait d'ailleurs l'objet de beaucoup d'attention et de travaux à l'heure actuelle. Des dispositifs entièrement quantiques, appelés laser à cascade quantique permettent de couvrir la bande spectrale allant de 3 à 100 μm (voir encadré). Dans le domaine visible, la richesse de la spectroscopie a permis de couvrir toutes les longueurs d'onde. Les lasers ultraviolet se sont rapidement développés pour les besoins en lithographie des composants électroniques. On peut même faire des lasers à rayons X. La méthode généralement utilisée consiste à focaliser un laser intense, émettant dans le visible ou le proche infrarouge, sur un jet de gaz rare. Un électron du cortège atomique est arraché, accéléré par le champ électrique associé à la lumière laser incidente, puis en retombant sur son niveau initial l'électron émet un photon X. On a ainsi pu générer des harmoniques très élevées, ainsi la 147^e harmonique d'un rayonnement d'une longueur d'onde $\lambda = 1 \mu\text{m}$ correspond à une longueur d'onde $\lambda_X = 70 \text{ \AA}$. Une autre méthode consiste à focaliser le faisceau d'un laser



intense sur un solide, ce qui crée un plasma, ce dernier rayonne alors un faisceau de rayons X cohérents. Des longueurs d'onde aussi courtes que quelques Å ont ainsi pu être obtenues. Des méthodes plus radicales peuvent être envisagées et c'est ainsi que les américains dans le cadre de l'initiative de défense stratégique (connue sous le nom de « guerre des étoiles ») ont réalisé des lasers à rayons X pompés par ... explosion nucléaire ! Encore plus haut en fréquence, on peut imaginer des lasers à rayons gamma. Bien que des recherches dans ce domaine existent depuis plus de trente ans, elles n'ont pas encore abouties, mais des

Détecteurs et émetteurs quantiques

Il existe une imbrication profonde entre la statistique des photons du corps noir, les mécanismes de transitions quantiques dans la structure de bande des semi-conducteurs et la statistique des porteurs dans ces matériaux qui est à la base de l'émission et de la détection infrarouge. On peut réaliser (à l'aide de deux hétérojonctions) un profil de potentiel qui confine le mouvement des électrons dans une direction (le comportement d'un électron dans un puits quantique est très similaire à celui d'une onde électromagnétique dans un guide optique). Le mouvement des électrons est alors quantifié dans cette direction (celle de la croissance de la couche de semi-conducteur) et les niveaux d'énergie correspondant aux mouvements des électrons dans ce sens sont discrets ; il y a apparition de sous-bandes d'énergie. Lorsque des photons arrivent sur le puits quantique ils provoquent des transitions optiques entre ces sous-bandes, ils peuvent ainsi être détectés, c'est le principe des détecteurs à puits quantiques (que l'on appelle QWIP pour Quantum Well Infrared Photodetecto). Inversement, lorsque des électrons passent d'une sous-bande permise à une autre, ils émettent des photons, on réalise ainsi un laser dit à cascade quantique (que l'on appelle QCL pour Quantum Cascade Laser). Une variation de dopage entraîne une variation entre les niveaux énergétiques et, par conséquent, permet d'ajuster la longueur d'onde détectée ou émise. Cette capacité à réaliser un puits quantique dont les propriétés électroniques sont ajustables au gré de l'utilisateur, est à l'origine de l'ingénierie quantique. Si l'on confine le mouvement des électrons dans une direction supplémentaire on crée un véritable guide d'onde électronique appelé fil quantique. On peut poursuivre le raisonnement et imaginer un potentiel confinant les électrons dans les trois dimensions, on parle alors de boîte quantique ou de superatome artificiel (les états des électrons sont en effet complètement liés et présentent un spectre discret).



Laser à cascade quantique (QCL).
© Thales TRT.



signes encourageants existent grâce au noyau de hafnium 178 qui semble être le plus propice à « laser ».

Des lasers de toutes les puissances

La course à la puissance s'est développée très rapidement et est intimement liée à celle des pulses courts, puisque la puissance (P) est inversement proportionnelle à la durée (τ) du pulse ($P = E/\tau$, E étant l'énergie du laser). Des durées de pulse de quelques dizaines de femtoseconde, associées à des énergies de l'ordre du joule donnent des puissances de plusieurs térawatt (prenons par exemple $\tau = 100$ fs et $E = 1$ J, on obtient $P = 10$ TW). L'un des intérêts est de produire des champs électriques très élevés en concentrant le faisceau sur une très petite surface⁵. Pour des lasers très intenses, le champ électrique associé à l'onde lumineuse peut être plus grand que le champ électrique qui existe dans un atome entre un électron et le noyau ($\sim 10^{11}$ V/m). Ce seuil qui correspond à une puissance surfacique de 2×10^{19} W/m² (mais on raisonne le plus souvent en exprimant la puissance surfacique en W/cm², ce qui donne ici 2×10^{15} W/cm²) est dépassé depuis plusieurs années. Si l'on focalise le faisceau d'un laser Pétawatt (1 PW = 1000 TW = 2×10^{15} W) sur une surface de 1 mm² on obtient 10^{17} W/cm², soit cinquante fois plus que le seuil qui vient d'être évoqué. Les lasers actuels les plus puissants sont précisément de la classe Pétawatt, la focalisation obtenue par l'utilisation de miroirs déformables a permis d'atteindre la valeur de $0,85 \times 10^{22}$ W/cm², soit un champ associé de près de 2×10^{14} V/m. Un tel champ est proche de celui nécessaire pour créer une paire électron-anti-électron (le seuil est d'environ 10^{23} W/cm²), ainsi un faisceau laser colimaté permettrait de créer de l'anti-matière.

Les lasers de puissance peuvent avoir des dimensions impressionnantes. C'est le cas des lasers destinés à faire de la fusion thermonucléaire. Le principe consiste à concentrer des faisceaux laser sur une petite bille solide (de moins de 1 mm de diamètre) faite d'un mélange de deutérium-tritium (deux isotopes de l'hydrogène, l'un possède un neutron, l'autre deux) maintenu à quelques degrés kelvin. La petite bille implose, l'effet de compression augmente sa température jusqu'à ... une centaine de millions de degrés. La fusion thermonucléaire se déclenche alors et libère une grande quantité d'énergie. Deux projets dans le monde existent, l'un français, le Laser Méga Joule (LMJ), l'autre américain, le NIF (National Ignition Facility). Ces deux projets

⁵ On peut montrer que le champ électrique E (exprimé en V/m) est relié à la puissance par unité de surface P_S (exprimée en W/m²) par la relation $E = \sqrt{377P_S}$.



sont assez proches et des coopérations fructueuses sont mises à profit. Le laser est appelé méga joule car l'énergie de l'impulsion est d'environ 2 MJ, ce qui est une énergie faible (celle nécessaire par exemple à faire chauffer une tasse de café) mais comme elle est libérée en un instant très court la puissance instantanée est énorme, jusqu'à 1000 TW crête (soit 100 fois la puissance électrique mondiale consommée !) Quelques chiffres donnent l'ampleur du projet : le laser est constitué de 240 faisceaux de 140 m de long, 40 tonnes de verre dopé au néodyme sont nécessaires pour la réalisation des amplificateurs, 1500 miroirs sont placés sur les voies optiques, 8000 équipements doivent être synchronisés à chaque tir (dont certains à 15 ps près), etc. et le coût du laser est de l'ordre du milliard d'Euros.

Inversement, les lasers peuvent maintenant être si considérablement miniaturisés qu'on envisage de les mettre en œuvre pour la transmission de données depuis l'intérieur d'un composant vers l'extérieur. Une source de lumière électroluminescente émettant des photons un par un a été réalisée récemment (2002), et le laser à photon unique est pour bientôt. La dimension de ces lasers est de moins de 10 μm , c'est-à-dire cinq fois plus petit que l'épaisseur d'un cheveu.

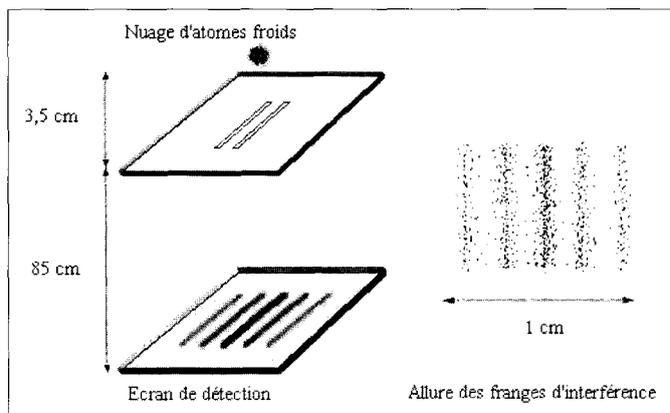
Un nouveau type de laser, le laser à atomes

Les ondes de matière : de l'électron aux molécules

D'après la relation de de Broglie, les particules sont aussi des ondes. La première démonstration expérimentale qui en a été faite est la diffraction des électrons. Puis le caractère ondulatoire des électrons a été mis à profit dans les microscopes électroniques. Des expériences d'interférence classique, telles que les fameux trous d'Young, ont également été réalisées avec des électrons. Les électrons « tombent » sur deux fentes, la conception classique consiste à penser que l'électron est passé soit par une fente soit par l'autre. Eh bien non, l'électron se comporte bien comme une onde, comme le ferait une vague arrivant sur un mur percé de deux orifices. Derrière ce mur, on voit des vaguelettes s'enchevêtrer et former « une figure d'interférence ». De la même façon les électrons interfèrent et on observe sur un écran des zones denses en électrons, dans d'autres zones, au contraire, il y a absence d'électrons. Une expérience spectaculaire consiste à refaire l'essai en envoyant les électrons un par un. On peut les observer individuellement sur l'écran (on peu



Expérience des fentes d'Young avec un nuage atomique.
© ENS.



voir alors leur aspect corpusculaire), mais si l'on attend suffisamment longtemps les franges d'interférence se dessinent ! Les neutrons, plus massifs, se comportent de même : on peut faire des interférences neutroniques. De tels interféromètres à neutrons sont utilisés pour faire des mesures de physique très précises. Plus récemment encore, des interférences entre atomes ont pu être observées. L'expérience est similaire à celle des trous d'Young, en faisant « tomber » des atomes « froids » (température inférieure au millième de degré kelvin), sur deux fentes (séparées l'une de l'autre de quelques microns), on peut observer des franges d'interférence atomique. L'expérience confirme pleinement la relation de de Broglie entre longueur d'onde et quantité de mouvement ($\lambda = h/p$). De la même façon que l'on peut mettre à profit les interférences entre des photons issus d'un laser pour faire des mesures très précises d'angle (ce principe est utilisé dans les gyromètres laser qui équipent les centrales inertielles des avions), il est aussi possible d'utiliser des interférences atomiques. On parle alors de gyroscope atomique. Les premières expériences de ce type datent de 1991. À l'heure actuelle, les gyroscopes atomiques de laboratoire rivalisent en précision avec les meilleurs gyromètres laser (soit environ la rotation d'un angle de 3 millièmes de degré en un jour !).



