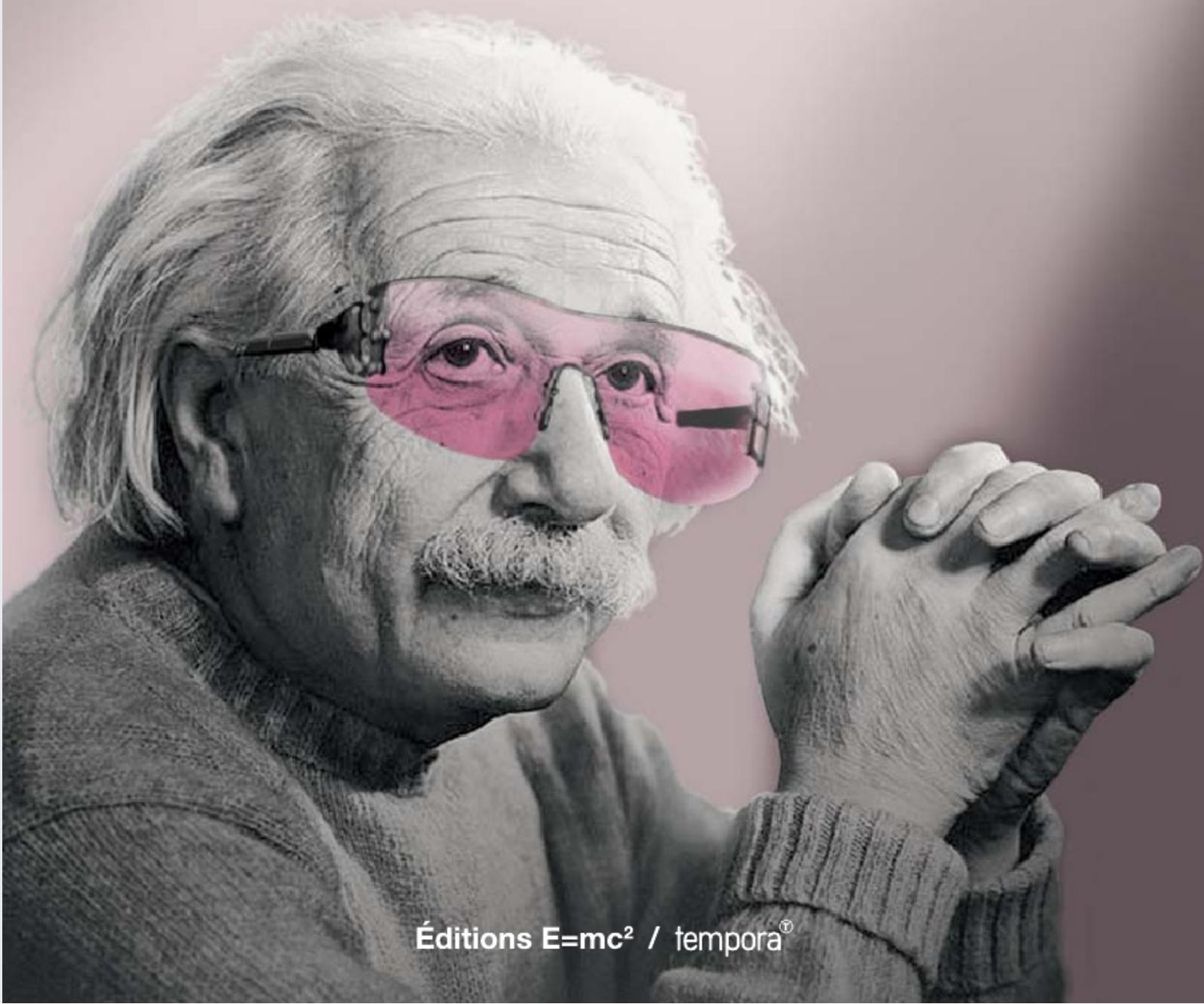


EXPO EINSTEIN

L'AUTRE REGARD



Éditions $E=mc^2$ / tempora[®]

***Je n'ai pas de don particulier.
Je suis simplement passionnément curieux.***

Albert Einstein

De l'ordinateur à la voiture, des modèles macro-économiques aux prévisions météorologiques, de l'imagerie médicale aux armes de destruction massives, les sciences et les techniques ont envahi notre quotidien, modelé notre façon de comprendre le monde, démultiplié la capacité des hommes à infléchir le cours des choses.

Les sociétés du ^{XXI}^e siècle seraient, dit-on, appelées à être des « sociétés de la connaissance ». Les sciences sont devenues un élément de la vie de chacun et notre sort à tous paraît lié à l'usage qui en sera fait. Le développement de la culture scientifique est dès lors plus que jamais un élément central pour nous permettre, individuellement et collectivement, de maîtriser notre avenir.

De nombreuses démarches sont entreprises pour permettre à chacun de mieux appréhender l'aventure scientifique. L'UNESCO a déclaré 2005 « année de la physique ». À mon initiative, nos Universités et Hautes écoles organisent dans ce même esprit depuis plusieurs années les *Printemps des sciences*, à l'occasion desquels elles ouvrent largement leurs portes. Aujourd'hui, l'exposition *Albert Einstein - L'autre regard*, est organisée à Bruxelles à l'occasion du 100^e anniversaire des premières publications majeures d'Einstein.

Si Einstein mérite avant tout d'être connu pour ses apports à la physique du ^{XX}^e siècle, la découverte de l'homme est également interpellante. *L'autre regard* d'Einstein, qui l'a amené à recevoir le Prix Nobel de Physique, était manifestement celui d'un esprit à maints égards joyeusement anti-conformiste.

Celui qui scrutait les étoiles fut également un citoyen de son temps engagé, notamment dans la cause pacifiste ou encore au sein de la Ligue allemande des droits de l'homme, convaincu que « Le monde ne sera pas détruit par ceux qui font le mal, mais par ceux qui les regardent sans rien faire. ».

J'espère que vous trouverez dans ce dossier pédagogique un guide utile pour prolonger votre cheminement sur les traces de cet homme de science et de conscience.

Françoise Dupuis
Ministre en charge de la culture à la
Commission communautaire française (COCOF)

Expo Einstein, l'autre regard

Table des matières

Remerciements	5
Introduction	9
Einstein et la Belgique	13
Société et physique du ^e XIX ^e siècle au temps d'Einstein	21
Les atomes existent, je les ai vus!	27
La naissance de la mécanique quantique	33
Les vacances du chat de Schrödinger	43
La relativité restreinte	47
$E = mc^2$ à la loupe	53
Qu'est-ce que la relativité générale ?	57
Le Big Bang, en deux mots	63
Regard sur un autre Einstein	69
L'homme Einstein	73
Glossaire	77
Bibliographie	81
L'exposition	83
Sponsors	93

Les auteurs de l'exposition

Conception muséologique,
réalisation et gestion

Tempora s.a.

tempora[®]

Direction scientifique

asbl E=mc²



Ces cahiers pédagogiques ont été conçus dans le cadre de l'exposition *Einstein, l'autre regard* qui a été réalisée par des scientifiques de l'**Université Libre de Bruxelles** (ULB) et de la **Vrije Universiteit Brussel** (VUB) et par **Tempora s.a.**

L'exposition n'aurait pu être réalisée sans le soutien de MM. Eddy Van Gelder, Président du Conseil d'Administration de la VUB, Jean-Louis Vanherweghem, Président du Conseil d'Administration de l'ULB, Benjamin Van Camp, Recteur de la VUB et Pierre de Maret, Recteur de l'ULB.

À la VUB et à l'ULB, l'évènement a été conçu par différentes équipes, coordonnées par Henri Eisendrath, Professeur Émérite à la VUB et Michel Tytgat, chercheur FNRS et Chargé de cours à l'ULB.

Le contenu scientifique, le scénario et les textes de l'exposition ont été conçus avec l'aide de : Albert Art (ULB), Alex Borgoo (VUB), Léon Brenig (ULB), Didier Devriese (ULB), Jan Heyninck (VUB), Denis Johnson (VUB), Dirk Lefebber (VUB), Philippe Léonard (ULB), Christiane Schomblond (ULB), Walter Van Rensbergen (VUB), Caroline Verhoeven (VUB), Thierry Visart (ULB) et Jean Wallenborn (ULB)

Les dossiers pédagogiques ont été réalisés sous la direction de Jean-Pierre de Greve

(VUB) et de Michel Tytgat (ULB) en collaboration avec : Glenn Barillon (ULB), Erwin De Donder (VUB), Didier Deses (VUB), Henri Eisendrath (VUB), Kamil Fadel (Palais de la Découverte, Paris), Henk Forriers (VUB), Jan Heyninck (VUB), Franklin Lambert (VUB), Philippe Léonard (ULB), Philippe Mergny (Communauté Française), Christiane Schomblond (ULB), Eric Stijns (VUB), Frank Tavernier (VUB), Michel Tytgat (ULB), Jean Wallenborn (ULB), M. Jacques Houard (ULB), Ad Meskens (VUB) et Dimitri Terryn (VUB).

La conception des expériences interactives a été coordonnée par Jean Wallenborn (ULB) en collaboration avec :

Albert Art (ULB), Daniel Bertrand (ULB), Norbert Kruse (ULB), Renaud Lambiotte (ULG), Philippe Léonard (ULB), Gilbert Longin (VUB), Heidi Ottevaere (VUB), Luit Slooten (VUB), Christiaan Sterken (VUB), Jean Surdej (ULG), Hugo Thienpont (VUB), Herman Van Herzeele (VUB) et Thierry Visart (ULB).

Nous remercions Kristel Mommaerts et Nadine Verheyen de la VUB ainsi que Kamel Daoud et Alain Renard de l'ULB pour leur aide pour les questions juridiques.

Différents chercheurs nous ont apporté leur aide et leur soutien :

Alexandre Ackermans (ULB), Nicolas Cerf (ULB), Barbara Clerbaux (ULB), Salua Daghay (VUB), Stéphane Detournay (ULB), Jorgen D'Hondt (VUB), Thomas Durt (VUB), Daan Hubert (VUB), Laura Lopez Honorez (ULB), Bernard Knaepen (ULB), Wendy Meulebroeck (VUB), Michael Peeters (VUB), Guy Van der Sande (VUB), Petra Van Meulders (VUB), Alexander Wijns (VUB).

La communication avec les écoles secondaires a été assurée par le service IEOC (VUB) et la Cellule RES (relations avec l'enseignement secondaire et supérieur) (ULB) avec l'aide et le soutien des Services Cérémonies des deux institutions.

Introduction

Pourquoi une exposition Einstein ?

En 1905, en l'espace de quelques mois, Albert Einstein, qui n'était jus-

qu'un jeune employé au bureau des brevets de Berne, a publié quatre articles scientifiques qui allaient changer définitivement notre conception de l'espace, du temps et de la matière.

Un de ces articles concernait la relation entre la masse et l'énergie : de nos jours, l'équation $E = mc^2$ est connue de tous, mais peu comprennent vraiment combien cette formule

d'apparence innocente a bouleversé la science, la culture et la société dans son ensemble.

La relativité, de son côté, nous a obligés à reconsidérer notre manière de penser l'Univers.

Enfin, la mécanique quantique, dont Albert Einstein est un des pères, nous a permis d'appréhender le monde atomique ; l'électronique, qui a envahi notre vie quotidienne, lui en est redevable.

L'année 2005 a été déclarée année internationale de la physique par l'Unesco ; le centième anniversaire de l'année *miraculeuse* d'Einstein a été célébré dans le monde entier. L'intérêt du public pour la personnalité d'Einstein (en 1999, il a été élu « personnalité du vingtième siècle » par les lecteurs du *TIME Magazine* et

par ceux de *Der Spiegel*), offre donc une opportunité unique de sensibiliser le public à l'importance économique et culturelle de la science pour la société et d'attirer les jeunes vers des carrières scientifiques.

Pourquoi une exposition Einstein en Belgique ?

Albert Einstein a entretenu des liens divers avec notre pays, au point qu'on peut dire que la Belgique est une des patries du savant au même

titre que l'Allemagne, la Suisse et les États-Unis :

- il avait de la famille proche (un oncle) à Anvers ;
- il a participé à quatre des Conseils Solvay de physique organisés à Bruxelles ;
- il était un familier du couple royal Albert I et Élisabeth ;
- il a séjourné au Coq en 1933 après son refus de regagner l'Allemagne, où les nazis étaient arrivés au pouvoir.

Un autre regard ?

Einstein, l'autre regard : le titre de l'exposition en livre d'emblée la clé, le fil conducteur. Tout au long de sa vie, de scientifique mais aussi d'homme engagé, Einstein n'a cessé de porter un autre regard sur le monde. En « met-

tant ses lunettes roses », comme on le voit faire dans l'exposition, Einstein jette un regard neuf sur les problèmes qui se posent à la physique de la fin du XIX^e siècle : il en résulte une révolution dont nous n'avons pas fini de ressentir les effets. C'est l'importance de « penser autrement » que l'exposition veut mettre en avant. Car cet esprit anti-conformiste, Einstein ne l'a pas appliqué au seul domaine de la physique. Il a souvent été le moteur de sa vie, par exemple lors de ses études (il avait la discipline prussienne en horreur) ou dans son engagement (pacifiste convaincu, il n'hésite pas à prôner l'usage des armes quand il faut combattre Hitler).

L'autre regard est aussi celui que les concepteurs de l'exposition ont porté sur Einstein et son œuvre.

- Ce n'est pas une exposition scientifique, ce n'est pas une exposition historique : c'est une exposition qui mêle les deux et replace ces deux points de vue dans une époque.
- C'est aussi l'autre regard porté sur l'homme : un scientifique, bien sûr, mais aussi une personnalité engagée en faveur des droits de l'homme, de la paix, de la démocratie.