Mirage quantique.
© IBM Almaden Research Center.

Manipulation d'atomes et mirage quantique

La découverte, au début des années 80, du microscope à effet tunnel, a permis de voir les atomes. Peu de temps après, le développement du microscope à force atomique a autorisé une possibilité supplémentaire, celle de manipuler les atomes. Cette manipulation d'atomes a conduit récemment à une expérience saisissante montrant la réalité des ondes atomiques. Pour la comprendre, nous allons faire une analogie avec



l'optique. Si l'on considère un miroir elliptique, et si l'on met une source lumineuse à l'un des foyers de l'ellipse, alors toutes les ondes repassent par l'autre foyer (cette configuration a été mise à profit dans le premier laser : une lampe flash était placée à l'un des foyers d'un miroir elliptique et un barreau de rubis à l'autre, ainsi tous les rayons émis par la lampe flash étaient utilisés pour assurer le pompage du barreau de rubis). On considère un miroir elliptique dont la partie réfléchissante est constituée d'atome métallique (dans l'expérience décrite ici, il s'agit de 48 atomes de fer disposés sur une ellipse de 73 \AA de demi-grand axe). Si l'on dispose un atome supplémentaire en un point quelconque situé à l'intérieur de l'ellipse, une photo prise au microscope électronique permet de le voir (ainsi que les 48 atomes constituant la paroi de l'ellipse). Si maintenant on dispose cet atome à l'un des foyers de l'ellipse, on observe sur la photo deux atomes, chacun à l'un des foyers de l'ellipse ! Ce résultat étrange est prévu par la mécanique quantique : l'onde associée à l'atome placé à l'un des foyers se réfléchit sur la paroi de l'ellipse et se focalise sur l'autre foyer. Ainsi, la probabilité de présence de cet atome au second foyer est très grande et on observe également l'atome au second foyer. Cette observation est quelquefois appelée mirage quantique car elle est semblable au phénomène de mirage.

Lasers à atomes

Venons-en au laser à atomes. Comme la lumière, les atomes sont des ondes et, de plus, si leur spin est entier ils peuvent s'agglutiner (ils sont alors tous dans un même état quantique). On dit qu'ils forment un condensat de Bose-Einstein. Einstein avait en effet prévu, dès 1924, que les particules de spin entier (des bosons), échappant au principe d'exclusion de Pauli, pouvaient s'« agglutiner » pour former un condensat justement nommé « condensat de Bose-Einstein ». Depuis quelques années, la condensation de Bose-Einstein d'atomes de gaz par refroidissement laser a été effectivement observée à des températures records inférieures à 10^{-7} K. Les atomes sont dans un état cohérent comme les photons d'un laser. On peut donc parler de « laser à atomes » (le rôle des photons du laser est ici remplacé par des atomes de spin entier). Les premières expériences d'un tel laser à atomes datent de 1995. Elles confirment les prévisions et la cohérence du faisceau a pu être démontrée. Des applications sont d'ores et déjà envisagées, telles que la lithographie des composants électroniques ultimes.



Quelques autres conséquences de la mécanique quantique

John Wheeler disait, au moment des célébrations du centenaire de l'introduction des quanta par Max Planck, qu'« *on ne pouvait pas imaginer qu'un siècle plus tard le tiers du produit national brut de la première puissance mondiale proviendrait en ligne directe d'applications de cette découverte* ». Les conséquences sont en effet innombrables. Nous ne présenterons ici que trois aspects : les semi-conducteurs qui ont révolutionné notre vie quotidienne, et deux manifestations macroscopiques du comportement étrange des phénomènes quantiques, la supraconduction et la superfluidité.

Les semi-conducteurs

Dans l'atome de Bohr, les électrons ne peuvent avoir que des énergies discrètes, quantifiées. L'électron ne peut pas posséder d'énergie intermédiaire à deux énergies « autorisées ». Si maintenant l'on considère un grand nombre d'atomes dans un cristal, il apparaît un phénomène similaire au niveau macroscopique. Les électrons peuvent se trouver soit dans une bande d'énergie correspondant à la « bande de valence » (où ils sont liés aux ions du cristal), soit dans la bande d'énergie correspondant à la « bande de conduction » (où ils sont libres de se mouvoir). Dans un semi-conducteur, ces deux bandes ne se recouvrent pas. La bande de valence correspond à l'énergie la plus basse et, entre elle et la bande de conduction, il existe une « bande interdite » (ou gap). Si l'agitation thermique est suffisante, des électrons de la bande de valence peuvent « sauter » dans la bande de conduction. Autrement dit, si l'on chauffe un semi-conducteur, sa conductivité électrique augmente, contrairement à ce qui se passe dans un métal (pour lesquels les deux bandes, de valence et de conduction, se chevauchent). Les semi-conducteurs fonctionnent sur un principe quantique, directement issu de l'atome de Bohr.

Dans une conférence tenue en décembre 1959, le physicien américain Feynman s'était interrogé sur la possibilité de faire tenir les collections de la bibliothèque du Congrès, du British Museum et de la bibliothèque nationale – soit 24 millions de volumes – sur une tête d'épingle de 1,5 mm de diamètre. Cet exemple à l'appui, il avait circonscrit les principales problématiques de ce qu'est devenue la microélectronique et de ce que sont appelées à devenir les nanotechnologies.



La microélectronique a fait ces quarante dernières années des progrès fulgurants. Le constat est sans appel : aucune autre branche n'a vécu, dans l'histoire de l'industrie manufacturière, un tel développement, notamment si l'on considère l'évolution des performances des produits, i.e. les circuits intégrés, et, dans le même temps, la diminution drastique des coûts de fabrication par fonction élémentaire intégrée. L'industrie des semi-conducteurs doit cet essor considérable à sa capacité technologique à miniaturiser sans cesse les composants élémentaires des circuits, au premier rang desquels on trouve le transistor MOS (Metal-Oxide-Semiconductor) à effet de champ, véritable brique de base des circuits intégrés VLSI (Very Large Scale Integration). La diminution constante de la surface de silicium occupée par ces composants a donc permis de maintenir la course à l'intégration à un rythme édicté par la fameuse « loi de Moore » (Gordon Moore, co-fondateur de la firme Intel) qui prévoit que le nombre de transistors par circuit intégré double tous les 18 à 24 mois environ. Cette remarquable observation, formulée dès 1965, a été vérifiée jusqu'à présent. Alors qu'en 1971, le premier circuit d'Intel, comportait environ 2000 transistors, le processeur Itanium™ en comporte aujourd'hui plus de 200 millions, et les prochains microprocesseurs en contiendront plusieurs milliards dans un avenir proche. De la même façon, alors qu'en 1973 un million de transistors valait le prix d'un pavillon, ce même million de transistors vaut actuellement moins cher qu'une feuille de papier.



Tranche de
semiconducteur
(wafer).
© Tous droits
réservés.

La règle initiale de Moore est tellement bien vérifiée depuis les débuts de la microélectronique qu'elle est devenue, au fil des années, force de « loi » et qu'elle a fini par s'imposer comme une prédiction à caractère quasi déterministe. Cependant, pour la première fois depuis plus de quarante ans, la course à l'intégration est sur le point de se heurter à des limites d'ordre physique et technologique. Le transistor conventionnel ne parviendra probablement pas à surmonter ces problèmes au-delà de l'horizon 2008-2010. Des solutions qui permettent de ne pas trop s'éloigner de la loi de Moore sont toutefois entrevues jusqu'à l'horizon 2015-2016. Curieusement c'est un effet quantique, l'effet tunnel (voir encadré chapitre 4), qui interdira d'exploiter au-delà cette filière si prolifique.

La supraconductivité

Le physicien hollandais Heike Kammerlingh Onnes découvre en 1911, juste après avoir réussi à liquéfier l'hélium, que la résistance électrique du mercure devient nulle en dessous d'une température égale à 4,2 K (soit environ -269 °C). Il vient de découvrir la supraconductivité.



L'année suivante, il s'aperçoit qu'un corps ne peut devenir supraconducteur qu'à une triple condition : sa température doit être inférieure à une température dite critique, la densité de courant⁶ qui circule dans le conducteur doit être inférieure à une certaine valeur (densité de courant critique) et il ne doit pas être plongé dans un champ magnétique trop important (champ magnétique critique).

Il faut attendre 1957 pour que trois physiciens, Bardeen, Cooper et Schrieffer interprètent ce phénomène de façon quantique. Les électrons s'apparient deux à deux, ces paires, dites paires de Cooper, sont alors des bosons (leur spin⁷ est un entier, puisque qu'elles sont formées de deux électrons de spin $\frac{1}{2}$), par conséquent elles subissent une sorte de condensation d'Einstein, elles échappent au principe d'exclusion de Pauli et se trouvent dans un même état quantique. Cette théorie (appelée BCS des initiales des trois chercheurs) sera brillamment confirmée.

Le phénomène est particulièrement spectaculaire. On a ainsi réussi à montrer qu'un courant envoyé dans une boucle pouvait y tourner pendant plus de deux ans après que l'on ait coupé le générateur. On a longtemps pensé que la supraconductivité ne pouvait avoir lieu qu'à très basse température, et de fait, la plus haute température de transition connue en 1985 était de 25 K (~ -250 °C). Mais, en 1986 à la surprise générale, deux chercheurs d'IBM, Bednorz et Müller découvrent le premier « supraconducteur haute température ». Par haute température on entend une température supérieure à celle de l'azote liquide (-77 K, soit -196 °C), car son coût étant très faible (de l'ordre de 0,1 € par litre), cela permet d'envisager une utilisation assez large de ces supraconducteurs. Il faut noter que des signes de supraconductivité sont observés à des températures beaucoup plus élevées : -33 °C et peut-être même $+8$ °C !

Toutefois, aujourd'hui, ce sont les supraconducteurs basse température qui sont les plus utilisés. La principale application est la réalisation d'aimant supraconducteur : on fait passer un courant dans un supraconducteur, ce qui crée un champ magnétique. C'est ainsi que sont réalisés les systèmes d'imagerie médicale par résonance magnétique nucléaire (IRM). Le principe consiste à détecter les protons de l'hydrogène grâce à l'orientation de leur spin dans un champ magnétique intense produit par un aimant supraconducteur. On peut ainsi faire des cartographies des parties riches en eau (on détecte donc les noyaux d'hydrogène de H_2O) du corps. Près de 2000 systèmes IRM sont vendus par an, ce qui représente un marché de 5 milliards de dollars.

⁶ C'est-à-dire le courant par unité de surface.

⁷ Voir chapitre 4.



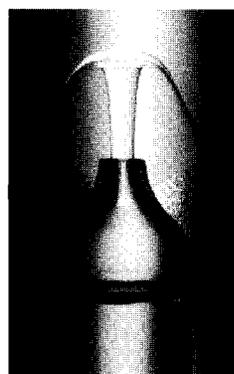
L'accélérateur de particules en cours de construction au CERN, le LHC (Large Hadron Collider) est également un gros consommateur d'aimant supraconducteur (refroidi à 1,8 K), il en faut 1200 tonnes pour produire le champ magnétique qui permettra de courber les particules sur les 27 km de circonférence de cet accélérateur ! Les futurs réacteurs de fusion thermonucléaire contrôlée sont aussi demandeur de champ magnétique intense (cette fois pour confiner le plasma de plusieurs dizaines de millions de degrés nécessaire à l'obtention de la réaction de fusion).

D'autres projets utilisant la supraconduction sont à l'étude. Le plus spectaculaire est sans doute le train à lévitation magnétique japonais, Maglev. Le principe consiste à équiper le train d'aimants supraconducteurs. Ces aimants interagissent avec des bobines supraconductrices situées dans le rail de guidage. La force de répulsion soulève le train de 10 centimètres au-dessus de la voie. Le prototype d'un tel train a atteint la vitesse de 552 km/h en 1999. Un prototype de navire, de 260 tonnes, japonais également, utilisant la propulsion Magnéto Hydro Dynamique (MHD) a été réalisé et a effectué ses premiers essais en rade de Kobe. Le principe consiste à utiliser la force de Laplace subie par un fluide conducteur (l'eau de mer en l'occurrence) en présence d'un champ magnétique (créé par un aimant supraconducteur) pour mettre le bateau en mouvement. La transmission de courant électrique par des câbles supraconducteurs fait aussi l'objet d'intenses recherches, la difficulté principale étant de trouver un matériau possédant une densité de courant critique très élevée.

Les supraconducteurs haute température pourraient quant à eux trouver des débouchés intéressants en électronique, en particulier pour la réalisation de filtres fréquentiels très performants.

La superfluidité

Le physicien russe Piotr Kapitza observe en 1937 le comportement « superfluide » (le terme est de lui) de l'hélium 4 en dessous de 2,17 K. Dans l'état superfluide, l'hélium possède une conductivité thermique énorme (de la même façon que la conductivité électrique d'un supraconducteur tend vers l'infini). De plus, il perd toute viscosité et se déplace sans frottement. Dans certaines conditions, l'hélium superfluide semble défier les lois de la pesanteur et monte le long des parois du verre dans lequel il a été versé et flotte un moment dans l'air avant de retomber à l'extérieur. L'interprétation de ces phénomènes repose encore sur la notion de condensation de Bose-Einstein. L'hélium 4 possède en effet un spin entier (il a un nombre pair de particules de spins demi-entier : 2 protons, 2 neutrons et 2 électrons, chacun de spin $\frac{1}{2}$).



Effet fontaine d'un super fluide.
© CERN.



En 1972, les physiciens mettent en évidence un phénomène encore plus étrange : la superfluidité de l'hélium 3 pour une température inférieure à 2,7 mK. Cette fois l'hélium 3 a un spin demi-entier (il possède un neutron de spin $\frac{1}{2}$ de moins que l'hélium 4), et c'est un mécanisme un peu semblable à celui des paires de Cooper (regroupement deux par deux des atomes d'hélium 3) qui est à l'origine de ce comportement.



8

2005, vers une nouvelle ère

Résumons-nous

Les trois thèmes étudiés par Einstein lors de son année miraculeuse de 1905, la relativité, les quanta et les atomes, sont toujours aussi vivants un siècle plus tard et sont intimement liés. La quête menée par Einstein d'une théorie unitaire rassemblant toutes les interactions est également plus que jamais d'actualité. Résumons les principales étapes survenues lors de la première moitié du vingtième siècle.

La première quantification

L'année 1900 marque le début d'une nouvelle ère avec l'introduction, par Max Planck, de sa fameuse constante h . Les tentatives de Planck pour faire disparaître cette constante encombrante se sont toutes soldées par un échec et c'est Einstein qui en a donné, en 1905, la première interprétation physique : la lumière n'est pas seulement une onde, c'est également un corpuscule, possédant une énergie $E = h\nu$, que l'on appellera par la suite photon. L'étude du mouvement Brownien par Einstein a permis, en 1911, au français Jean Perrin d'asseoir définitivement la notion d'atome et Niels Bohr le quantifiera en 1913. L'expérience a montré en 1921 que même l'espace était quantifié, en ce sens où un vecteur ne peut pas pointer dans n'importe quelle direction, mais

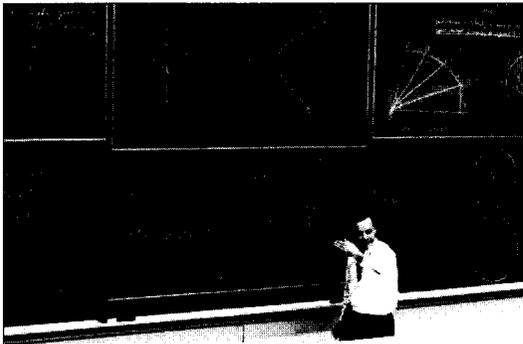


seulement dans certaines qui sont autorisées par des règles quantiques. Peu après, Louis de Broglie prolongea les idées d'Einstein en proposant l'idée que les particules devaient également être des ondes. Ainsi, le monde devenait dual, à la fois ondulatoire et corpusculaire, il existe sous une forme complémentaire, pour reprendre le terme de Bohr. Il devenait grand temps de mettre de l'ordre dans tout cela, c'est ce que firent Heisenberg et Dirac en élaborant une *mécanique quantique*. Le formalisme en était toutefois si compliqué que même les meilleurs physiciens avaient du mal à se comprendre entre eux. L'Autrichien Schrödinger leur mis du baume au cœur en construisant une équation élégante, simple et qui avait l'immense mérite de ressembler aux équations traditionnelles, disons le mot : classiques, de la physique. Le répis sera de courte durée, la même année, Max Born montra que les solutions de cette équation devaient être interprétées en terme de probabilité ! En 1927, lors de l'historique cinquième Conseil Solvay, une interprétation « orthodoxe » de la mécanique quantique était proposée, elle mettait fin à plusieurs siècles de déterminisme en physique. Ce congrès marqua aussi une scission entre les physiciens de cette nouvelle école, dont le leader incontesté était Bohr, et les physiciens qui ne pouvaient pas admettre l'abandon définitif du déterminisme qui se rangeaient sous la bannière d'Einstein. En dehors de cette question d'interprétation, il ne semblait pas très raisonnable d'avoir une mécanique quantique non relativiste. C'est de nouveau Dirac qui signa, en 1928, la première équation à la fois quantique et relativiste, elle se révélera être une véritable mine d'or contenant deux très grosses pépites. L'une était la possibilité d'introduire de façon naturelle la notion de spin, l'autre était la prédiction de l'existence d'anti-matière. La première trace d'anti-matière sera découverte en 1932 sous la forme d'anti-électrons (aussi appelé positrons). L'équation de Dirac marquait la fin d'une période connue sous le nom de *première quantification*. Pour comprendre ce terme, il faut se référer aux travaux fondateurs de Lorentz en électromagnétisme. Il avait interprété les équations de Maxwell de l'électromagnétisme de façon très profonde en décrivant la coexistence entre le champ (électromagnétique) et les particules (chargées) en interaction avec ce champ. Ces particules, les électrons, étaient d'ailleurs la première introduction de la discontinuité en physique puisque leur charge était quantifiée (une charge électrique doit être un multiple entier de la charge e de l'électron). Mais en 1928, la théorie des quanta étant maintenant bien établie, une nouvelle question était soulevée : le champ lui-même devait être quantifié, il fallait opérer une « *seconde quantification* ». Les premiers travaux dans ce sens ont été effectués par des physiciens que l'on a déjà eu l'occasion de rencontrer : Dirac, Heisenberg, Jordan, Pauli, puis Fermi à partir de 1932. La tâche pour établir cet électromagnétisme quantifié (que l'on appelle électrodynamique quantique) allait se révéler colossale.