Le parcours de l'exposition

Scientifique et historique

C'est, sans doute, la première clé dont nous avons voulu nous munir

pour concevoir le parcours de l'exposition : celle-ci ne devait pas être uniquement une exposition scientifique où le visiteur vient s'exercer comme dans un laboratoire.

Réserver une part importante à l'histoire, cela ne signifiait cependant pas simplement raconter la vie d'Einstein. Bien sûr, des éléments biographiques sont donnés à voir dans notre exposition. Mais ils n'en constituent pas les seuls éléments historiques et ils ne sont pas présentés comme le simple déroulement d'une ligne du temps. L'histoire s'insinue aussi dans la science : Einstein est le fruit d'une époque et il s'appuie sur la physique du ^{xix^e} siècle. Quant à la vie du savant, c'est par le biais de ses engagements que nous avons surtout voulu la montrer.

Quatre articles

Il nous est aussi très vite apparu qu'il fallait partir des quatre principaux articles publiés en 1905 dans la revue *Annalen der Physik*. Ils devaient être au centre de l'exposition car ils ont provoqué cette onde de choc dont

nous n'avons pas fini de ressentir les effets. C'est pourquoi, depuis le cœur de l'exposition, le visiteur se dirige vers quatre espaces distincts, chacun introduit par l'article de 1905 correspondant : les quanta, les atomes, $E = mc^2$, la relativité. Cette organisation, à laquelle nous avons voulu rester fidèles, nous a obligés à réserver un espace à la mécanique quantique alors que d'autres expositions consacrées à l'œuvre du sa-

vant ignorent cet aspect. C'est une difficulté que nous n'avons pas voulu esquiver car c'est bien un des articles de 1905 qui est à la base du développement de cette théorie, l'une des deux plus puissantes armes de la physique contemporaine.

Un autre langage

Les habitués des expositions le savent : la quantité d'informations qu'il est possible de délivrer par ce médium est très limitée, sous peine de voir le visiteur s'encourir, accablé de fatigue. Il faut donc, le plus souvent, jouer sur l'émotion, les sensations. Une exposition sur l'œuvre d'Einstein ajoute une difficulté supplémentaire :

nous touchons ici à des mondes qui nous sont totalement étrangers... et parfaitement non représentables : l'échelle des atomes et celle de la vitesse de la lumière.

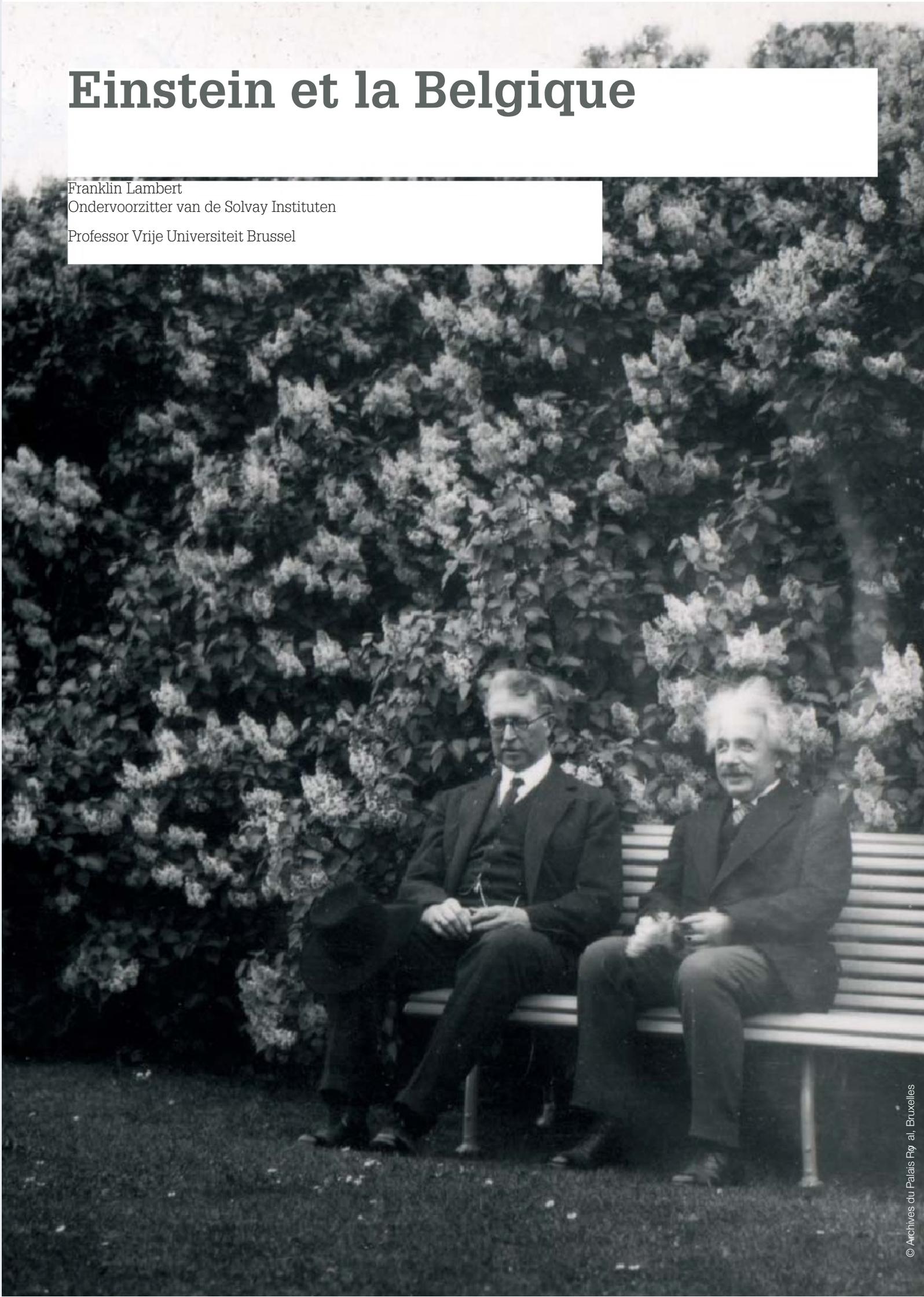
Notre parti pris a donc été non d'expliquer les théories d'Einstein – ce qui est d'ailleurs difficilement possible sans recourir à un appareil mathématique complexe – mais de les faire ressentir. Et d'inviter le visiteur à aller plus loin par d'autres moyens, tel ce guide par exemple. Il s'agit d'éveiller la curiosité, de faire prendre conscience que notre manière de penser l'Univers, le temps, l'espace ne sont pas aussi immuables que nous ne l'imaginons souvent.

Au visiteur de dire si nous avons réussi notre pari.

Henri Dupuis
Tempora

Einstein et la Belgique

Franklin Lambert
Ondervoorzitter van de Solvay Instituten
Professor Vrije Universiteit Brussel



Il y a cinquante ans, le 18 avril 1955, disparaissait Albert Einstein, physicien de génie, pacifiste engagé, et selon Léon Blum « le plus grand des hommes vivants ». Il fut proclamé en 1999 « Man of the Century » par *Time*

Magazine.

Le jour même de la mort d'Einstein, un télégramme signé Elisabeth de Belgique parvint à son domicile à Princeton. Il était adressé à Margot Einstein, sa belle-fille. S'agissait-il d'une simple formalité ? Certes non, car outre les liens personnels entre Einstein et la famille royale, ses rapports avec la Belgique furent multiples et importants. Certains événements belges, tels que les célèbres Conseils de physique Solvay, eurent un impact profond sur sa pensée et sur ses travaux. D'autres moins connus n'en furent pas moins importants sur le plan affectif. Il nous a semblé légitime et opportun de les relater brièvement.

Une légende veut que les premiers contacts d'Einstein avec notre pays se soient établis à Bruxelles, en 1911, à l'occasion du premier Conseil de Physique. Celui-ci fut, sans aucun doute, un moment important et nous y reviendrons. Néanmoins, ce ne fut pas son premier contact avec la Belgique.

En effet, Albert Einstein avait un oncle maternel, César Koch, qui avait acquis la nationalité suisse et s'était ensuite établi à Anvers vers 1890. Ce parent aisé et fort attentionné aida le

jeune Albert au moment très critique où celui-ci, ne supportant plus le régime militaire du Luitpoldgymnasium de Munich, se retrouva à Milan sans diplôme et décidé à se défaire de la nationalité allemande. L'idée de s'ins-

crire au célèbre Polytechnikum (ETH) de Zurich afin d'y faire des études d'ingénieur et d'acquérir par la suite la précieuse citoyenneté suisse (au prix de 800 FS) fut un conseil dont Einstein sut tirer tout le profit.

Les témoignages de gratitude envers cet « oncle préféré » sont nombreux. En effet, c'est à César Koch qu'Einstein envoie, en 1894-95, le manuscrit de son tout premier travail scientifique intitulé « Über die Untersuchung des Aetherzustands im magnetischen Felde ».

Le sujet de cet étonnant petit mémoire est encore bien éloigné de celui de son célèbre « Zur Elektrodynamik Bewegter Körper » de 1905. Néanmoins, il nous montre à quel point le jeune Einstein, qui n'a encore que 16 ans, est déjà fasciné par les problèmes de l'électrodynamique et par les merveilleuses expériences de Heinrich Hertz. Le manuscrit, accompagné d'une lettre touchante à son oncle César, fut conservé en Belgique pendant près de cent ans avant d'être vendu à Londres.

Einstein rend de fréquentes visites à l'oncle César et à sa famille. Celles-ci l'amènent à Anvers et à Liège, où César Koch s'est installé auprès de sa fille Suzanne, après la mort de sa

femme en 1927. La correspondance suivie entre Einstein, sa femme Elsa, sa sœur Maja et leur « famille belge » atteste l'importance de ce lien familial, lien d'autant plus étroit que César Koch est aussi l'oncle d'Elsa.

Les relations avec la famille royale

Les filles de Suzanne Koch-Gottschalk se souviennent des visites du « cousin Albert », de sa première invitation privée au Château Royal de Laeken, en mai 1929, et des colis de friandises qu'il leur envoyait d'Amérique pendant la Seconde Guerre mondiale.

L'invitation royale du 20 mai 1929, qu'Einstein reçut alors qu'il se trouvait à Liège au n°7 de l'avenue de Luxembourg, nous amène tout naturellement à évoquer ses relations privilégiées avec le roi Albert 1^{er} et la reine Elisabeth.

Rien ne rend mieux compte de la simplicité et de la délicatesse de l'amitié entre la Reine et Albert Einstein que les lettres que ces deux êtres d'exception échangèrent pendant plus de vingt-cinq ans. Les archives du Palais Royal de Bruxelles ont conservé 24 lettres de la main d'Einstein. La

première est datée du 14 mars 1929 (date de son cinquantième anniversaire), la dernière du 11 mars 1955 (cinq semaines avant son décès). Il y parle volontiers de poésie, de philosophie et de musique ; aborde quelquefois des questions de physique et fait souvent l'éloge de la solitude « propice à la réflexion et éducatrice de la personnalité ».

Einstein eut aussi de nombreuses discussions avec le roi Albert sur les problèmes épineux que rencontrait la Société des Nations, sur la difficulté de sauvegarder la paix...et sur l'attitude à adopter vis-à-vis des objecteurs de conscience.



Les Conseils Solvay

L'évocation de ces relations de confiance et d'estime mutuelles nous conduit à rappeler les circonstances des premiers contacts d'Albert Einstein avec la famille royale. Ceux-ci s'établirent à l'occasion des premiers Conseils de physique Solvay (de 1911 et 1913) qui, selon une tradition qui se maintiendra lors des Conseils suivants, étaient rehaussés par une réception chez le Roi. Einstein fut convié à ces prestigieux Conseils et y joua d'emblée un rôle prépondérant. Il fut, par la suite, le seul physicien allemand à être invité à participer aux deux premiers Conseils qui eurent lieu après la Première Guerre

mondiale. Il accepta de se joindre au Conseil de 1927, mais ne put se rendre à Bruxelles en raison d'un voyage aux Etats-Unis qu'il effectua en compagnie de Chaïm Weizmann pour collecter des fonds destinés à la création de l'Université hébraïque de Jérusalem. Il contribua néanmoins aux travaux de ce Conseil « par personne interposée » dans la mesure où il remit des notes qui furent jointes au rapport présenté par le physicien de

Haas. En août 1923, il se vit contraint de décliner l'invitation au Conseil de 1924, par solidarité envers ses collègues allemands qui n'étaient pas invités. Rappelons à ce sujet qu'il fut longtemps difficile d'inviter à Bruxelles

les signataires du « Manifeste des 93 savants allemands » qui s'étaient déclarés solidaires de l'armée prussienne.

Lorsque l'Allemagne eut rejoint la Société des Nations en 1926, il fut possible de tourner la page et d'inviter à nouveau les physiciens allemands à participer aux Conseils suivants. Einstein fut également invité à faire partie du Comité Scientifique de l'Institut International de physique Solvay. Cette nomination intervint à la suite du décès de H. Kammerlingh Onnes et reçut l'approbation du roi Albert. Einstein participa à ce titre aux Conseils de 1927 et 1930, ainsi qu'à une réunion préparatoire du Conseil de 1933. C'est à l'occasion de cette réunion du mois de juillet 1932 que la reine Elisabeth prit quelques photos d'Einstein et d'autres invités dans les jardins du château de Laeken.

Les Conseils auxquels participa Einstein furent, de l'avis général, parmi les plus mémorables. Ils furent le théâtre où se déroula, entre 1911 et 1930, la fameuse « révolution quantique », chaque Conseil annonçant le

franchissement d'une nouvelle étape de cette révolution.