L'électrodynamique quantique

La construction de cette nouvelle théorie se heurtait à une difficulté majeure, celle de l'apparition de quantité infinie dans les calculs. L'origine est d'ailleurs simple à comprendre : le champ électrique produit par un électron est inversement proportionnel au carré de la distance à cet électron (on dit que le champ est en $1/r^2$), donc si l'on cherche à calculer l'interaction du champ produit par l'électron sur lui-même, on est amené à considérer une distance nulle, d'où un champ infini. C'est par un moyen très détourné que Feynman trouvera la solution : il réécrit tout simplement la mécanique quantique d'une manière entièrement nouvelle en introduisant la notion de *propagateur*. Nous ne décrivons pas ces propagateurs de Feynman, nous nous contenterons de rapporter une anecdote illustrant le fait que Feynman, comme il le disait lui-même connaissait alors « toutes les façons possibles de modifier l'électrodynamique quantique connue par l'humanité à cette époque ». La scène se passe lors d'une conférence de physique tenue à Shelter Island, dans l'état de New York. Un physicien, Slotnick, expose un calcul d'interaction entre un électron et un neutron, et comme il est habituel dans ce type de réunion, un débat s'engage à la fin de la présentation. Le soir, Feynman refait le calcul et le lendemain il va voir le conférencier et lui dit : « Slotnick, j'ai fait le calcul hier soir et je voudrais voir si j'ai les mêmes résultats que vous... Hier soir, répond Slotnick, mais il m'a fallu six mois ! »



Richard Feynman
(1918-1988).
© CERN.

Dans la nouvelle théorie, que l'on appelle en anglais QED (pour Quantum Electro Dynamics), qui est également l'acronyme de la locution latine « Quod Erat Demonstrandum » (ce qu'il fallait démontrer !), les infinis disparaissent par un processus appelé « renormalisation ». Bien que Feynman n'ait jamais été satisfait de cette méthode (il dira lors de sa conférence Nobel en 1965 : « Je pense que la théorie de la renormalisation est juste un moyen de masquer les difficultés dues aux divergences de



l'électrodynamique quantique ; ça revient à cacher la poussière sous le tapis »), elle se révélera extrêmement efficace. Cette efficacité peut être illustrée par la précision des déductions, ainsi un certain facteur de la physique atomique, appelé « facteur de Landé » [du nom de Alfred Landé] est mesuré à quelques 10^{-12} près ($g = -2,002\ 319\ 304\ 3718$) et cette valeur est en plein accord avec les calculs de l'électrodynamique quantique.

De nouvelles interactions

Pendant l'élaboration de l'électrodynamique quantique, la physique s'est enrichie de deux nouveaux types d'interaction : l'interaction faible et l'interaction forte qui venaient s'ajouter aux deux autres interactions déjà connues : la gravitation et l'électromagnétisme. L'introduction de l'interaction faible avait été rendue nécessaire pour interpréter certains phénomènes radioactifs (en particulier ce que l'on appelle la désintégration β). C'est le physicien italien Enrico Fermi qui allait, en 1934, en donner la première théorie. La faiblesse de cette interaction (d'où son nom) permettait de rendre compte des périodes de désintégration radioactive observées.

Tableau des quatre interactions fondamentales.

Dates	Cadre théorique	Gravitation	Électromagnétisme	Interaction faible	Interaction forte
17 ^e siècle	Gallée, Newton	Newton			
18 ^e siècle	Euler, Lagrange, Jacobi, Hamilton		Maxwell		
1895-1896			Rayons X, électron, radioactivité		
1900-1930	Mécanique quantique				
1905-1915	Relativité	Einstein			
1930-1950	Théorie quantique des champs		QED	Fermi	Yukawa
1960-2002	Le modèle standard	Big bang	Théorie électrofaible de Glashow, Salam et Weinberg		QCD Nobel 2004

Synthèse des interactions subies par les particules.

Interaction	Particules impliquées	Charge	Boson
Forte	Quarks	Couleur	Gluons
Électromagnétique	Quarks, leptons chargés	Charge électrique	Photon
Faible	Quarks, leptons chargés et neutrinos	Isospin faible	Bosons vecteurs intermédiaires, W^+ , W^- , Z^0
Gravitation	Toutes les particules	Énergie	Graviton

L'autre interaction est, quant à elle, nécessaire pour expliquer la cohésion des noyaux. Comment comprendre qu'ils soient stables malgré la répulsion coulombienne (gigantesque) des protons qui les constituent, si ce n'est en admettant qu'elle est compensée par une force encore plus grande ? Nous avons vu, au chapitre 4, qu'en 1934 le jeune physicien japonais Hideki Yukawa avait introduit l'hypothèse de l'existence d'une particule de masse intermédiaire entre celle de l'électron et du proton pour interpréter cette force. Cette particule, le méson π , sera finalement découverte en 1947 à peu près au moment de la finalisation de l'électrodynamique quantique.

Le modèle standard

La gravitation bénéficiait d'une théorie très performante, la relativité générale (ou gravitation relativiste) élaborée par Einstein. Certes ce n'était pas une théorie quantique, mais la gravitation ne se ressent qu'aux grandes échelles, elle est tout à fait négligeable à l'échelle atomique là où opèrent les phénomènes quantiques. L'électromagnétisme venait de trouver son modèle quantique, l'EDQ. Il restait à élaborer la théorie de l'interaction forte et celle de l'interaction faible, si possible dans un format pas trop éloigné de celui de l'EDQ. Cela allait être fait dans les années 60 et au début des années 70.

La chromodynamique quantique

C'est en 1973 que trois chercheurs américains, David Gross, son élève Frank Wilczek et David Politzer finalisent la théorie de l'interaction forte. Ils viennent de recevoir (fin 2004), le prix Nobel de physique en récompense de leur « découverte de la liberté asymptotique dans la théorie de l'interaction forte ». Nous avons vu que pour faire face à la « prolifération des hadrons » Gell-Mann avait, en 1964, introduit les quarks. De la même façon que les particules chargées interagissent entre elles par l'échange de photon, les quarks interagissent entre eux par l'échange de gluons. Mais alors que la charge électrique ne possède que deux valeurs (+ ou -), la charge associée à l'interaction forte en possède trois. Par analogie avec les trois couleurs fondamentales, ces charges ont été appelées charge de couleur, d'où le nom de Chromodynamique Quantique (CDQ) donné à la théorie de l'interaction forte. Lorsque les quarks sont proches les uns des autres, la force d'interaction est faible, ils se comportent comme des particules libres, on parle alors de « liberté asymptotique ». En revanche, plus leur distance relative est importante, plus leur force d'interaction augmente, un peu à la manière d'un



élastique. C'est la raison pour laquelle on ne peut pas isoler les quarks : plus on cherche à les séparer plus ils « s'attirent », en leur communiquant de l'énergie on ne peut obtenir qu'une gerbe de particules. Toutefois, les quarks sont mis en évidence de façon indirecte soit en créant un plasma de quarks et de gluons, soit en formant une particule (quarkonium) constituée d'un quark en orbite autour d'un anti-quark (de la même façon qu'un atome d'hydrogène est constitué d'un électron en orbite autour d'un proton). La liberté asymptotique, se traduit par le fait que plus l'énergie est élevée, plus l'interaction est faible. Cette propriété a été vérifiée de façon précise par l'expérience, la constante de couplage diminue bien avec l'énergie conformément à la loi prédite par la théorie. Ce comportement est essentiel pour l'unification des forces, comme nous le verrons plus tard.

L'interaction électrofaible

En 1956, deux chercheurs chinois, Lee et Yang, suggèrent que l'interaction faible distingue la droite de la gauche. La confirmation expérimentale de cette violation de la parité est faite en janvier 1957 par un autre chercheur chinois, la physicienne Wu. Ces deux découvertes donnent à Salam, Glashow et Ward, à la fin de 1958, l'idée d'unifier électromagnétisme et interaction faible. La tâche n'est pas simple car la théorie doit rendre compte de la violation de la parité pour les phénomènes faibles tout en étant compatible avec la conservation de la parité pour les phénomènes électromagnétiques. Une dizaine d'années sera nécessaire pour aboutir. Dans cette théorie, la première qui unifie deux interactions depuis Maxwell (qui avait réuni électricité et magnétisme), la force est due à l'échange de « bosons intermédiaires ». Cela généralise le schéma de l'électrodynamique quantique dans lequel l'interaction est due aux photons (qui rappelons-le est un boson, puisque de spin 1). Cependant les trois nouveaux bosons (appelés W^+ , W^- et Z_0) possèdent une masse (ce qui explique la très faible portée de l'interaction faible). Une nouvelle énigme devait être résolue : pourquoi l'un des bosons (le photon) est-il de masse nulle contrairement aux trois autres ? La réponse invoquée est celle d'une « brisure spontanée de symétrie » (voir encadré), suivant ainsi un mécanisme proposé par Higgs en 1963. Une première confirmation expérimentale est faite au CERN en 1973 (découverte des courants neutres par André Lagarrigue). En 1977, toujours au CERN, les « bosons intermédiaires » prévus (W^+ , W^- et Z_0) sont découverts par Carlo Rubbia : la théorie électrofaible triomphe.