On comprend aisément que les discussions de Bruxelles eurent une influence considérable sur l'œuvre

d'Einstein. Il ne peut être question ici d'en donner un aperçu complet. Signalons simplement que, revenu à Prague après le Conseil de 1911, Einstein ne se contenta pas de développer sa théorie de la gravitation (plus connue sous le nom de « relativité générale »), mais qu'il s'efforça également d'élucider le mystère soulevé par son hypothèse des « quanta de lumière ».

Rappelons aussi les légendaires confrontations des Conseils de 1927 et 1930 entre Einstein et Bohr sur l'attitude à adopter vis-à-vis de la toute nouvelle mécanique quantique. Elles incitèrent Bohr à préciser ce qu'il faut entendre par « interprétation de Copenhague », et eurent un impact profond sur les travaux de ceux qui, aujourd'hui encore, en étudient les fondements. Signalons à cet égard que c'est en 1933, au cours des derniers mois passés à la côte belge, qu'Einstein imagina une expérience qui, deux années plus tard, deviendrait célèbre sous le nom « d'expérience de pensée Einstein-Podolsky-Rosen (EPR) ». Il est indéniable d'autre part que les premiers Conseils Solvay

contribuèrent aussi à faire reconnaître Einstein par les plus éminents physiciens de l'époque. Ils eurent de ce fait un important impact sur le déroulement de sa carrière académique. Notons en particulier que ce furent Planck et Nernst, les deux « gloires » de la physique allemande si étroitement liées aux initiatives d'Ernest Solvay, qui se rendirent en 1913 à Zurich pour proposer à Einstein un poste de Directeur à l'Institut Kaiser

Wilhelm de Berlin, accompagné du titre de membre de l'Académie des Sciences de Prusse et de professeur à l'Université de Berlin.

Les collègues belges

Parmi les physiciens belges qui eurent des contacts répétés avec Einstein, il convient de citer (dans l'ordre chronologique) :



- Emile Verschaffelt, qui fut professeur à Bruxelles et à Gand et qui, durant les premières années de l'Institut International de physique Solvay, fut secrétaire du Comité Scientifique;
- Théophile De Donder, père de la physique théorique à l'Université Libre de Bruxelles. Il eut une correspondance suivie avec Einstein, entre 1916 et 1923, et contribua au développement de sa théorie de la gravitation;
- Georges Lemaître, célèbre pour ses travaux en cosmologie, prix Francqui en 1934, qui fut professeur à l'Université Catholique de Louvain et membre de l'Académie Pontificale des Sciences;
- Jacques Errera, prix Francqui en 1938, qui fut professeur à l'Université Libre de Bruxelles et qui accueillit Einstein dans son laboratoire en 1933. Il fut, par la suite, Commissaire à l'Énergie atomique (1959 – 1969).

Leur nom, ainsi que celui d'autres personnalités belges de premier plan, apparaît dans divers comptes rendus des séjours prolongés qu'Einstein effectua en Belgique à des moments très dramatiques.

Le premier de ces séjours eut lieu en août 1932, au lendemain des élections du Reichstag, qui firent du parti national-socialiste (NSDAP) le premier parti d'Allemagne. Des troubles importants ayant éclaté dans plusieurs villes, on conseilla à Einstein (qui s'était joint à d'autres

intellectuels pour appeler le SPD et le NSDAP) de s'éloigner de Berlin en attendant que le calme revienne. Il choisit de se réfugier dans une petite auberge à Frahinfaz, dans les environs de Spa. C'est dans cet «Hôtel Jamar» qu'Emile Vandervelde eut grande peine à le retrouver. Plusieurs lettres d'Einstein témoignent de son amitié et de sa grande estime pour le chef du parti socialiste. Rappelons qu'auparavant, en tant que mem-

bre de la Commission Internationale de Coopération Intellectuelle de la Société des Nations, Einstein rencontra également à plusieurs reprises Jules Destrée, ancien ministre des Sciences et des Arts.

La correspondance de Frahinfaz nous laisse entendre que c'est au cours de l'été 1932 qu'Einstein décida d'accepter l'offre d'un engagement mi-temps à l'Institute for Advanced Studies de Princeton et ce à partir de la fin de l'année 1933. Les événements politiques du début de l'année 1933 – Hitler prit le pouvoir en janvier – bouleversèrent ses plans

vent, le 18 mars, à bord du vapeur «Belgenland», qui leur est devenu familier, et qui entame son dernier voyage à destination d'Anvers. Ils apprennent que des agents nazis ont perquisitionné leur maison de Caputh et que leurs biens ont été saisis. Un télégramme du professeur Arthur De Groot, de l'Université de Gand, les invite à passer quelques jours chez lui, au château de Cantecroy, près d'Anvers, pour leur permettre de réfléchir à la situation. Ils acceptent l'invitation et sont reçus à leur arrivée par un important comité d'accueil. Einstein renonce aussitôt à son poste de Berlin et à sa nationalité allemande.



Arrivée à Anvers en 1933

et ne lui permirent pas de continuer à partager sa vie entre l'Amérique et Berlin. Ces événements prirent, au mois de mars, un tour si dramatique qu'ils l'amènèrent à rompre tous ses liens avec l'Allemagne et à se réfu-

gier une nouvelle fois en Belgique. Rappelons-en la succession très brièvement.

Refuge à la côte belge

Au terme de leur troisième hiver californien, Einstein et sa femme Elsa ont regagné New York et se trou-

vent de. Il présente sa démission à l'Académie des Sciences de Prusse. Les journaux titrent «C'est en Belgique que la voix d'Einstein, qui a cessé d'être allemande, est devenue universelle».

Les Einstein s'installent, le 1^{er} avril, au Coq sur Mer dans la Villa « Savoyarde », louée grâce aux bons soins de Madame De Groot et placée, par ordre du Palais, sous la protection de la gendarmerie. Ils savent qu'ils n'y séjourneront que quelques mois avant de quitter définitivement l'Europe.

Einstein se consacre à ses travaux en compagnie de Walther Mayer qui

l'a rejoint. Il s'inquiète du sort des intellectuels juifs chassés d'Allemagne et intervient auprès de personnalités belges susceptibles de pouvoir leur venir en aide. Il reçoit de nombreuses visites notamment de sa « famille belge », de physiciens tels que Philip Frank, Georges Lemaître, Paul Langevin et d'artistes tels que James Ensor et Félix Labisse ... Il fait des promenades quotidiennes, accepte de poser pour un peintre local (Alphonse Blomme), présente une série de leçons à la Fondation Universitaire (où il retrouve les professeurs Théophile De Donder, Georges Lemaître et Max Gottschalk), et se rend à deux reprises en Grande-Bretagne pour y donner des conférences et pour y rencontrer des responsables politiques.

Confronté, au mois de juillet, à l'affaire « Dieu-Campion », qui lui vaut d'être consulté personnellement par le roi, il se voit contraint de modifier radicalement sa position vis-à-vis de l'objection de conscience. En effet, deux miliciens belges de réserve, Marcel Dieu et Léo Champion, qui s'étaient déclarés objecteurs de conscience, devaient comparaître de-

vant le Conseil de guerre. Un de leurs d'Einstein, celui-ci refusa d'apporter sa caution et fit savoir qu'en raison de la situation internationale il était du devoir des miliciens belges d'assurer la défense de leur pays. L'évolution que connaît alors le pacifisme légendaire d'Einstein n'est sans doute pas la moindre conséquence de son expérience belge.

fi
presse à la fin de la guerre. Un de ses associés, en Tchécoslovaquie, de Théodore Lessing (ami d'Einstein) et de la mise à prix, en Allemagne, de la tête d'Einstein lui-même, il devient clair pour Elsa qu'il est temps de partir.

Après avoir reçu quelques honneurs supplémentaires – il est élu membre associé de l'Académie Royale de Belgique et reçoit les insignes de

docteur honoris causa de la Faculté

des Sciences de l'Université Libre de Bruxelles – Einstein se décide à embarquer discrètement pour l'Angleterre. Il retrouve Elsa quelques semaines plus tard, à Southampton, à bord du « Westernland ». Ils arrivent à New York le 17 octobre.

Dorénavant, la Belgique ne sera, pour Einstein, qu'un souvenir, entretenu par un abondant courrier et par le contact maintenu avec quelques intimes, issus de notre pays où y ayant fait escale ...

La lettre à Roosevelt

On sait, qu'à l'inverse, l'impact d'Einstein sur la Belgique ira en s'amplifiant, à la suite d'événements qu'il était loin d'imaginer lorsqu'il quitta le Coq sur Mer. Il s'agit, bien entendu, des conséquences de la découverte de la fission nucléaire, en 1938, et de l'épisode, si tragique pour Einstein, qui en résulta : l'envoi de sa célèbre lettre du 2 août 1939 au Président Roosevelt.

Le but de cette lettre est bien connu : il s'agissait d'attirer l'attention du Président sur la possibilité de la fabrication d'une bombe à l'uranium et sur le fait que les plus importantes sources d'uranium se trouvaient au « Congo belge ». On connaît aussi les conséquences du « projet Manhattan » que cette lettre déclencha, après de longs atermoiements. En revanche, ce que l'on sait moins, c'est que la lettre à Roosevelt n'était pas la première lettre qu'Einstein écrivit à ce sujet. Une première lettre, adressée à l'ambassadeur de Belgique à Washington, fut également écrite à l'instigation des physiciens hongrois Leo Szilard et Eugène Wigner. Ces physiciens, conscients du danger que pouvaient représenter les efforts des nazis dans la recherche sur l'uranium, voulaient alerter le gouvernement belge, afin qu'il empêche l'Union Minière du Haut Katanga de vendre à l'Allemagne les stocks de minerai d'uranium de Shinkolobwe. Il

leur avait semblé qu'Einstein était la

personne la plus à même d'intervenir auprès des autorités belges en raison de ses liens étroits avec la Reine Elisabeth.

Il serait beaucoup trop long d'évoquer ici, même partiellement, les divers rebondissements qui amenèrent finalement Einstein à s'adresser à Roosevelt, démarche qu'il appellera plus tard sa « grande faute ». Il serait trop long aussi de retracer les divers épisodes de l'extraordinaire aventure de l'uranium « belge », et de son impact sur l'effort nucléaire dans la Belgique de l'après-guerre. Disons simplement que la « grande faute » d'Einstein permit à la Belgique de jouer dans la cour des grands. En effet, elle eut pour conséquence que le petit pays, qui en 1920 se distinguait déjà comme pionnier dans l'industrie du radium, eut aussi le rare privilège d'être associé aux toutes premières phases de la recherche nucléaire.

La « faute » d'Einstein jeta une grande ombre sur les dernières années de sa vie, déjà assombries par des deuils successifs et par l'isolement auquel l'avait conduit son goût si prononcé

pour la recherche « en solitaire ».

Son isolement à Princeton lui faisait apprécier davantage la présence, à ses côtés, de quelques amis de longue date qui, comme lui, avaient trouvé refuge dans cette Amérique « terre de contradictions et de surprises ».

Il est émouvant de retrouver au premier rang de ceux-ci Paul Oppenheim et Gabrielle Errera, belges d'adoption pour l'un et de naissance pour

l'autre, rencontrés à Bruxelles, en 1911 à l'occasion du premier Conseil Solvay.

Paul Oppenheim fut l'une des deux personnes qui veillèrent à ce que les cendres d'Albert Einstein soient dispersées dans un lieu tenu secret.



Albert Einstein et Niels Bohr, Bruxelles, 1927

Société et physique du XIX^e siècle au temps d'Einstein

Kamil Fadel

Chef du Département de Physique au Palais de la Découverte (Paris, France)



Qu'elle s'exerce dans le domaine théorique ou pratique, qu'elle soit l'œuvre de penseurs de génie comme Newton ou Einstein, ou celles d'ingénieurs préoccupés par des applications, l'activité scientifique ne peut être isolée du contexte socio-culturel et industriel dans lequel elle prend place.

Cela semble aller de soi pour ce qui relève de la recherche appliquée. Cette remarque reste-t-elle valable lorsqu'il s'agit de réflexions abstraites et philosophiques ? La révolution conceptuelle introduite par Albert Einstein (1879-1955) qui bouleverse les notions intuitives de temps et d'espace peut-elle être considérée

comme un fruit du « passage obligé » de la société du XIX^e siècle ? C'est ce à quoi nous allons nous intéresser dans cet article après avoir tracé une courte biographie de la jeunesse d'Einstein.

Isaac Newton



La jeunesse d'Albert Einstein

Fils d'une famille juive, Albert Einstein vient au monde le 14 mars 1879 à Ulm, en Allemagne. Le chancelier Bismarck (1815 - 1898) venait de promulguer

des lois antisocialistes pour réprimer l'agitation politique ouvrière. Wilhelm Marr (1819 - 1904), un journaliste et publiciste allemand pour qui les juifs étaient responsables de la crise financière que connaissait le pays, rédige un texte intitulé *La victoire du judaïsme sur la germanité considérée d'un point de vue non confessionnel*. Son pamphlet remporte un grand succès. Dans la foulée, il forge le terme « antisémitisme » et crée la « Ligue des antisémites ».

À cette époque, la forte expansion industrielle que connaît l'Europe conduit les gens à quitter les campagnes pour se ruer vers les grandes villes. Ce mouvement est à l'origine de conflits sociaux. La population rurale juive du sud de l'Allemagne se réduit ainsi de 70 % entre 1870 et 1900. Lorsque Einstein a un an, ses parents décident de s'installer à Munich. Son père qui dirigeait à cette époque un commerce de lits de plumes, change de voie et fonde une petite entreprise de fabrication de lampes, dynamos, et autres instruments électriques dans la mesure où la place qu'occupait l'électricité dans la vie quotidienne devenait de plus en plus importante : Edison venait d'inventer la lampe à filament, l'électrification des villes battait son plein, les câbles transatlantiques permettaient la communication à grande distance.

Malheureusement, face aux géants comme Siemens, A.E.G... l'entreprise fait faillite en 1894. Les parents d'Einstein quittent alors l'Allemagne et vont s'installer en Italie. Einstein, lui, poursuit encore pendant quelques temps ses études scolaires au Gymnasium (équivalent du lycée). Mais en 1895, écœuré par le bourrage de crâne encyclopédique mêlé à la discipline quasi-militaire qu'il est obligé de suivre, il décide d'abandon-

ner l'école : il rejoint ses parents en Italie, d'autant qu'il souhaite éviter le service militaire. Ayant vécu dans un milieu technique et industriel, c'est naturellement que Einstein songe à poursuivre des études supérieures en physique. Mais n'ayant pas son baccalauréat, il décide d'entrer au

Polytechnicum de Zurich (Suisse) ou ETH (Eidgenössische Technische Hochschule), où on était admis sur concours. Il y est reçu en 1896, année même où à sa demande, Einstein n'est plus citoyen allemand, mais apatride! À cette époque, Zurich est une ville de 153 000 habitants. Comme à Bâle et à Berne, on y trouve énormément d'étudiants dont beaucoup sont des Russes exilés depuis 1870. La ville bouillonne d'idées et constitue à ce titre un foyer où germent de nombreuses pensées révolutionnaires. Einstein loge dans la chambre laissée vacante par Rosa Luxemburg (1870 - 1919), la célèbre révolutionnaire marxiste allemande. Zurich abrite une vie intellectuelle animée : chaque soir, les étudiants envahissent les cafés et les bars, tiennent des réunions, et discutent politique, philosophie, re-

ligion, sciences... On y trouve Pierre Kropotkine, Chaïm Weizmann (futur premier président d'Israël), Lénine... Le grand psychanalyste Carl Gustave Jung (1875 - 1961) écrira plus tard à propos de l'ambiance à Zurich : « ici, l'atmosphère était libre, on n'était pas alourdi par le sombre brouillard des siècles ». C'est dans ce contexte qu'Einstein débute ses études supérieures. Il y fait notamment

la connaissance de Friedrich Adler (1879 - 1960), futur assassin du premier ministre d'Autriche (1916) et dont le père était le fondateur du parti social-démocrate autrichien. Adler est passionné par la physique et les pensées du grand philosophe Ernst Mach (1838 - 1916), pensées qu'il cherchera à rapprocher de celles de Karl Marx. Les réflexions de Adler le conduisent à une révolte permanente contre les acquis de la

science. Einstein et Adler deviennent de très bons amis. En 1900, après de brillantes études, et diplômé du Polytechnicum, Einstein quitte l'établissement. Durant deux ans, il accomplit divers petits métiers. En juin 1902, l'année même du décès de son père, il est embauché comme expert au Bureau des brevets de Berne : son travail consiste à expertiser les nouvelles inventions, souvent des appareils électriques ...

La physique à la fin du XIX^e siècle

Durant ses études supérieures, Einstein reste admiratif face aux exploits de la mécanique newtonienne. En considérant un gaz comme formé de petites particules, il était par exemple possible de relier température, pression et volume, et retrouver les lois établies par **Boyle, Mariotte, Charles, Gay-Lussac** ... Cela était tout à fait impressionnant et révélait la puissance de la mécanique newtonienne qui dominait la physique depuis deux cents ans. Mais une nouvelle physique, toute aussi puissante

commence à naître au cours des années 1870 : la synthèse de l'électricité, du magnétisme et de l'optique que réalise l'Écossais James Clerk Maxwell (1831 - 1879). En effet, ce dernier montre qu'il est possible de décrire tous les phénomènes électriques et magnétiques à l'aide d'une seule et même théorie unificatrice, l'électromagnétisme. Or, cette théorie prévoit l'existence d'ondes d'un nouveau genre dont les ondulations

concernent deux grandeurs qu'avait introduites en physique le Britannique Michael Faraday (1791 - 1867) : le **champ électrique** et le **champ magnétique**. Toujours selon cette théorie, ces ondes doivent se propager à une vitesse qui se trouve être égale à celle – mesurée – de la lumière. Ainsi, Maxwell est amené à considérer la lumière comme étant une onde électromagnétique, ces ondes couvrant un spectre très large, allant des bas-

ses fréquences aux hautes, en passant par la gamme des fréquences visibles (de l'ordre de 10^{15} Hz) c'est à dire la « lumière » proprement dite. Le fait que la lumière soit une onde n'était pas une nouveauté en physique. Un certain nombre d'expériences réalisées au cours de la première

moitié du XIX^e siècle avaient déterminé cette nature ondulatoire, notamment celle imaginée par François Arago (1786 - 1853) permettant de comparer la vitesse de la lumière dans l'air et dans l'eau. Vers 1850, Hippolyte Fizeau (1819 - 1896) et Léon Foucault (1819 - 1868) avaient montré que cette vitesse est moindre dans l'eau : cela était compatible avec la **théorie ondulatoire**, incompatible avec la **théorie corpusculaire**. La nouveauté qu'introduisait Maxwell était relative à la nature des grandeurs ondulantes : jusqu'à cette date, on n'avait aucune idée de ce qui pouvait onduler, vibrer, dans l'onde lumineuse. Ce qui vibre dans la lumière, dit Maxwell, est le couple champ électrique-champ magnétique, deux notions issues de l'électricité. Malheureusement, Maxwell s'exprimait si peu clairement qu'on

ne comprend pas sa théorie et ses résultats ne sont pas répartis sur ce continent. Mais l'Allemand Hermann Helmholtz (1821 - 1894) reprend le traité d'électromagnétisme de l'Écossais et finit pas se convaincre que

James Clerk Maxwell



Maxwell a sans doute raison. Il charge alors son meilleur élève, Heinrich Hertz (1857 - 1894), de vérifier le résultat selon lequel une étincelle doit donner naissance à une onde électromagnétique de fréquence relativement basse qui doit ensuite se propager à une vitesse égale à celle de la lumière. Au cours des années 1880, ce fils d'un avocat sénateur de Hambourg confirme expérimentalement la validité de la théorie de Maxwell. Hertz parvient en effet à émettre une onde et la réceptionner à plusieurs mètres de distances. À partir de là, ingénieurs, techniciens et bricoleurs, tels les Branly, les Popov, les Marconi et autres s'emparent des ondes et donnent naissance à **la télégraphie sans fil**. La communication instantanée à distance devient une réalité.

Dès lors, la physique était nantie de deux grandes théories : la mécanique de Newton et l'électromagnétisme de Maxwell. On tente de les unifier. Au début, on cherche à se représenter les phénomènes électromagnétiques à l'aide de modèles mécaniques. Face aux échecs que connaissent ses tentatives, la situation n'est pas inversée, et certains physiciens cherchent alors à déduire les lois de la mécanique à partir de l'électromagnétisme.

L'espace et le temps

Tout le monde a entendu parler de la relativité einsteinienne. On peut ranger les motivations d'Einstein pour l'élaboration de cette théorie en deux catégories. Les motivations théoriques, et les motivations pratiques.

1. Les préoccupations théoriques d'Einstein

Assez vite, on se rend compte que les deux géants de la physique, à savoir Maxwell et Newton, ne peuvent avoir raison tous deux. En effet, selon Newton, le **mouvement rec-**

tiligne uniforme est parfaitement relatif. Autrement dit, aucune expérience réalisée à l'intérieur d'un wagon animé d'une vitesse constante ne doit permettre de dire si cette constante est égale à zéro ou si elle est différente de zéro. Comme le disait Galilée, le mouvement rectiligne uniforme est comme le repos. Or, la théorie indiquait qu'à l'aide d'une expérience d'optique on devait pouvoir faire la distinction. Il fallait donc soit modifier, voire abandonner, la théorie de Maxwell ou celle de Newton, afin de les rendre compatibles, la physique ne pouvant supporter une telle contradiction. Einstein est préoccupé par cette affaire.

Par ailleurs, un deuxième problème occupe ses pensées : le phénomène d'**induction** découverte par Faraday en 1832. Ce dernier avait expérimentalement montré que le mouvement d'un aimant au voisinage d'un conducteur, une bobine électrique par exemple, y engendre un courant, dit « induit ». Le mouvement étant relatif, afin que l'on observe une induction, il suffit que l'un bouge par rapport à l'autre, peu importe lequel est fixe par rapport à l'observateur. Malgré cette symétrie, la théorie ne tient pas compte de l'apparition du courant induit de deux manières différentes, selon que l'aimant ou la bobine était fixe dans le référentiel du laboratoire. Cela n'était pas non plus satisfaisant aux yeux d'Einstein.

Les réflexions qu'Einstein mène à ces sujets le conduisent à remettre en cause deux notions fondamentales discutées notamment par Mach : celles du temps et de l'espace. En effet, afin d'éliminer les inconsistances de la physique, Einstein se voit obligé de mettre sur pied une théorie dans laquelle ni l'espace, ni le temps ne sont absolus. Les longueurs et les durées deviennent relatives à l'observateur, de même que la notion de simultanéité de deux événements distants. D'où le nom donné à cette théorie : la relativité. Signalons ce-

pendant que ce terme peut induire en erreur en faisant croire que tout dans cette théorie est relatif. En fait, elle contient un absolu, mais cet absolu n'est ni l'espace, ni le temps pris séparément : il s'agit d'une grandeur qui inclut en son sein le temps et l'espace. Il s'agit de ce que l'on appelle **l'espace-temps**.

2. Les préoccupations d'ordre pratique d'Einstein

En France, Henri Poincaré (1854 - 1912) est lui aussi préoccupé par les problèmes auxquels s'intéresse Einstein. Lui aussi parvient à mettre sur pied une théorie de la relativité mettant en cause les notions habituelles d'espace et de temps. Il est intéressant de noter l'influence des innovations technologiques sur les réflexions des deux hommes. En effet, la notion de simultanéité de deux événements éloignés, ainsi que la synchronisation d'horloges distantes ont joué un rôle central dans leurs pensées. Au début du **xx^e** siècle, il y avait une forte motivation pratique pour synchroniser des horloges... dans les gares par exemple, ou pour

l'adoption d'un temps universel, ou encore pour des relevés précis de longitude...

Ainsi, pendant de nombreuses années, Poincaré est un des membres actifs du Bureau des Longitudes, notamment parce qu'il est impliqué dans la détermination des longitudes des territoires coloniaux français. Or, la détermination de la longitude d'un lieu passe par la connaissance de l'intervalle de temps qui sépare le midi en ce lieu et le midi en un lieu de référence, Paris par exemple. Cela implique donc deux horloges synchrones... Pour les synchroniser, on employait des câbles télégraphiques. Mais compte tenu de la précision que l'on cherchait à obtenir, on était amené à tenir compte du retard dû au temps de propagation du signal électrique dans les câbles, ou de celui pris par les ondes électromagnétiques...



De son côté, au titre de ses fonctions au Bureau des Brevets de Bern, Einstein est amené à examiner des projets destinés à améliorer la synchronisation des horloges. En effet, à cette époque, il était courant en Suisse de synchroniser les horloges d'une ville à l'aide de signaux électriques. Par ailleurs, à cette époque, dans beaucoup de pays les horloges sur les quais d'une gare n'indiquaient pas la même heure que celles de la ville où était située la gare. En effet, l'horloge d'un quai était réglée sur l'heure de la ville principale située sur la ligne ferroviaire. Or, par la fenêtre de son bureau, Einstein pouvait observer plusieurs horloges ainsi synchronisées avancer en parfait accord... Le fait que les signaux électriques de synchronisation étaient souvent transmis par le réseau ferroviaire, ainsi que les problèmes relatifs au décalage horaire lors des voyages par train (de plus en plus vite et sur des distances de plus en plus grandes) expliquent sans doute les fameuses allusions ferroviaires d'Einstein, et l'aiguinement de son intérêt pour les problèmes relatifs au temps et à l'espace.

La lumière est une onde !

Une des premières expériences convaincantes sur la nature ondulatoire de la lumière a été réalisée en 1801 par Thomas Young (1773 - 1829), médecin, physicien et égyptologue britannique. Une source lumineuse est placée derrière un écran percé de deux petits trous. Les deux faisceaux lumineux qui en sortent se superposent en provoquant des franges de luminosité tantôt forte, tantôt faible, des « interférences ». Young est le premier à comprendre le phénomène en faisant l'analogie avec des vagues sur l'eau : quand un creux et une crête de vagues

se superposent, ils s'annulent mutuellement ; pour la lumière, cela correspond à une zone sombre. En revanche, quand deux creux ou deux crêtes de la vague se superposent, l'amplitude de la vague augmente ; pour la lumière, cela correspond à une zone lumineuse. C'est Augustin Fresnel (1788 - 1827), physicien français, qui a développé théoriquement les idées pour lesquelles Young a été attaqué et insulté.