Les composantes du modèle standard

Le modèle standard de la physique est constitué de la relativité générale pour la description de la gravitation, de la théorie électrofaible pour



Brisure de symétrie

Le refroidissement de l'Univers amène une interaction à se découpler en deux interactions, c'est ce qui semble s'être passé à la fin de la période d'inflation : l'état de grande unification se brise pour donner lieu à deux interactions (électrofaible et forte). On parle d'un changement d'état car le phénomène est analogue à ce que l'on rencontre en thermodynamique. Par exemple à pression ambiante, lorsque de la vapeur d'eau passe le seuil des 100 °C elle se condense : de l'eau liquide se forme. Inversement lorsque l'on chauffe un aimant au-dessus de sa température de Curie, il cesse d'être aimanté : on dit qu'il a subi une transition de phase (de la phase ferromagnétique à la phase paramagnétique). Abdus Salam (le physicien qui a construit avec Steven Weinberg et Sheldon Glashow la théorie électrofaible) donnait du processus de brisure spontanée de symétrie l'image suivante : considérons des convives assis autour d'une table ronde. Ils ont devant eux une assiette et des couverts, mais les verres sont placés symétriquement entre les assiettes. Rien ne favorise l'attribution du verre à un convive plutôt qu'à son voisin, mais dès qu'un convive a choisi entre les deux possibilités, le choix des autres convives est fixé. La symétrie gauche-droite du système a été brisée.

la description des interactions électromagnétique et faible, et de la chromodynamique quantique pour l'interaction forte. L'électrodynamique quantique, la chromodynamique quantique et la théorie électrofaible sont construites de façon semblable. Cependant, alors que la constante de couplage de l'interaction forte **diminue** avec l'énergie, la constante de couplage de l'électrodynamique quantique **augmente** avec l'énergie¹. Celle de la force faible augmente également avec l'énergie, mais plus rapidement que pour l'interaction électromagnétique, c'est pour cette raison que force électromagnétique et force faible se rejoignent en une seule force électrofaible (leurs constantes de couplage convergent vers une valeur unique à l'énergie d'unification) (voir encadré ci-après).

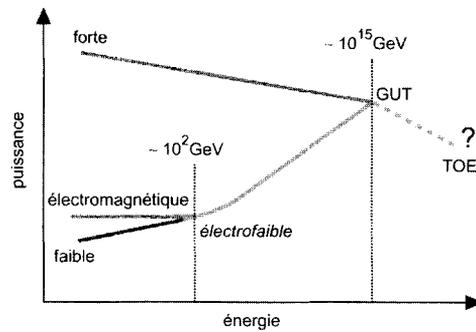
La masse des neutrinos : les limites du modèle standard

Nous avons vu que dans le cadre du modèle standard on distingue trois générations de particules, chacune constituée d'un doublet de quarks,

¹ Ainsi cette constante de couplage vaut 1/137 aux énergies habituelles contre 1/128 vers 100 GeV (qui correspond à l'énergie d'unification électrofaible).

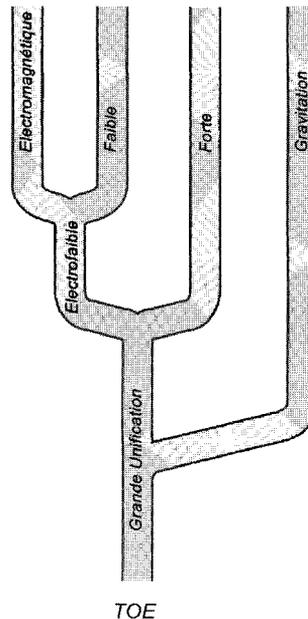


Unification des forces fondamentales



À haute énergie (100 GeV) il a été vérifié que les forces électromagnétique et faible s'unifiaient pour donner la force électrofaible. On suppose dans la théorie de grande unification (GUT) que, de la même façon, il y a unification des forces électrofaible et forte, mais cela se produit à une énergie (10^{15} GeV) qui est complètement hors d'atteinte des accélérateurs de particules présents et futurs. Au-delà il se produirait l'unification de cette force avec celle de la gravitation. Les quatre forces seraient alors réunies, c'est ce que l'on appelle la théorie du tout (ou TOE : Theory Of Everything !).

L'arbre de l'unification illustre la façon dont les interactions s'unifient.



et d'un doublet de leptons²: 1^{ère} génération = [(u, d) ; (e, ν_e)] ; 2^e génération = [(s, c) ; (μ , ν_μ)] ; 3^e génération = [(t, b) ; (τ , ν_τ)]. La version, dite minimale, du modèle standard impose une masse nulle aux neutrinos. Or nous savons maintenant que ce n'est pas le cas. L'histoire commence à la fin des années 60 lorsque Bruno Pontecorvo imagine un processus appelé « oscillations de neutrino ». Cette oscillation correspond à un changement de saveur spontané du neutrino, par exemple un neutrino électronique pourrait se transformer en neutrino muonique (suivant la réaction $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$), réaction qui n'est possible que si les neutrinos possèdent une masse. Dès 1946, Pontecorvo avait imaginé de détecter les neutrinos par la réaction $\nu + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}\text{Ar} + e$. Dans les années 60, le physicien américain Davis plaça dans un réservoir 615 tonnes de tétrachloréthylène (ce qui correspond à 2×10^{30} atomes de chlore) de façon à détecter les neutrinos en provenance du Soleil. Il calcula que, chaque mois, on pourrait détecter de l'ordre de vingt neutrinos, donc 20 atomes de chlore (sur 2×10^{30}) devaient se transformer en argon (en comparaison trouver un grain de sable particulier dans tout le Sahara est un jeu d'enfant !) Mais surprise, on détecte moins de neutrinos qu'attendu ! Le problème est de taille : faut-il renoncer au modèle décrivant le comportement du Soleil qui par ailleurs donne toute satisfaction ? Une explication possible est d'avoir recours à l'hypothèse des oscillations de neutrinos de Pontecorvo. La détection des neutrinos à l'aide du chlore (par la réaction mentionnée plus haut) n'opère que sur les neutrinos électroniques, or une partie des neutrinos (électroniques) issus du Soleil se transforme peut-être en chemin en neutrinos muoniques ou en neutrinos tauïques. L'expérience canadienne SNO a montré, en 2001 et 2002, que tel était bien le cas (contrairement aux expériences antérieures, SNO détecte toutes les saveurs de neutrinos, ν_e , ν_μ et ν_τ)³. Le modèle de fonctionnement du Soleil est donc sauvé, en revanche l'oscillation des neutrinos ne peut se produire que s'ils possèdent une masse, et donc il existe une faille dans le modèle standard qui prévoit que ces masses sont nulles. Cependant l'expérience ne donne pas directement accès aux masses des neutrinos, car l'oscillation dépend de la différence entre le carré des masses des deux saveurs de neutrinos qui oscillent. En faisant une hypothèse sur la hiérarchie des masses, on obtient les valeurs suivantes : $m(\nu_\tau) < 0,05 \text{ eV}$; $m(\nu_\mu) < 0,008 \text{ eV}$; $m(\nu_e) < ? \text{ eV}$. Ce sont des valeurs très faibles, le neutrino le plus lourd étant un million de fois plus léger que l'électron.

² Voir chapitre 4.

³ D'autres expériences récentes (études des neutrinos atmosphériques, expériences auprès de réacteurs nucléaires, etc.) confirment les oscillations.



Vers l'unification

La grande unification

La diminution avec l'énergie de la constante de couplage de l'interaction forte et l'augmentation avec l'énergie de la constante de couplage de l'interaction électrofaible, laissent penser qu'il existe une énergie à partir de laquelle ces deux interactions n'en font plus qu'une. Cette énergie est de l'ordre de 10^{15} GeV, au-delà on aurait une « grande unification » des interactions électromagnétique, faible et forte. Les premières « théories de grande unification » sont apparues dès 1974. Cette année-là, Stephen Glashow publie un article intitulé : « *L'unité de toutes les forces des particules élémentaires* ». Dans ces théories, de nouvelles particules, appelées « leptoquarks », relient le monde des leptons au monde des quarks, d'où leur nom. Comme il existe trois générations de quarks [(u, d) ; (s, c) ; (t, b)] et trois générations de leptons [(e, ν_e) ; (μ , ν_μ) ; (τ , ν_τ)], il existe également trois générations de leptoquarks (LQ_1 ; LQ_2 ; LQ_3). Ces particules possèdent une charge fractionnaire et une charge de couleur (comme les quarks) et peuvent être de spin nul (leptoquarks scalaires) ou de spin 1 (leptoquarks vecteurs). Ce sont des particules massives : les masses prédites par la théorie dépendent de leur type (scalaire ou vecteur), de la génération et ... de la théorie, mais sont situées dans la gamme de 150 à 350 GeV. Elles n'ont pas encore été détectées, mais quelques signatures observées lors d'expérience de physique des particules pourraient constituer les premiers signes de leur existence.

La grande unification prévoit par ailleurs que le proton devrait être instable, mais que l'on se rassure, cela ne remet pas en cause la stabilité de la matière à notre échelle et même à celle de l'Univers. Les premières théories de grande unification donnaient une durée de vie du proton de 10^{29} années soit... plus de dix milliards de milliards de fois (10^{19}) l'âge de l'Univers ! De nombreuses recherches sont menées depuis 1979 pour mesurer cette durée de vie (voir encadré). Ces expériences montrent que la durée de vie du proton doit être revue à la hausse. La valeur admise actuellement est supérieure à 2×10^{33} ans.