En guise de conclusion

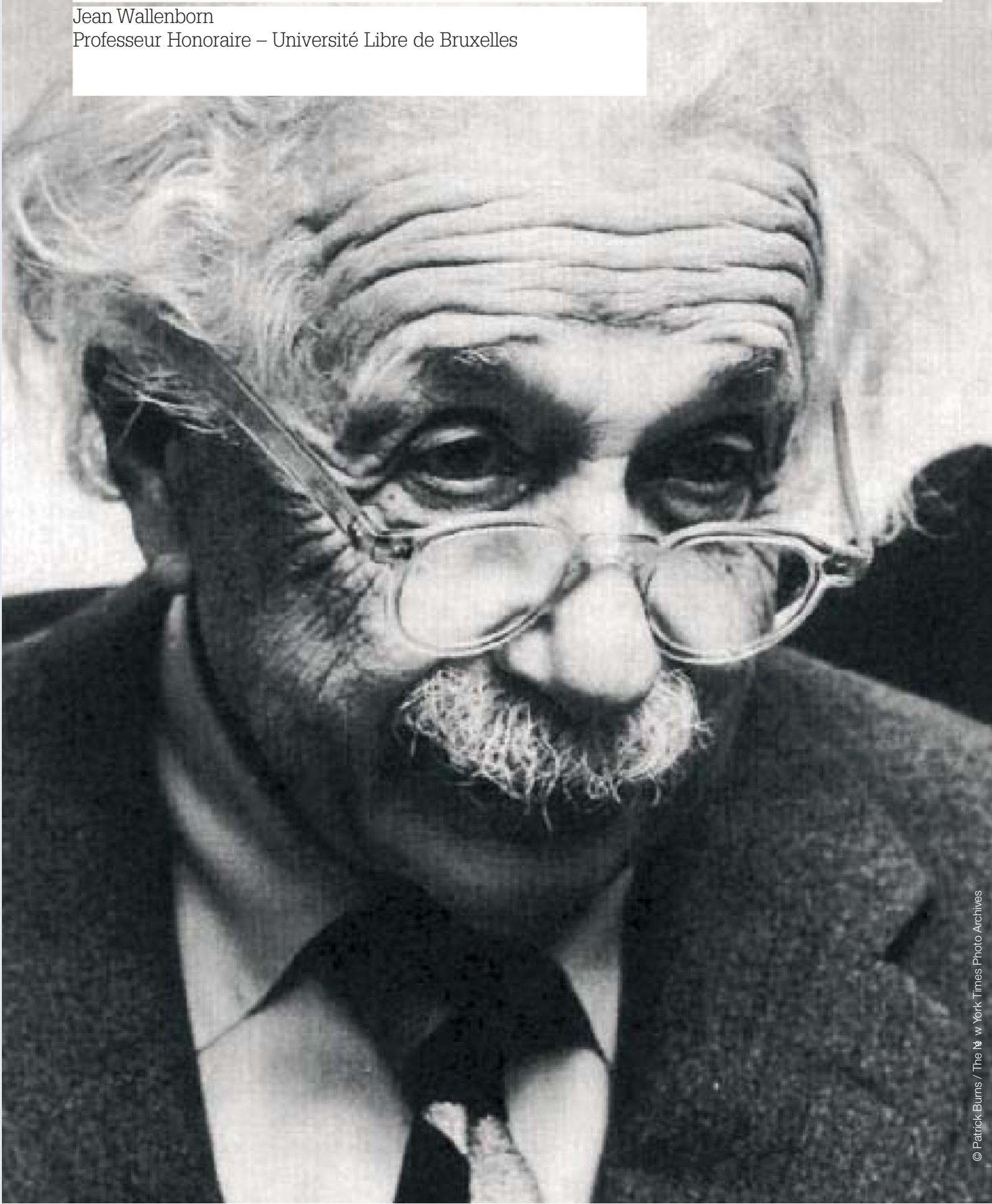
Le fait qu'au même moment Einstein et Poincaré aboutissent aux mêmes conclusions, à savoir la relativité du temps, de l'espace, et de la simultanéité, n'est certainement pas un événement fortuit. Il s'agit davantage d'un élément révélateur de l'ambiance fin de siècle. En effet, la physique et la société de cette période avaient toutes deux contribué à la mise en place d'une révolution conceptuelle relative au temps et à l'espace. La

physique, parce qu'elle comportait une contradiction : l'électromagnétisme semblait contredire la mécanique, une des solutions de ce problème étant la révision des concepts de temps et d'espace ; la société, parce que les trains, la TSF, les lampes et les horloges employés au quotidien étaient en train de modifier le rapport des hommes avec le temps et l'espace. N'est-il pas remarquable qu'une révolution analogue mettant en cause les représentations classiques de l'espace et du mouvement ait eu lieu au même moment, dans un autre domaine... l'art ? L'Einstein de l'art ne s'appellerait-il pas Picasso ?

Les atomes existent, je les ai vus!

Jean Wallenborn

Professeur Honoraire – Université Libre de Bruxelles



Aujourd'hui plus aucun scientifique, chimiste, physicien ou biologiste, ne doute de l'existence des atomes. Il aura pourtant fallu près de vingt-quatre siècles et quelques avatars pour que la notion d'atome devienne une réalité indiscutable.

Une vision de philosophe

Il semble que ce soit Leucippe, un philosophe grec dont on ne sait que très peu de choses, qui le tout premier a imaginé les atomes, au ^v^e siècle avant J.C. Son ami Démocrite

(460 - 370 av. JC), voyageur, au grand savoir et qui aimait le rire, développa et précisa sa théorie. Selon elle, la nature est composée de vide et d'atomes, particules matérielles indivisibles (atome: étymologiquement, qui ne peut être coupé), éternelles et invariables. Les atomes ne diffèrent entre eux que par leurs formes et leurs dimensions. Il n'existe rien d'autre. Il va sans dire que ce sont des spéculations de philosophe

qui ne reposent sur aucune preuve. Dans l'antiquité ces idées seront reprises par Épicure (341 - 270 av. JC), puis par le poète latin Lucrece (98 - 55 av. JC).

Mais c'est la décomposition du monde en quatre éléments (eau, terre, air, feu) qui va longtemps dominer le mode de penser des chercheurs, notamment des alchimistes.

Une notion opérationnelle

Au ^{xvii}^e siècle, Descartes (1596 - 1650) réintroduit les atomes en tant

que particules tourbillonnantes qui constituent les gaz. Il rapporte pas plus de preuves que les philosophes de l'Antiquité, mais sa conception imagée, un siècle plus tard, inspirera notamment Bernoulli (1700 - 1782): en supposant que les gaz sont formés de particules qui s'entrechoquent, celui-ci retrouve par le calcul des résultats en accord avec l'expérience et fonde ainsi la théorie cinétique des gaz, reprise plus tard par Maxwell et Boltzmann.

Également au ^{xviii}^e siècle, se développe la chimie. Pour Lavoisier (1743 - 1794), «rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme», ce qui signifie que les substances se décomposent en «éléments» et que c'est l'organisation de ces éléments qui change lors d'une réaction. À la même époque, naît une nouvelle branche de la science: la cristallographie. La forme des cristaux s'interprète comme reflétant la symétrie d'une «brique élémentaire», le cristal étant un empilement de ces briques. Après les avancées du siècle précédent, il est donc possible de dire au début du ^{xix}^e que la matière homogène est composée de corpuscules tous semblables entre eux, trop petits pour être visibles. Mais c'est Dalton (1766 - 1844) le véritable fondateur de la théorie atomique moderne: il

montre que l'existence des atomes explique pourquoi les gaz se combinent dans des rapports simples. Pour lui les atomes sont sphériques, identiques pour un élément, mais différents d'un élément à l'autre, notamment par leur masse.

Durant tout le XIX^e siècle, des présumptions de l'existence des atomes continueront de s'accumuler grâce notamment aux travaux d'Avogadro, Ampère, Pasteur, Bravais et Clausius. Convaincus de l'existence des atomes Maxwell (1831 - 1879), le créateur de la théorie électromagnétique, et surtout Boltzmann (1844 - 1906) développent la théorie cinétique qui décrit les gaz comme une collection d'atomes en mouvement qui interagissent selon les lois de Newton. Ils donnent ainsi une explication unifiée à pratiquement toutes les propriétés connues des gaz. Suite à ses travaux fondateurs, Boltzmann est considéré comme le père de la physique statistique, une branche de la physique aux nombreuses applications (astrophysique, géophysique, fusion nucléaire, milieux granulaires, matière molle, turbulence, chaos, etc.)

Le doigt dans l'œil

Malgré tous les succès que la notion d'atome a permis, à la fin du XIX^e siècle, un certain nombre de savants ne croient pas à l'existence des atomes parce que leurs instruments ne peuvent pas les détecter. Tenants d'une matière continue, ils pensent que la notion d'énergie est plus importante et que les atomes ne sont que des fictions mathématiques, de simples symboles pratiques comme aide-mémoire. Lord Kelvin (1824 - 1907), probablement le meilleur physicien expérimentateur de son siècle, Mach (1838 - 1916), physicien et philosophe qui a eu une grande influence sur les physiciens du début du XX^e siècle, Berthelot (1827 - 1907) qui appliqua la physico-chimie à la bio-

logie et même le chimiste Ostwald (1853 - 1932) qui obtiendra le prix Nobel en 1909, tous ont nié la réalité des atomes.

Le mouvement brownien

En 1827, le botaniste Robert Brown (1773 - 1858), lors d'une observation au microscope, découvre le mouvement irrégulier de grains de pollen, en suspension dans l'eau. Il montre lui-même que ce mouvement des particules en suspension n'est pas un phénomène vital. Les particules inertes, comme des poudres de minéraux, y sont également soumises. Pour s'assurer définitivement qu'aucune trace de vie n'intervient dans le phénomène, Brown observe des particules dans de l'eau fossile enfermée dans un cristal d'origine géologique.

Au cours du XIX^e siècle, plusieurs physiciens convertis à l'atomisme ont voulu expliquer le mouvement des particules en suspension par les collisions qu'elles font avec les atomes beaucoup plus petits qui sont en perpétuel mouvement d'agitation thermique. Mais ils se trompent dans le choix des paramètres importants pour décrire le phénomène et, dès lors, ne parviennent pas à retrouver les résultats expérimentaux.

En 1905, Einstein avait lu les travaux de Boltzmann et avait déjà publié des articles de **physique statistique**. Son originalité, pour expliquer le mouvement brownien, est d'avoir utilisé à la fois des concepts de physique macroscopique, c'est-à-dire accessibles à nos sens, comme la pression osmotique, et leur équivalent en **théorie cinétique**. De cette manière, il a pu établir des relations entre des quantités mesurables et des quantités reliées aux atomes comme

leur taille et leur nombre dans une



Daniel Bernoulli



A. L. Lavoisier



L. Boltzmann



W. Ostwald

quantité de matière donnée (nombre d'Avogadro).

De plus, il réalisa que la vitesse instantanée des particules en suspension n'était pas une variable intéressante parce qu'en moyenne elle est nulle, lorsque le liquide est au repos. À la place, il considère le déplacement

quadratique moyen des particules. Contrairement au mouvement inertiel pour lequel le déplacement est proportionnel au temps (i.e. la vitesse est constante), le déplacement quadratique moyen des particules browniennes est proportionnel à la racine carrée du temps. Ceci est caractéristique d'un phénomène de diffusion, comme la tache d'encre qui s'étend dans l'eau.

Déplacement quadratique moyen et diffusion

Pour l'observation du mouvement brownien, les particules sont en suspension dans un volume d'eau immobile. Comme une particule brownienne est tantôt

poussée à droite, tantôt poussée à gauche, tantôt poussée à droite, tantôt poussée à gauche, même après un temps long, la particule ne s'est pas déplacée en moyenne et, en conséquence, sa vitesse est nulle. En considérant ces grandeurs, nous n'apprenons pas grand chose sur le mouvement brownien.

La moyenne temporelle d'une grandeur est la somme de ses valeurs à des instants successifs divisée par la durée totale de la mesure. C'est pourquoi, puisque le carré d'une grandeur réelle est toujours positif (ou nul), la moyenne du carré du déplacement n'est jamais nulle. C'est cette grandeur qu'Einstein étudie. Il montre qu'elle augmente proportionnellement au temps. La racine carrée de cette grandeur, qui n'est autre que le dépla-

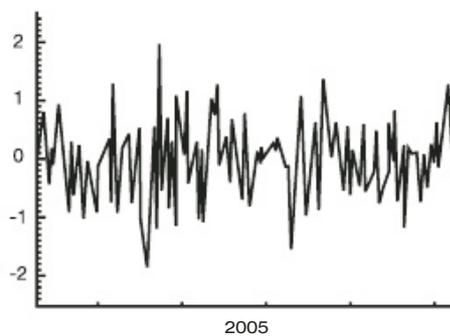
cement quadratique moyen, est donc proportionnelle à la racine carrée du temps.

C'est une caractéristique du phénomène de diffusion dont l'archétype est l'expansion d'une goutte

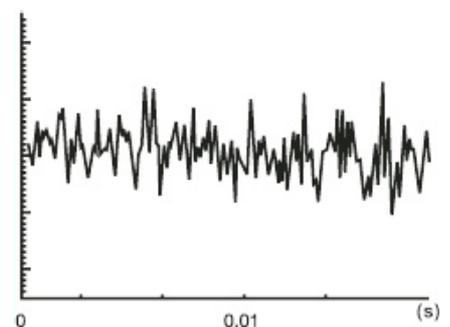
d'encre dans l'eau ou le « rayonnement de la goutte d'eau » (le rayon) ne carrée du temps ($r \propto \sqrt{t}$). Une autre diffusion d'un grand intérêt pratique est celle de la chaleur dans le phénomène de conduction.

Smoluchowski (1872 - 1917) en 1906 et Langevin (1872 - 1946) en 1908 retrouveront par d'autres méthodes les résultats d'Einstein. Les analyses de ces trois savants ont ouvert la porte à la théorie mathématique des processus stochastiques qui s'applique aux systèmes dont au moins une des variables varie au hasard. Par exemple, des méthodes dérivées de l'étude du mouvement brownien sont appliquées aujourd'hui par les financiers pour proposer à leurs clients les meilleurs placements possibles.

Deux phénomènes stochastiques



Variations journalières en % du cours du Dow Jones entre le 22 février et le 12 septembre 2005.



Bruit électronique d'un circuit pendant 0,02 sec.

Le nombre d'Avogadro

En 1811, un chimiste italien, Amedeo Avogadro (1776 - 1856) énonce une hypothèse connue sous le nom de loi d'Avogadro : deux volumes égaux de gaz différents, dans les mêmes conditions de température et de pression, contiennent un nombre identique de molécules. Il est dès lors possible, en pesant (dans les mêmes conditions) des volumes de gaz de nature différente, de donner les rapports entre les poids des molécules qui les composent. C'est évidemment un pas décisif en fa-

veur de l'existence des atomes. Cependant les études d'Avogadro ne seront universellement reconnues que cinquante ans plus tard : c'est Loschmidt (1821 - 1895), qui donnera en 1865 la première évaluation du nombre de molécules dans un cm^3 de gaz.

Actuellement, le nombre d'Avogadro est défini comme le nombre d'atomes dans 12 grammes de C^{12} et vaut $6,0221 \times 10^{23}$.



A. Avogadro

En 1908, Perrin (1870 - 1942) obtient la valeur du nombre d'Avogadro par 13 méthodes expérimentales différentes dont cinq se basent sur le mouvement brownien. Il confirme ainsi les prédictions d'Einstein. Après ces travaux, chacun est convaincu de la réalité des atomes, mêmes les plus irréductibles des énergétistes comme Ostwald.

Un atome composé

Au moment où l'existence des atomes était reconnue par tous, l'image que l'on se fait d'eux a changé. On leur reconnaît une structure. L'atome est décomposable.

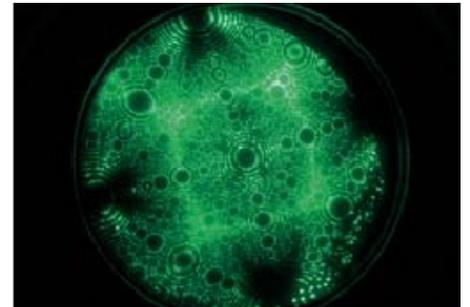
Déjà en 1902, J. J. Thomson (1856 - 1940) avait proposé un modèle d'atome dans lequel des électrons chargés négativement étaient enfouis dans une pâte positive, à la manière des raisins dans le crêpe. Ce modèle fut invalidé par une expérience de Rutherford (1871 - 1937) en 1911. Celui-ci propose un modèle planétaire de l'atome, les électrons sont en orbite autour d'un noyau positif, mais ce modèle est en contradiction avec la théorie de l'électromagnétisme de Maxwell. C'est Bohr (1885 - 1962) qui donnera en 1913 un modèle presque satisfaisant de l'atome d'hydrogène, mais les électrons y décrivent des trajectoires, alors que nous savons maintenant que cela est contraire à la mécanique quantique. Depuis Schrödinger (1887 - 1961), la description de l'atome se fonde sur la notion d'**orbitale** reliée à la probabilité de présence de l'électron près du noyau.

Et depuis cette époque, le noyau lui-même a pu être décomposé en particules plus élémentaires : protons et neutrons dans un premier temps et actuellement, quarks et gluons.

Voir et jouer avec les atomes

Cinquante ans après les travaux fondateurs d'Einstein, l'invention par Müller du microscope à effet de champ a permis pour la première fois

la visualisation directe d'atomes :



Chaque tache claire sur la photo correspond à un atome de la surface d'une très fine pointe métallique.

Aujourd'hui, on ne se contente plus de voir les atomes, on les manipule ! De nouvelles techniques de visualisation ont été mises au point : le microscope à effet tunnel qui utilise une propriété quantique de la matière et qui convient pour l'étude des métaux et le microscope à force atomique qui est constitué d'une pointe qui suit le relief de la surface d'un matériau tant conducteur qu'isolant électrique.

Ces microscopes à effet tunnel et à force atomique permettent le développement des nanotechnologies, un ensemble de techniques visant à produire et manipuler des objets et des matériaux à l'échelle des molécules et des atomes, c'est-à-dire du nanomètre (10^{-9} m = un millionième de millimètre). Ces nouvelles techni-

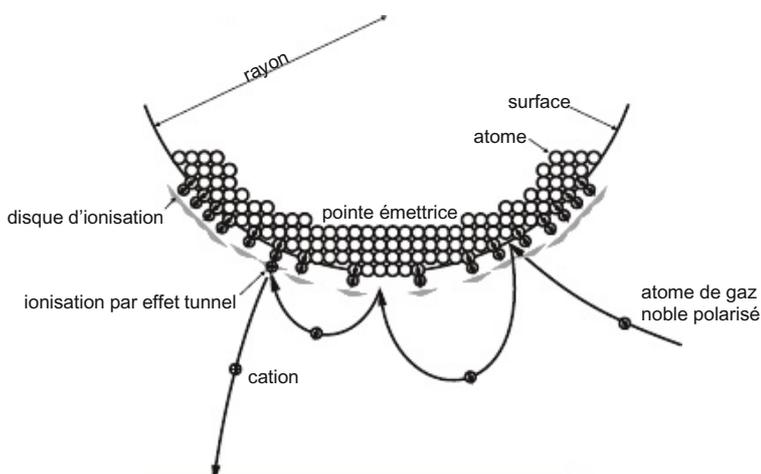
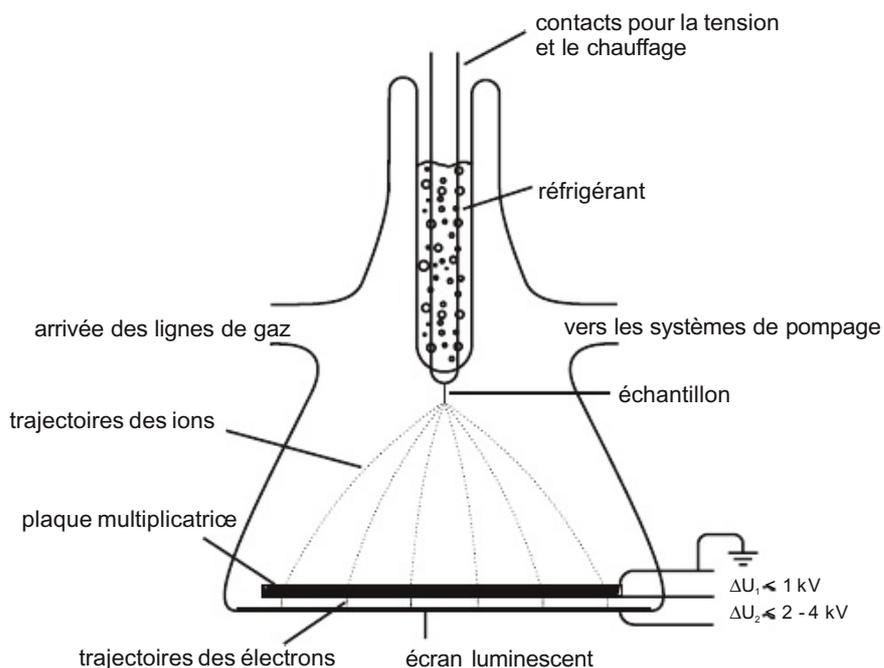
ques ouvrent des perspectives notamment en recherche de nouveaux matériaux, en médecine, tant pour le diagnostic que pour le dosage des médicaments, et en informatique par leurs possibilités de miniaturisation. On espère même créer des nanorobots capables d'effectuer des tâches au niveau atomique.

De telles perspectives n'auraient sûrement pas manqué d'ajouter à la bonne humeur de Démocrite, s'il avait pu les connaître.

Le microscope à effet de champ

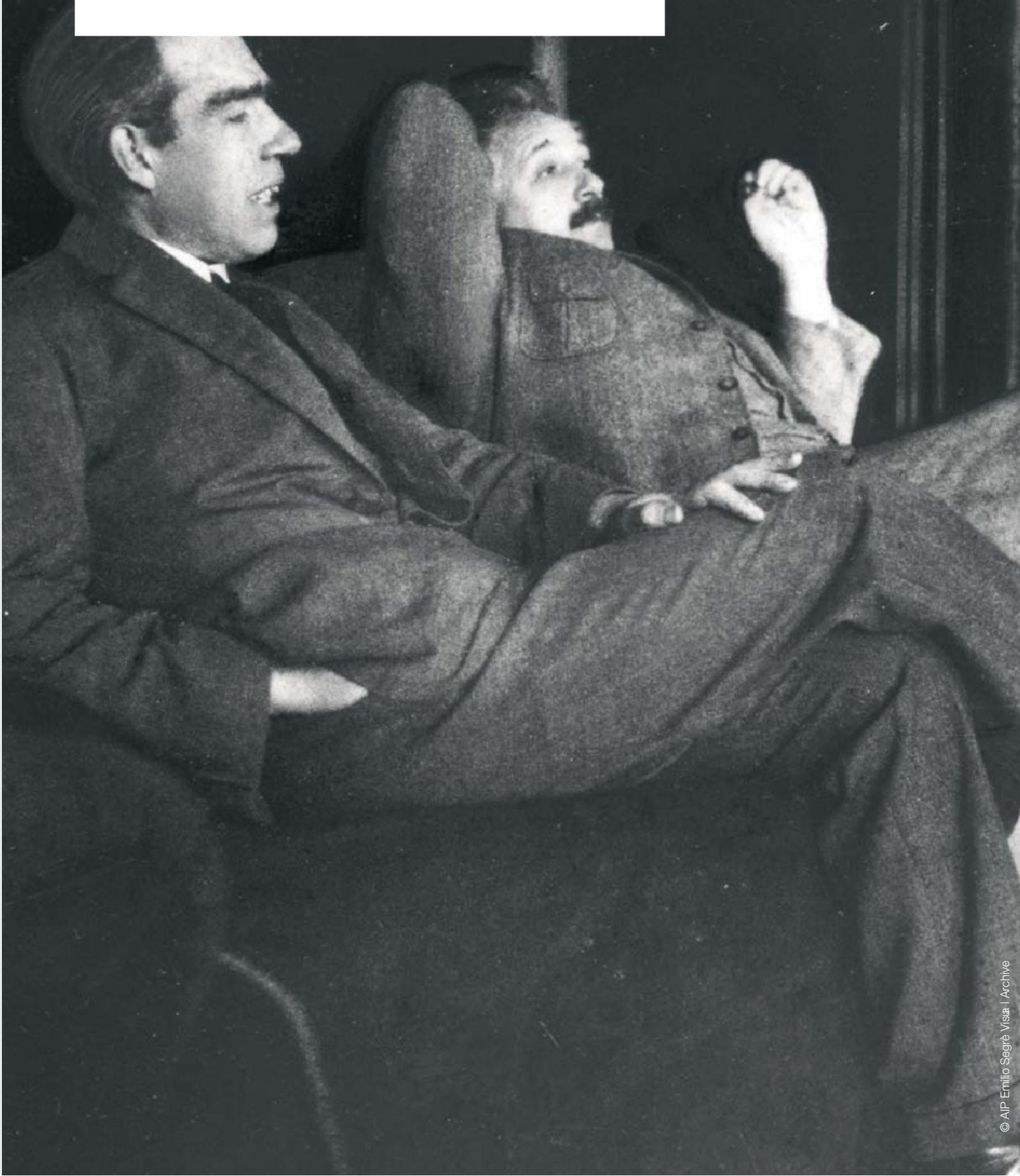
L'échantillon sous forme de pointe est placé dans une ampoule dans laquelle le vide est fait. Il reste une pression de gaz noble résiduelle de 10^{-3} pascal. La pointe est portée à un potentiel positif. Son extrémité donne naissance à un champ électrique élevé (c'est l'effet de pointe comme celui mis en jeu par le paratonnerre). Le champ électrique est suffisant pour ioniser les atomes de gaz juste au dessus des atomes les plus « proéminents » de la pointe. Les ions formés sont ensuite accélérés par le champ électrique et projetés sur l'écran où ils forment une image très agrandie.

T. Visart - Service de Chimie Physique des Matériaux (Catalyse - Tribologie), ULB.



La naissance de la mécanique quantique

Par Henri Eisendrath,
Professor Emeritus – Vrije Universiteit Brussel



Des fissures dans le temple classique

À la fin du XIX^e, Isaac Newton (1642 - 1727) et James Clerk Maxwell (1831 - 1879) se partagent les places d'honneurs dans le temple de la physique.

La chute d'une pomme, le ballet des planètes, le mouvement d'un électron dans un champ magnétique, ... Autant d'exemples de mouvements explicables par la mécanique de Newton. Il suffit de connaître position et vitesse initiales d'un point matériel pour déterminer complètement son mouvement dans un champ de force. C'est pour cela qu'on qualifie cette théorie de déterministe.

De son côté, Maxwell a unifié les phénomènes électriques et magnétiques en une seule théorie : l'électromagnétisme. Celle-ci prédit que les perturbations électromagnétiques ont un caractère ondulatoire et se propagent à la vitesse de la lumière, ce qui conduit Maxwell à suggérer que la lumière elle-même est un phénomène électromagnétique. On découvrira ensuite des ondes électromagnétiques de fréquences plus basses (telles que les ondes radios) et plus hautes (telles que les rayons X) que la lumière visible.

Que la lumière est une onde est démontré par la remarquable expérience de Young. Il suffit d'envoyer un rayon de lumière à travers une double fente (Young utilisait une pile de car-

tes à jouer pour séparer un rayon en deux). Le phénomène d'interférence - une propriété ondulatoire - fait que l'on obtient une foule de taches lumineuses sur un écran. Hertz confirma l'existence d'ondes électromagnétiques par quelques expériences. Il démontra entre autre que les ondes électromagnétiques peuvent être polarisées et réfléchies, tout comme la lumière.

Fin XIX^e, des fissures apparaissent dans les murs de ce temple que l'on croyait pourtant bien solide ...