Dans les théories de grande unification il doit exister de nouveaux bosons, les « bosons X », qui lient les quarks et les leptons. Ces bosons X sont au nombre de huit, ils viennent compléter la déjà grande famille des bosons responsables des interactions forte (les huit gluons) et électrofaible (les bosons intermédiaires W^+ , W^- , Z_0 et le photon). Pour rendre compte de la très grande durée de vie des protons, ces bosons X doivent avoir une masse très grande. En effet, l'origine de



l'instabilité du proton est liée à la désintégration de l'un de ses quarks en un lepton par suite de l'échange d'un boson X. La durée de vie du proton constatée aujourd'hui conduit à attribuer aux bosons X une masse supérieure à 10^{15} GeV (soit 10 000 milliards de fois plus que celle de la particule la plus lourde aujourd'hui connue).

Mesurer la durée de vie du proton

On peut se demander comment mesurer une durée de vie aussi grande que celle attribuée au proton ! Le principe est simple : il « suffit » de rassembler 10^{33} protons (par exemple) et d'attendre que l'un d'entre eux veuille bien se désintégrer dans l'année. Une telle observation (une désintégration en un an pour 10^{33} protons) conduirait à une durée de vie de 10^{33} années. Naturellement des considérations de statistique et de bruit de fond imposent d'observer plusieurs événements. Dans l'expérience japonaise Super Kamiokande, environ 50 000 tonnes d'eau sont rassemblées dans une énorme cuve tapissée de plus de 11 000 photodétecteurs (qui détectent le signal issu de la désintégration). Il y a environ $7,5 \times 10^{33}$ protons dans Super Kamiokande, une durée de vie de 10^{33} ans conduirait donc à 7,5 désintégrations par an, en moyenne. Compte tenu de la surface couverte par les photodétecteurs (40 %) et de leur efficacité, cela se traduirait par un taux de 3 événements par an. Or aucun événement n'a été décelé, ce qui conduit à admettre que la durée de vie du proton est supérieure à 10^{33} ans. Des projets encore plus ambitieux sont imaginés, citons le projet UNO et son détecteur de 440 000 tonnes ainsi que le projet Hyper Kamiokande constitué de deux cylindres de 50 m de diamètre et de 250 m de long contenant 1 million de tonnes d'eau soit vingt fois plus que dans Super Kamiokande...



Le détecteur Super Kamiokande.
© Kamioka observatory.

La supersymétrie

À une énergie d'environ 10^{15} GeV il se produit une brisure de symétrie (dite de grande unification) qui se traduit, pour des énergies inférieures, en une séparation entre la force forte d'une part et la force électrofaible d'autre part. La même chose se produit à environ 100 GeV lorsque la brisure de symétrie électrofaible intervient, ce qui fait apparaître, pour des énergies inférieures, la force électromagnétique d'une part et la force faible d'autre part (rappelons qu'il s'agit d'un mécanisme semblable à celui qui intervient lorsque la température passant en dessous de 100 °C, la vapeur d'eau se transforme en liquide). Le problème est que l'on ne sait pas comment articuler ces deux mécanismes de brisure à des énergies aussi différentes.



Cette difficulté a fait resurgir l'idée de la *supersymétrie* qui était apparue dans les années soixante-dix. Il s'agit d'une nouvelle propriété de symétrie qui à chaque particule (fermion ou boson) associe un partenaire de l'autre statistique (boson ou fermion). À chaque fermion est associé un boson, son partenaire supersymétrique (ou sparticule). Les sfermions sont les sélectrons, sneutrinos, squarks. De la même façon, à chaque boson est associé un partenaire supersymétrique que l'on nommera en remplaçant la terminaison *-on* en terminaison *-ino* : les bosinos sont les photinos, gluinos, etc. Pour l'heure aucun partenaire supersymétrique de particule connue n'a été découvert, soit parce que leur masse est trop élevée, soit parce qu'ils interagissent trop faiblement, soit... parce qu'ils n'existent pas !

Cette absence d'observation n'a pas empêché les théoriciens de construire des extensions supersymétriques du modèle standard. La théorie la « plus simple » est le modèle standard supersymétrique minimal (MSSM pour « Minimal Supersymmetric Standard Model »). Elle redonne la totalité des résultats obtenus avec le modèle standard jusqu'à des énergies de 200 GeV (l'énergie du LEP), prédit l'existence des partenaires supersymétriques ainsi que de cinq bosons de Higgs. Les masses prédites pour ces particules rendraient possible leur découverte au LHC en cours de construction.

Supercordes et gravitation quantique

En théorie des cordes, les particules laissent la place à des objets unidimensionnels, les cordes. La théorie des cordes est apparue à la fin des années soixante pour décrire l'interaction forte. Les hadrons, qui subissent cette interaction, sont modélisés par des cordes dont les extrémités seraient les quarks. Si l'on tire trop sur la corde, elle casse et à chaque extrémité on retrouve un quark, de sorte qu'on ne peut pas isoler cette particule (de la même façon que l'on ne peut pas isoler un des pôles d'un aimant). L'interaction forte a finalement été décrite dans un autre cadre (la chromodynamique quantique que nous avons évoquée plus haut), mais la théorie des cordes s'est révélée avoir un potentiel extraordinaire.

La théorie des cordes s'est montrée en effet être capable de réconcilier la relativité générale et la mécanique quantique. Elle ne satisfait aux exigences de la mécanique quantique que si la dimension de l'espace-temps est de 26 (pour une théorie des cordes bosoniques) ou de 10 (pour une théorie des cordes supersymétriques). La théorie des cordes supersymétriques, ou supercordes (le qualificatif « super » venant de ce que ces cordes possèdent la propriété de supersymétrie) a pris le dessus. Cinq théories des cordes ont été développées, mais, au milieu des



années quatre-vingt dix, les physiciens ont pu montrer que toutes les théories des cordes « consistantes » sont des réalisations d'une hypothétique théorie unique, la « M-théorie ». Cette théorie est compatible, à basse énergie, avec le modèle standard de la physique pour les interactions non gravitationnelles et avec la relativité générale pour la gravitation. La taille des supercordes est voisine de la longueur de Planck (10^{-35} m), ce qui permet d'interpréter l'espace à dix dimensions. Six dimensions spatiales sont repliées : ainsi les observations faites à l'échelle observable (c'est-à-dire à ce jour un peu moins de 10^{-18} m) ne laissent voir que les trois dimensions spatiales usuelles, les autres étant inaccessibles compte tenu de leur petitesse (on peut faire l'analogie suivante : une corde vue de loin n'a qu'une seule dimension, alors que vue de près elle en possède trois).

À côté de la théorie des supercordes que nous venons d'évoquer, d'autres théories de la gravitation quantique s'affrontent : la théorie des « lacets » (Loop Quantum Gravity) et la théorie à géométrie non commutative. L'espace y est décrit par un « réseau de spin », l'espace-temps par une « mousse de spin », quant au temps il disparaît ! L'idée la plus spectaculaire est sans doute l'introduction d'une géométrie quantique. De la même façon que la description d'un gaz dans une boîte conduit à la notion de molécules (Boltzmann), la description du corps noir à la notion de grains d'énergie ou photons (Einstein, Planck), le magnétisme au spin (i.e. au quantum de magnétisme), la description des trous noirs exigerait la quantification de la géométrie elle-même ! Alors que la géométrie riemannienne est le cadre géométrique de la gravitation relativiste « classique » (relativité générale), la géométrie quantique serait celui de la gravitation quantique.

Ainsi, un siècle après l'année miraculeuse d'Einstein, la physique dispose d'un modèle standard pour les interactions électromagnétique, faible et forte. Mais ce modèle standard lui-même atteint ses limites, et la confirmation récente de la masse des neutrinos oblige les physiciens à le réviser. La théorie la plus élaborée aujourd'hui est la théorie des supercordes qui redonne comme cas limites le modèle standard d'une part, la relativité générale d'autre part. D'un autre côté, le modèle standard de la cosmologie, la théorie du Big Bang, progresse en particulier grâce aux possibilités et aux précisions sans cesse accrues des expérimentations. Les deux domaines, de la physique de l'infiniment petit et de la physique de l'infiniment grand s'enrichissent mutuellement. C'est le plus grand hommage que la physique pouvait faire à son illustre représentant Albert Einstein, puisqu'il est à l'origine à la fois de la physique quantique et de la cosmologie.