L'essentiel est invisible

Tous les objets rayonnent de l'énergie sous forme de lumière. Les observations montrent que la majeure partie de cette énergie est émise autour d'une fréquence (autrement dit une couleur) caractéristique directement proportionnelle à la température de l'objet. Le fer à cheval que le maréchal-ferrant sort de son four à une température de 700 degrés Celsius est rouge. S'il augmente la température,

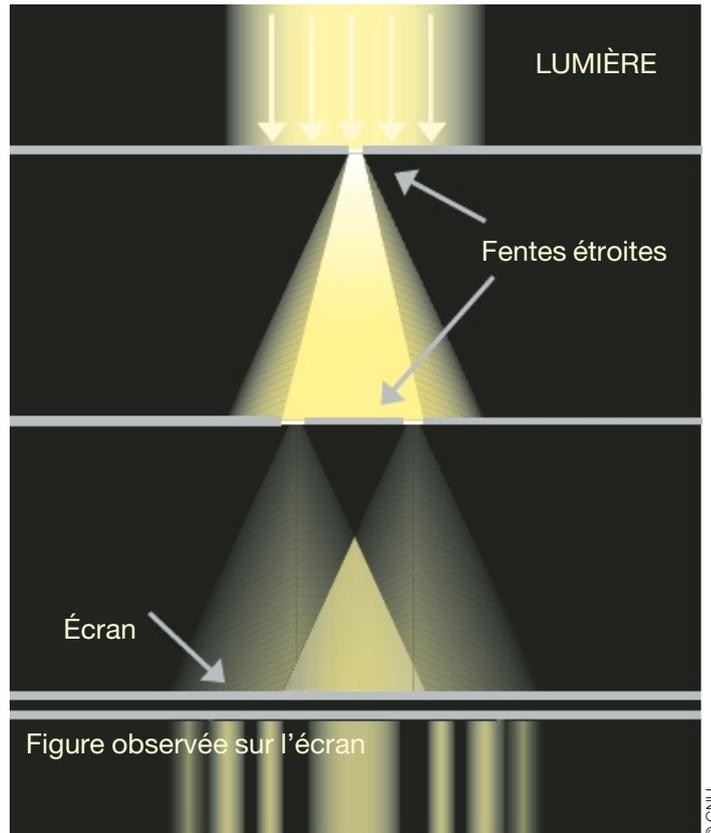
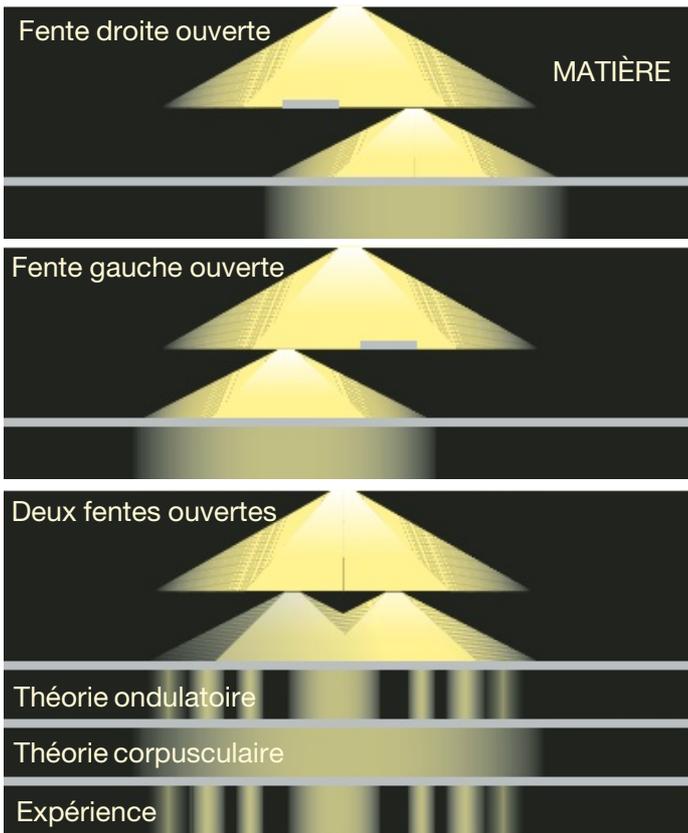
le fer devient blanc. En revanche, à température ambiante, le rayonnement est émis dans l'infrarouge, invisible à l'œil : ce que nous voyons en regardant un objet, c'est la lumière qu'il nous renvoie, pas celle qu'il émet.

Ce phénomène est bien connu au XIX^e siècle, mais même la remarquable théorie de Maxwell ne peut l'expliquer. À croire cette théorie, un objet à température ambiante brillerait com-

me mille soleils. Autrement dit, il faudrait une énergie infinie pour chauffer n'importe quel objet, ce qui est absurde. De nombreux scientifiques, dont Gustav Kirchhoff (1824 - 1887), Jozef Stefan (1835 - 1893), Wilhelm Wien (1864 - 1928), s'intéressent à ce problème du rayonnement mais, pour le résoudre, les physiciens n'ont que la théorie ondulatoire de Maxwell et la thermodynamique à leur disposition. Ces théories prédisent que

l'énergie émise par un objet idéal, appelé **corps noir**, est d'autant plus grande que la fréquence est élevée : c'est la catastrophe ultraviolette.

Expérience de Young pour la lumière et pour la matière



© GNU

Corps noir

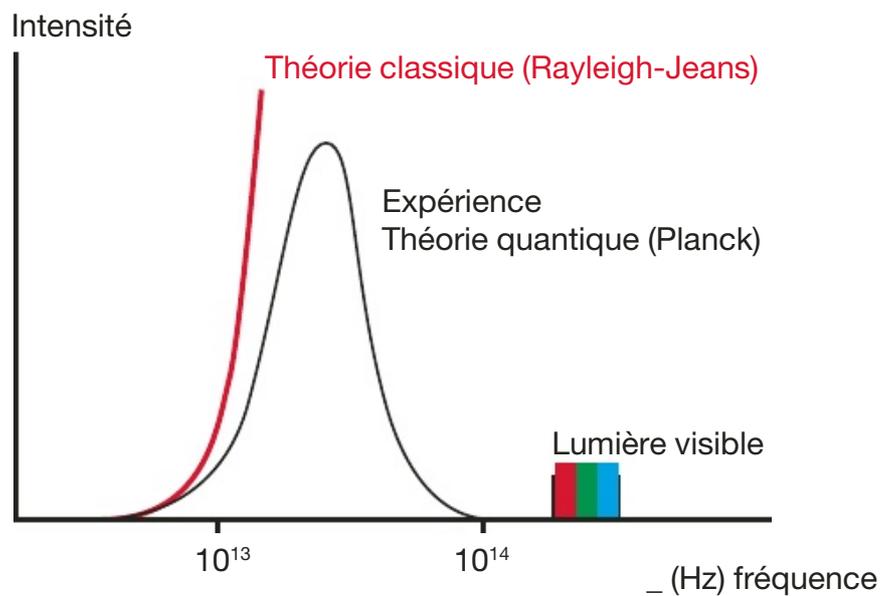
Le corps noir est un objet idéalisé qui absorbe entièrement la lumière, visible ou invisible, qui lui parvient, sans la réfléchir ni la transmettre.

Un corps à température constante ne cesse pas d'augmenter.

D'après la thermodynamique, la répartition de l'énergie émise en fonction de la fréquence ne peut dépendre que de la température et pas de la nature du matériau dans lequel est fait le corps noir.

Expérimentalement, un petit trou dans une enceinte fermée est un bon corps noir. L'expérience montre alors que l'énergie totale rayonnée augmente avec la température ($\propto T^4$) ; d'autre part, l'intensité du rayonnement passe par un maximum en fonction de la fréquence et ce maximum se déplace vers les hautes fréquences quand la température augmente ($\propto T$). À température ordinaire, ce maximum se trouve dans l'infrarouge, invisible à l'œil, tandis que le soleil, dont la surface est à une température proche de 6000 degrés, nous envoie un rayonnement centré autour de la lumière visible.

À la fin du XIX^e siècle, aucune théorie ne prédit un tel maximum ; au contraire, les théories disent qu'à toute température l'intensité émise doit augmenter indéfiniment avec la fréquence !



Intensité du rayonnement d'un corps noir à une température de 25°C

La quantification de la lumière

Le 14 décembre 1900, Max Planck (1858 - 1947), qui a deviné quelques

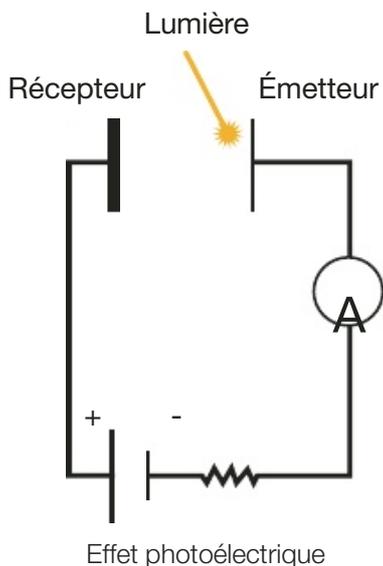
semaines auparavant la formule du spectre d'émission du corps noir, en fournit une explication théorique. À sa grande surprise, sa théorie décrit parfaitement l'expérience si les énergies admises pour l'émission des rayons électromagnétiques par un objet sont discrètes au lieu d'être continues. Ces énergies E sont des multiples entiers de la fréquence ν de l'onde multipliés par une constante h , appelée depuis lors constante de

Planck: $E = nh\nu$. La constante de Planck a les dimensions de l'énergie (en joule J) fois un temps (seconde s), $h = 6,34 \times 10^{-34}$ J.s.

La théorie de Planck donnait une solution au problème du corps noir, mais elle n'était pas du goût de tous, à commencer de Planck lui-même qui était un conservateur dans l'âme. Cependant, presque malgré lui, sa découverte annonçait une révolution dans le monde serein de la physique au tournant du XIX^e siècle.

L'étape suivante fut franchie par Einstein (1879 - 1955) en 1905, alors qu'il n'était qu'employé au bureau des brevets de Berne. Planck s'était contenté de discrétiser, ou quantifier devrait-on dire, les échanges entre la matière et la lumière. Dans l'esprit de Planck, la lumière est encore continue. Einstein va un pas plus loin:

pour lui, c'est la lumière elle-même qui est constituée de paquets d'énergie ou quanta (le pluriel de quantum, un mot latin signifiant « combien »). Cette proposition rompt avec la physique du 19^e siècle, selon laquelle les phénomènes sont soit ondulatoires, soit corpusculaires. Pour Einstein, la lumière peut être les deux à la fois, et dans son esprit, c'est un problème majeur pour la physique.



En marge de sa proposition, Einstein donne une explication originale d'un

phénomène appelé « effet photoélectrique », découvert quelques années auparavant par Philip Lenard (1862 - 1947). Ce dernier, fasciné par l'électromagnétisme, imagina l'expérience suivante. Prenons un circuit électrique ouvert, avec une plaque métallique à chacune des extrémités. Si l'on envoie de la lumière de couleur bleue sur une des plaques, des électrons sont arrachés qui passent à travers l'air de la plaque à l'autre, de sorte qu'un courant circule dans le circuit. Si on augmente l'intensité de la lumière bleue, le courant devient plus intense. Par contre, si on illumine l'émetteur avec de la lumière de plus basse fréquence, comme de la lumière rouge, il n'y a pas de courant et ce quelle que soit l'intensité de la lumière. La théorie ondulatoire de Maxwell n'explique pas cet effet ; d'après elle la lumière rouge devrait

aussi arracher les électrons.

L'interprétation d'Einstein est... lumineuse. Pour lui, la lumière est faite de petits paquets d'énergie, des particules de lumière en quelque sorte, que l'on appelle aujourd'hui photons. Chaque photon a une énergie bien définie, déterminée par sa fréquence. Si on augmente l'intensité lumineuse sans changer la fréquence, on augmente le nombre de photons mais pas la capacité de chaque particule à arracher des électrons (qui dépend de l'énergie du photon). Si par contre on augmente la fréquence de la lumière sans changer l'intensité, il y a moins de photons mais ils ont plus d'énergie, et donc peuvent plus facilement arracher les électrons de la plaque métallique.

L'hypothèse des quanta de lumière devait ébranler la physique, car, nous l'avons dit, elle est incompatible avec la théorie ondulatoire de Maxwell. Pour beaucoup de physiciens, c'est tout simplement inacceptable. Mais les expériences de Robert Millikan (1868 - 1953) finirent par donner raison à Einstein, et tous furent obligés d'accepter la nature duale, onde-particule, de la lumière. Il recevra

(en 1921) le prix Nobel de physique pour sa explication de l'effet photoélectrique.

La quantification de la matière

À la même époque, d'autres physiciens tentent de comprendre la structure de l'atome. Le modèle en vigueur est celui de Joseph J. Thomson (1856 - 1940), qu'il élaborait en 1903 après avoir découvert l'électron. Pour lui, l'atome ressemble à un crêpe, avec une pâte de charge positive et des raisins de charge négative. L'expérience en 1909 de Hans Geiger (1862 - 1945) et Ernest Marsden (1888 - 1970), dans laquelle une mince feuille de métal est bombardée avec des rayons alpha (un rayonnement constitué de noyaux d'hélium

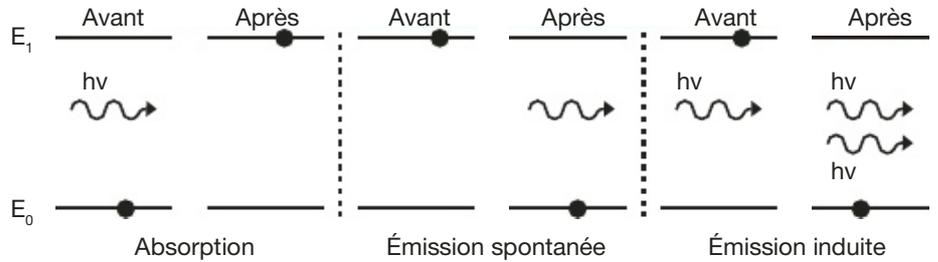
ionisés), amena Ernest Rutherford (1871 - 1937) à imaginer un modèle planétaire de l'atome dans lequel les électrons de charge électrique négative tournent autour d'un noyau de charge électrique positive.