Liste des noms cités

D'Alembert, Jean le Rond (1717-1783)
Ampère, André Marie (1775-1836)
Anderson, Carl (1905-1991)
Angström, Anders (1814-1874)
Arago, François (1786-1853)
Aristote (384-322 av. J.-C.)
Arrhenius, Svante (1859-1927)
Avogadro, Amedeo (1776-1856)

Banks, Sir Joseph (1743-1820)
Becquerel, Henri (1852-1908)
Bernoulli, Daniel (1700-1782)
Berthollet, Claude (1748-1822)
Berzelius, Jons Jacobson (1779-1848)
Besso, Michele (1873-1955)
Biot, Jean-Baptiste (1774-1862)
Bohr, Niels (1885-1962)
Boltzmann, Ludwig (1844-1906)
Born, Max (1882-1970)
Bose, Satyendra Nath (1894-1974)
Boyle, Robert (1627-1691)
Bradley, James (1693-1762)
Bragg, William Henry (1862-1942)
Bragg, William Lawrence (1890-1971)
Brillouin, Léon (1889-1969)
Broglie, Louis de (1892-1987)
Broglie, Maurice de (1875-1960)
Brown, Robert (1773-1858)
Buffon, Georges (1707-1788)

Carnot, Sadi (1796-1832)
Cauchy, Augustin Louis (1789-1857)
Cavendish, Henri (1731-1810)
Clairaut, Alexis Claude (1713-1765)
Clapeyron, Emile (1799-1864)
Clausius, Rudolf (1822-1888)
Compton, Arthur (1892-1962)
Copernic, Nicolas (1473-1543)
Coulomb, Charles (1736-1806)
Curie, Pierre (1859-1906)
Curie, Marie (1867-1934)
Cuvier, Baron Georges (1769-1832)

Dalton, John (1766-1844)
Davisson, Joseph (1881-1958)
Démocrite (460-370 av. J.-C.)
Descartes, René (1596-1650)



Dicke, Robert (1916-)
 Dirac, Paul (1902-1984)
 Dumas, Jean-Baptiste (1800-1884)
 Doppler, Christian (1803-1853)
 Drude, Paul (1863-1906)

Eddington, Arthur (1882-1944)
 Ehrenfest, Paul (1880-1933)
 Einstein, Albert (1879-1955)
 Einstein, Eduard (1910-1965)
 Einstein, Elsa (1876-1936)
 Einstein, Hans Albert (1904-1973)
 Einstein, Maja (1881-1951)
 Einstein, Mileva (née Maric) (1875-1948)
 Elizabeth, reine de Belgique (1876-1965)
 Empédocle (493-433 av. J.-C.)
 Eötvös, Baron Lorand von (1848-1919)
 Euler, Leonhard (1707-1783)

Faraday, Michael (1791-1867)
 Fermi, Enrico (1901-1954)
 Feynman, Richard (1918-1988)
 Fitzgerald, George (1851-1901)
 Fizeau, Hippolyte (1819-1896)
 Foucault, Léon (1819-1868)
 Fourier, Joseph (1768-1830)
 Franck, James (1882-1964)
 Fresnel, Augustin (1788-1827)
 Freundlich, Erwin (1885-1964)
 Friedmann, Alexandre (1888-1925)

Galilée (1564-1642)
 Galvani, Luigi (1737-1798)
 Gamov, George (1904-1968)
 Gauss, Carl Friedrich (1777-1855)
 Gay Lussac, Joseph Louis (1778-1850)
 Gell-Mann, Murray (1929-)
 Gibbs, Josiah (1844-1906)
 Glashow, Sheldon (1932-)
 Grossmann, Marcel (1878-1936)
 Groves, Leslie, Général (1896-1970)

Habitch, Conrad (1876-1958)
 Hahn, Otto (1879-1968)
 Hallwachs, Wilhelm (1859-1922)
 Halban, Hans (1908-1964)
 Halley, Edmund (1656-1742)
 Hamilton, Sir William Rowan (1805-1865)
 Heaviside, Oliver (1850-1925)
 Heisenberg, Werner (1901-1976)
 Helmholtz, Hermann von (1821-1894)
 Herschel, William (1738-1822)
 Hertz, Gustav (1887-1975)
 Hertz, Heinrich (1857-1894)
 Hilbert, David (1862-1943)
 Hooke, Robert (1635-1702)
 Hôpital, Marquis Guillaume de (1661-1704)
 Hoyle, Fred (1915-)
 Hubble, Edwin (1889-1953)
 Huygens, Christiaan (1629-1695)

Ioffé, Abram (1880-1960)
 Ives, Herbert (1882-1953)

Jeans, James (1877-1946)
 Joliot Curie, Frédéric (1900-1958)
 Joliot Curie, Irène (1897-1956)
 Joule, James (1818-1889)

Kamerlingh Onnes, Heike (1853-1926)
 Kelvin : Voir William Thomson
 Kirchhoff, Gustav (1824-1887)
 Kowarski, Lew (1907-1979)

Lagrange, Joseph Louis (1736-1813)
 Lamarck, Jean-Baptiste (1744-1829)
 Lamb, Eugene (1913-)
 Langevin, Paul (1872-1946)
 Lawrence, Ernest (1901-1958)
 Laplace, Pierre Simon (1749-1827)
 Landé, Alfred (1888-1976)
 Larmor, Joseph (1857-1942)



Lavoisier, Antoine Laurent (1743-1794)
 von Laue, Max (1879-1960)
 Lawrence, Ernest (1901-1958)
 Lemaître, Georges (1894-1966)
 Leprince-Ringuet, Louis (1901-2000)
 Leucippe (500-420 av. J.-C.)
 Leeuwenhoek, Antoine (1632-1723)
 Le Verrier, Urbain (1811-1877)
 Lee, Tsung Dao (1926-)
 Legendre, Adrien Marie (1752-1833)
 Leibniz, Gottfried Wilhelm (1646-1716)
 Lenard, Philipp (1862-1947)
 Levi-Civita, Tullio (1873-1941)
 Lifchitz, Evgueni (1915-1985)
 Lobatchevski, Nicolas (1792-1856)
 Lodge, Oliver (1851-1940)
 Loschmidt, Joseph (1821-1895)
 Lorentz, Hendrick Antoon (1853-1928)

 Mach, Ernst (1838-1916)
 Maiman, Theodore (1927-)
 Malus, Etienne (1775-1812)
 Maric, Mileva : voir Einstein
 Mariotte, Edme (1620-1684)
 Maxwell, James (1831-1879)
 Mayer, Robert (1814-1878)
 Meitner, Lise (1878-1968)
 Mendeleïev, Dimitri (1834-1907)
 Michelson, Albert (1852-1931)
 Millikan, Robert (1868-1953)
 Minkowski, Hermann (1864-1909)
 Michell, révérent John (1724-1793)
 Mittag-Leffler (1846-1927)
 Monge, Gaspard (1746-1818)
 Moore, Gordon (1929-)
 Morley, Edward (1838-1923)
 Mossotti, Ottaviano (1791-1863)
 Mössbauer, Rudolp (1929-)

 Navier, Henri (1785-1835)
 Ne'eman, Yuval (1925-)
 Nernst, Walter (1864-1941)

 Neumann, John (1903-1957)
 Newcomb, Simon (1835-1909)
 Newton, Isaac (1642-1727)
 Nobel, Alfred (1833-1896)

 Ohm, Georg Simon (1789-1854)
 Oppenheimer, Robert (1904-1967)
 Ostwald, Wilhelm (1853-1932)

 Paschen, Friedrich (1865-1947)
 Pauli, Wolfgang (1900-1958)
 Peebles, James (1935-)
 Penzias, Arno (1933-)
 Perrin, Jean (1870-1942)
 Planck, Max (1858-1947)
 Poincaré, Henri (1854-1912)
 Poisson, Siméon Denis (1781-1840)
 Pound, Robert (1919-)
 Powell, Cecil (1903-1969)
 Proust, Joseph (1754-1826)
 Ptolémée (100-170)

 Rayleigh : voir Strutt
 Ricci, Gregorio (1853-1925)
 Rebka, Glen (1931-)
 Richardson, Owen Willians (1879-1959)
 Riemann, Bernhard (1826-1866)
 Ritz, Walter (1878-1909)
 Römer, Olaüs (1644-1710)
 Röntgen, Wilhelm (1845-1923)
 Roosevelt, Franklin Delano (1882-1945)
 Rubens, Heinrich (1865-1922)
 Rubbia, Carlo (1934-)
 Ruhmkorff, Heinrich (1803-1877)
 Rutherford, Ernest (1871-1937)

 Salam, Abdus (1926-1997)
 Sakharov, Andrei (1921-1989)
 Savart, Felix (1791-1841)
 Schawlow, Arthur (1921-)
 Schmoluchowski, Marian (1872-1917)
 Schrödinger, Erwin (1887-1961)



Prix Nobel de physique (1901-2004)

- 1901 W. Röntgen (Allemagne), découverte des rayons X
- 1902 H.A. Lorentz et P. Zeeman (Hollande), effet Zeeman
- 1903 H. Becquerel (France), découverte de la radioactivité
P. et M. Curie (France), recherche sur la radioactivité
- 1904 Lord Rayleigh (Grande Bretagne), découverte de l'argon
- 1905 P. Lenard (Allemagne), rayons cathodiques
- 1906 J.J. Thomson (Grande-Bretagne), conduction de l'électricité par les gaz (découverte de l'électron)
- 1907 A. Michelson (Allemagne), optique de précision (interféromètre de Michelson)
- 1908 G. Lippmann (France), photographie en couleur
- 1909 G. Marconi (Italie) et F. Braun (Allemagne), télégraphie sans fil
- 1910 D. Van Der Waals (Hollande), équation de Van Der Waals
- 1911 W. Wien (Allemagne), loi sur le rayonnement de la chaleur (loi de Wien)
- 1912 G. Dalen (Suède), régulateur automatique
- 1913 H. Kamerlingh Onnes, hélium liquide



- 1914 M. Von Laue, diffraction des rayons X
- 1915 Sir W.H. Bragg et Sir W.L. Bragg (Grande Bretagne), analyse des cristaux par les rayons X (loi de Bragg)
- 1916 Non décerné
- 1917 C. Barkla (Grande Bretagne), caractérisation des éléments par les rayons X
- 1918 M. Planck (Allemagne), découverte des quanta
- 1919 J. Stark (Allemagne), effet Stark
- 1920 C. Guillaume (Suisse), découverte de l'invar
- 1921 A. Einstein (Suisse), découverte des lois de l'effet photoélectrique
- 1922 N. Bohr (Danemark), structure de l'atome (atome de Bohr)
- 1923 R. Millikan (États-Unis), travaux sur la charge de l'électron et sur l'effet photoélectrique
- 1924 Karl Siegbahn (Suède), spectroscopie des rayons X
- 1925 J. Franck et G. Hertz (Allemagne), expérience de Franck et Hertz
- 1926 J. Perrin (France), structure discontinue de la matière (atome de Perrin)
- 1927 A. Compton (États-Unis), effet Compton
C. Wilson (Grande Bretagne), chambre de Wilson
- 1928 Sir W. Richardson (Grande Bretagne), effet Richardson (phénomène thermoionique)
- 1929 Prince L. De Broglie (France), nature ondulatoire des électrons
- 1930 Sir C. Raman (Inde), effet Raman
- 1931 Non décerné
- 1932 W. Heisenberg (Allemagne), mécanique quantique (mécanique des matrices)
- 1933 E. Schrödinger (Autriche) et P.A.M. Dirac (Grande Bretagne), théorie atomique (formalisme de la mécanique quantique)
- 1934 Non décerné
- 1935 Sir J. Chadwick (Grande Bretagne), découverte du neutron
- 1936 V.F. Hess (Autriche), découverte du rayonnement cosmique
C.D. Anderson (États-Unis), découverte du positon



- 1937 C.J. Davisson (États-Unis) et Sir G.P. Thomson (Grande Bretagne), diffraction des électrons
- 1938 E. Fermi (Italie), réactions nucléaires induites par neutron
- 1939 E.O. Lawrence (États-Unis), cyclotron
- 1940 Non décerné
- 1941 Non décerné
- 1942 Non décerné
- 1943 O. Stern (États-Unis), moment magnétique du proton
- 1944 I. Rabi (États-Unis), propriétés magnétiques du noyau
- 1945 W. Pauli (Autriche), principe d'exclusion de Pauli
- 1946 P.W. Bridgman (États-Unis), physique des hautes pressions
- 1947 Sir E.V. Appleton (Grande Bretagne), couche d'Appleton (physique de la haute atmosphère)
- 1948 Lord P.M.S. Blackett (Grande Bretagne), amélioration de la chambre de Wilson
- 1949 H. Yukawa (Japon), prédiction de l'existence des mésons
- 1950 C.P. Powell (Grande Bretagne), détection en physique des particules
- 1951 Sir J.D. Cockcroft (Grande Bretagne) et E.T.S. Walton (Irlande), transmutation de noyaux avec un accélérateur de particule
- 1952 F. Bloch et E.M. Purcell (États-Unis), résonance magnétique nucléaire
- 1953 F. Zernike (Hollande), microscope à contraste de phase
- 1954 M. Born (Grande Bretagne), interprétation statistique de la fonction d'onde en mécanique quantique
W. Bothe (Allemagne), méthode des coïncidences
- 1955 P. Kusch (États-Unis), détermination précise du moment magnétique de l'électron
- 1956 W. Shockley, J. Bardeen et W.H. Brattain (États-Unis), découverte du transistor
- 1957 T.D. Lee (États-Unis) et C.N. Yang (Chine), violation de la parité
- 1958 P.A. Cerenkov, I.M. Frank et I.Y. Tamm (URSS), effet Cerenkov
- 1959 E.G. Segré et O. Chamberlain (États-Unis), découverte de l'antiproton



- 1960 D.A. Glaser (États-Unis), chambre à bulles
- 1961 R. Hofstadter (États-Unis), structure des nucléons
R.L. Mössbauer (Allemagne) effet Mössbauer
- 1962 L.D. Landau (URSS), superfluidité de l'Hélium II
- 1963 E.P. Wigner (États-Unis), principe de symétrie appliqué au noyau atomique
M. Goeppert-Mayer (États-Unis) et H.D. Jansen (Allemagne), structure en couche du noyau atomique
- 1964 Ch. Townes (États-Unis) et N.G. Basov, A.M. Prokhorov (URSS), laser, maser
- 1965 S.I. Tomonaga (Japon), J. Schwinger, R. Feynman (États-Unis), ElectroDynamique Quantique
- 1966 A. Kastler (France), pompage optique
- 1967 H.A. Bethe (États-Unis), cycle de Bethe des étoiles
- 1968 L.W. Alvarez (États-Unis), découverte de particules étranges
- 1969 M. Gell-Mann (États-Unis), classification des particules élémentaires
- 1970 H. Alfvén (Suède), Ondes de Alfvén
L. Néel (France), antiferromagnétisme et ferrimagnétisme
- 1971 D. Gabor (Grande Bretagne), holographie
- 1972 J. Bardeen, L.N. Cooper et J.R. Schrieffer (États-Unis), théorie BCS de la supraconductivité
- 1973 L. Esaki (Japon) et I. Giaver (États-Unis), effet tunnel dans les semi-conducteurs et les supraconducteurs
B.D. Josephson (Grande Bretagne), effet Josephson
- 1974 Sir M. Ryle et H. Hewish (Grande Bretagne), synthèse d'ouverture et découverte des pulsars
- 1975 A. Bohr, B. Mottelson (Danemark) et J. Rainwater (États-Unis), structure du noyau
- 1976 B. Richter et S.C. Ting (États-Unis), méson charmé
- 1977 P.W. Anderson (États-Unis), Sir N. Mott (Grande Bretagne) et J. H. Van Vleck (États-Unis), paramagnétisme de Van Vleck
- 1978 P.L. Kapitza (URSS), superfluidité de l'hélium II
A.A. Penzias et R. Wilson (États-Unis), fond cosmique à 3 K



- 1979 S.L. Glashow (États-Unis), A. Salam (Pakistan) et S. Weinberg (États-Unis), théorie électrofaible
- 1980 J.W. Cronin et V.L. Fitch (États-Unis), violation de CP
- 1981 N. Bloembergen et A.L. Schawlow (États-Unis), spectroscopie laser et Oscillateur Paramétrique Optique
K.M. Siegbahn (Suède), spectroscopie électronique haute résolution
- 1982 K.G. Wilson (États-Unis), transition de phase
- 1983 S. Chandrasekhar (États-Unis), structure des étoiles
W.A. Fowler (États-Unis), nucléosynthèse stellaire
- 1984 C. Rubbia (Italie) et S. van der Meer (Pays-bas), découverte des bosons intermédiaires W et Z
- 1985 K. von Klitzing (Allemagne), effet Hall quantique
- 1986 E. Ruska (Allemagne), microscope électronique
G. Binnig et H. Rohrer (Suisse), microscope à effet tunnel
- 1987 J.G. Bednorz et K.A. Müller (Allemagne), supraconductivité haute température
- 1988 L. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger (États-Unis), neutrino muonique
- 1989 N.F. Ramsey (États-Unis), maser à hydrogène
H.G. Dehmelt (États-Unis) et W. Paul (Allemagne), piégeage ionique
- 1990 J.I. Friedman, H.W. Kendall (États-Unis) et R.E. Taylor (Canada), confirmation de l'existence des quarks
- 1991 P.G. De Gennes (France), physique des polymères et des cristaux liquides
- 1992 G. Charpak (France), chambre à fil
- 1993 R.A. Hulse et J.H. Taylor (États-Unis), mise en évidence indirecte des ondes gravitationnelles
- 1994 B.N. Brockhouse (Canada), spectroscopie neutronique
C.G. Shull (États-Unis), diffraction neutronique
- 1995 M. Perl (États-Unis), découverte du lepton tau
F. Reines (États-Unis), détection du neutrino



- 1996 D. Lee, D. Osheroff et R. Richardson (États-Unis), superfluidité de l'hélium 3
- 1997 S. Chu (États-Unis), Cl. Cohen-Tannoudji (France), W. Phillips (États-Unis), piégeage d'atomes par laser
- 1998 H. Störmer (Allemagne), R. Laughlin et D. Tsui (États-Unis), effet Hall quantique fractionnaire
- 1999 G't Hooft, M.J.G. Veltman (Hollande), prédictions du modèle électrofaible
- 2000 Z.I. Alferov (Russie), H. Kremer (États-Unis), semiconducteurs à hétérostructure
J.S. Kilby (États-Unis), invention des circuits intégrés
- 2001 E.A. Cornell (États-Unis), W. Ketterle (Allemagne), C.E. Wieman (États-Unis), condensation de Bose-Einstein
- 2002 R. Davis (États-Unis), M. Koshiba (Japon), détection des neutrinos cosmiques
R. Giacconi, découvertes des sources cosmiques de rayons X
- 2003 A.A.A. Abrikosov (Russie), V.L. Ginzburg (Russie), A.J. Leggett (États-Unis), théorie des supraconducteurs et des superfluides
- 2004 D. Gross, D. Politzer, F. Wilczek (États-Unis), ChromoDynamique Quantique et liberté asymptotique



Remerciements

Je tiens tout spécialement à remercier Claude Cohen-Tannoudji, Président du Haut Comité de parrainage français de l'année mondiale de la physique, qui m'a fait le grand honneur de préfacer ce livre. Les travaux de Claude Cohen-Tannoudji sur le refroidissement des atomes par laser, couronnés par le prix Nobel de physique 1997, sont très liés aux découvertes faites par Einstein lors de son année miraculeuse de 1905 et illustrent à merveille la fertilité de ces découvertes.

Je veux également remercier les personnes qui ont patiemment relu le manuscrit et l'ont enrichi de leurs remarques, en particulier mon épouse, Jocelyne, dont le souci de clarté a été très appréciable, et Gilles Cohen-Tannoudji à qui je suis redevable de très nombreux échanges enrichissants.

Les discussions sur les nouvelles technologies et leurs applications que j'ai eues avec mes collègues de Thales Research & Technology ont été très fructueuses et motivantes et l'accès à la riche documentation de l'École Polytechnique m'a été d'une aide précieuse.

Enfin, je remercie EDP Sciences, spécialement France Citrini, pour leur grand professionnalisme et pour leur réactivité.