L'idée est séduisante mais d'après la théorie de Maxwell, les électrons qui tournent autour du noyau devraient perdre de l'énergie en émettant des ondes électromagnétiques: l'atome de Rutherford est instable. Pour tenter de résoudre ce problème, Niels Bohr (1885 - 1962) imagine l'existence d'une nouvelle force répulsive qu'il introduit sous la forme d'une condition de quantification : pour lui, l'électron ne peut se trouver que sur certaines orbites bien précises.

Le spectre des atomes

Le modèle de Bohr permet de comprendre le spectre de l'atome d'hydrogène, suivant des observations effectuées par, entre autre, Johann Balmer (1825 - 1898). Bohr décrit

l'absorption ou l'émission de lumière de fréquence n par un atome comme étant liée au passage de l'électron d'une orbite d'énergie E vers une autre d'énergie E' , avec une différence d'énergie $\Delta E = E' - E = hn$.

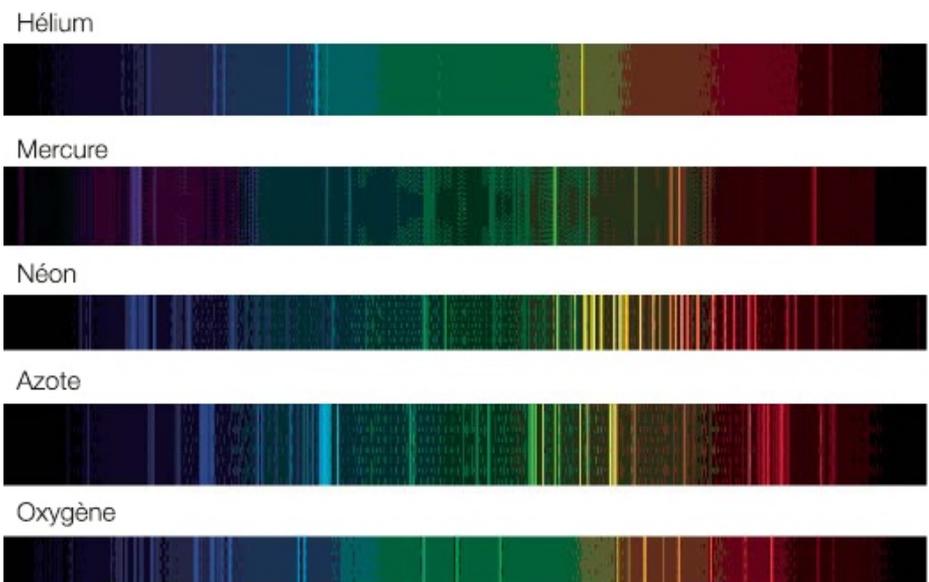


Émission stimulée, principe à la base du fonctionnement du laser.

Son modèle quantique de l'atome d'hydrogène, publié en 1913, lui vaudra le prix Nobel de physique (1922).

Ce n'est qu'en 1917 qu'Einstein fait le lien entre le modèle de Bohr et sa propre théorie des quanta de lumière, dans un article qui va également marquer le début de la physique du laser. Le problème du corps noir, encore lui, l'amène à proposer, en plus du processus d'émission spontanée de la lumière déjà considéré par Bohr, l'existence de processus d'**émission stimulée**. Malgré ces résultats, Bohr lui-même reste opposé à l'idée des quanta de lumière.

Mais la révolution était en marche. Louis de Broglie (1892 - 1987) défend en 1923 une thèse dans laquelle il étend à la matière la dualité onde-particule de la lumière. Si, comme le suppose de Broglie, l'électron possède



Spectre de quelques atomes

de des caractéristiques ondulatoires, il devrait être possible d'observer des figures d'interférence avec un faisceau d'électrons. Ironie du sort, c'est George Thomson (1892 - 1975), fils du Thomson qui découvrit la nature corpusculaire de l'électron, qui réalisera le premier une expérience de Young avec des électrons, démontrant ainsi la nature ondulatoire de la matière.

Dualité pour tous

Dans leurs interactions, lumière et matière se comportent à la fois comme des ondes et comme des particules. Ceci peut paraître surprenant, voire même choquant, mais n'oublions pas

que, nous sommes dans le monde de l'extrêmement petit, bien loin de notre expérience quotidienne. Cette dualité sera la pierre angulaire de la mécanique quantique, le formalisme remplaçant à l'échelle de l'atome, les lois dites classiques de la mécanique newtonienne.

En 1926, Erwin Schrödinger (1887 - 1961) introduit un formalisme basé sur le caractère ondulatoire de la matière : l'équation d'onde de Schrödinger. En 1925, Werner Heisenberg (1901 - 1976) a proposé une approche différente, mais en apparence seulement. Surtout, en 1927, il pose son fameux principe d'incertitude: il est impossible de déterminer simultanément avec une précision arbitraire la position et vitesse d'un objet. En 1928 enfin, Paul Adrien Maurice Dirac (1902 - 1984) propose une équation pour l'électron en accord avec le principe de relativité restreinte d'Einstein, ce qui l'amènera à prédire l'existence d'antimatière.

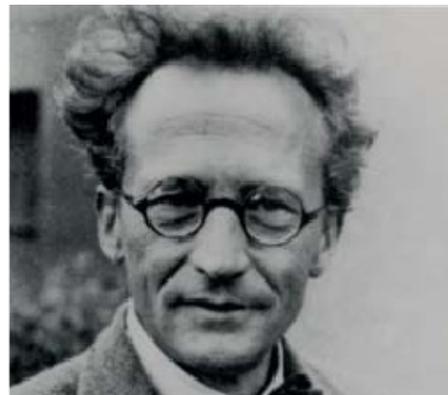
La dernière clé est fournie par Max Born (1882 - 1970), qui explicite la signification de l'équation d'onde. Il montre que la dualité signifie la fin du déterminisme: la mécanique quantique ne donne pas de certitudes, mais uniquement des probabilités.

« Dieu ne joue pas aux dés ! »

Le principe d'incertitude et la fin du déterminisme ne firent pas que des heureux au sein de la communauté scientifique. Albert Einstein, en particulier, n'acceptera jamais l'intrusion de la chance à un niveau fondamental. Pour lui, la mécanique quantique, malgré ses succès, ne peut être le point final: «Dieu ne joue pas aux dés!»

Au Conseil Solvay de 1927, qui se déroule à l'hôtel Métropole, à Bruxelles, Einstein imagine une « expérience de pensée » (*Gedankenexperiment*). Il pense avoir mis en évidence une incohérence dans la mécanique quantique et pouvoir signer la fin du principe d'incertitude. Mais après une nuit blanche, Bohr trouve la réponse au problème posé par Einstein ... en utilisant sa propre théorie de la relativité générale. Einstein est touché. Malgré ses réticences à accepter le principe d'incertitude, il ne peut qu'accepter la réponse de Bohr.

Le principe d'incertitude obsédera Einstein. En collaboration avec Boris Podolsky (1896 - 1966) et Nathan Rosen (1909 - 1995), il publie en 1935 son dernier article sur la mécanique quantique. Bien que passé relativement inaperçu à l'époque, cet article est aujourd'hui au cœur de la recherche en mécanique quantique. L'article EPR (acronyme basé sur le nom de ses auteurs) visait à montrer que la mécanique quantique ne fournit qu'une description incomplète de la « réalité ». Le débat ne reprendra qu'en 1964, revitalisé par des résultats obtenus par John Bell (1928 - 1990). Depuis, plusieurs expériences ont été menées qui visent à pousser la mécanique quantique dans ses retranchements: elle en est sortie chaque fois triomphante.



E.Schrödinger



W. Heisenberg



Paul A. Dirac



M. Born

Qu'est ce que la téléportation quantique ?

L'article EPR discutait une propriété étrange de la mécanique quantique, appelée non-localité. Pour illustrer ce phénomène, imaginons deux personnes, Anne à Bruxelles et Bernard à Sidney, jouant à pile ou face. Si leurs pièces de monnaies obéissent aux lois de la mécanique quantique et si elles ont été correctement préparées, alors, lorsque Anne obtient pile (face), elle peut être assurée que Bernard obtiendra également pile (face). Cette propriété, appelée intrication quantique, est utilisée pour faire des copies à l'identique et à distance d'objets quantiques, tels que des atomes. On appelle ça la téléportation quantique.

Les applications

1. Vie et mort des étoiles

Ce nuage de gaz, résidu d'étoiles, est situé à 3000 années-lumière de la Terre. L'analyse de la lumière qu'il émet, signature quantique des ato-

mes, donne des informations sur sa composition. Sur la photo, l'hydrogène est représenté en rouge, l'oxygène en vert et le soufre en bleu.

2. Le cerveau d'un ordinateur sur une puce

Les transistors, objets quantiques, deviennent de plus en plus petits avec les années. Aujourd'hui, une puce électronique peut contenir jusqu'à 100 millions de transistors par cm^2 .

3. IRM pour Imagerie par Résonance Magnétique

L'atome d'hydrogène, placé dans un champ magnétique et soumis à un rayonnement électromagnétique, émet un signal, différent d'après le tissu du corps dans lequel il se trouve. La localisation de ces signaux permet

de construire une image, comme ici celle d'une tête.

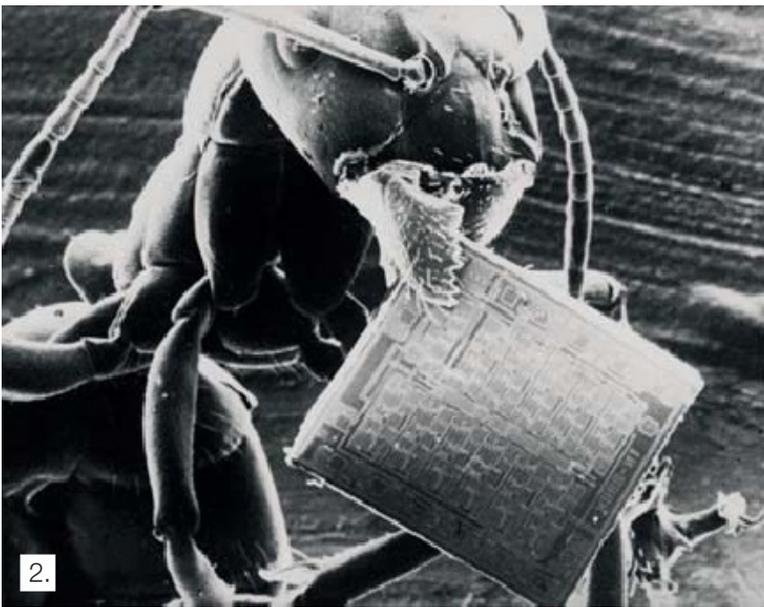
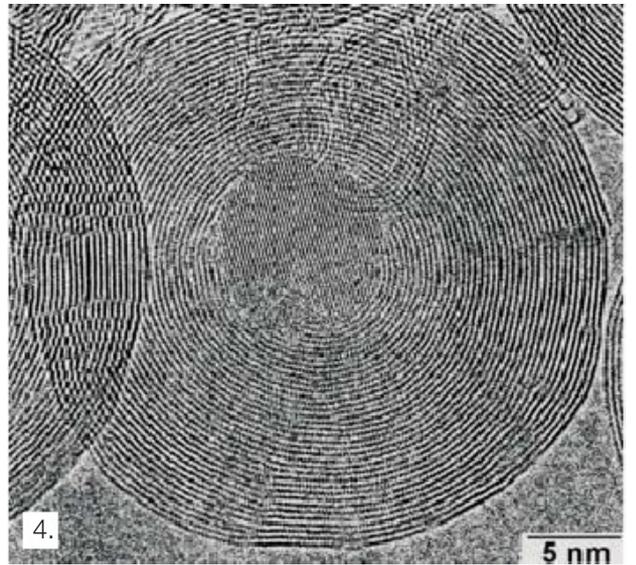
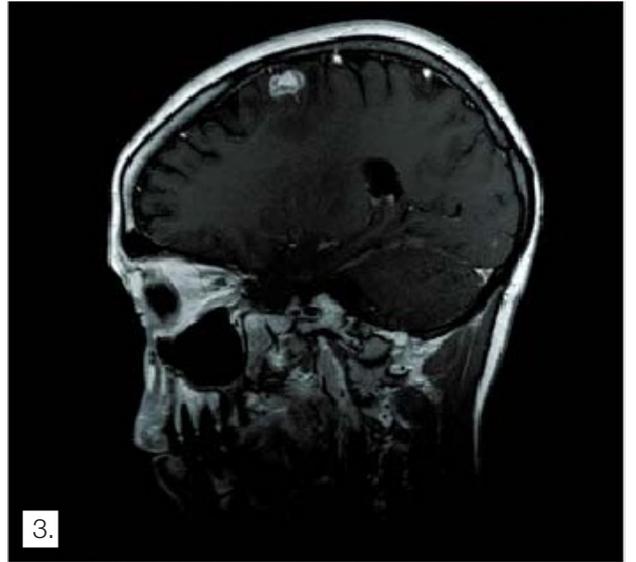
4. Image d'un diamant par microscopie électronique

Cette image, à l'échelle nanométrique, soit environ dix fois la taille d'un atome, représente un arrangement d'atomes de carbone. Au centre, le cercle hachuré est du diamant, formé artificiellement par le bombardement des couches de carbones périphériques avec des électrons.

5. Plus et plus loin avec le laser

Le fonctionnement du laser est basé sur la découverte par Einstein de l'émission stimulée de lumière. Les propriétés de cette lumière permettent de transmettre près de mille communications téléphoniques à la

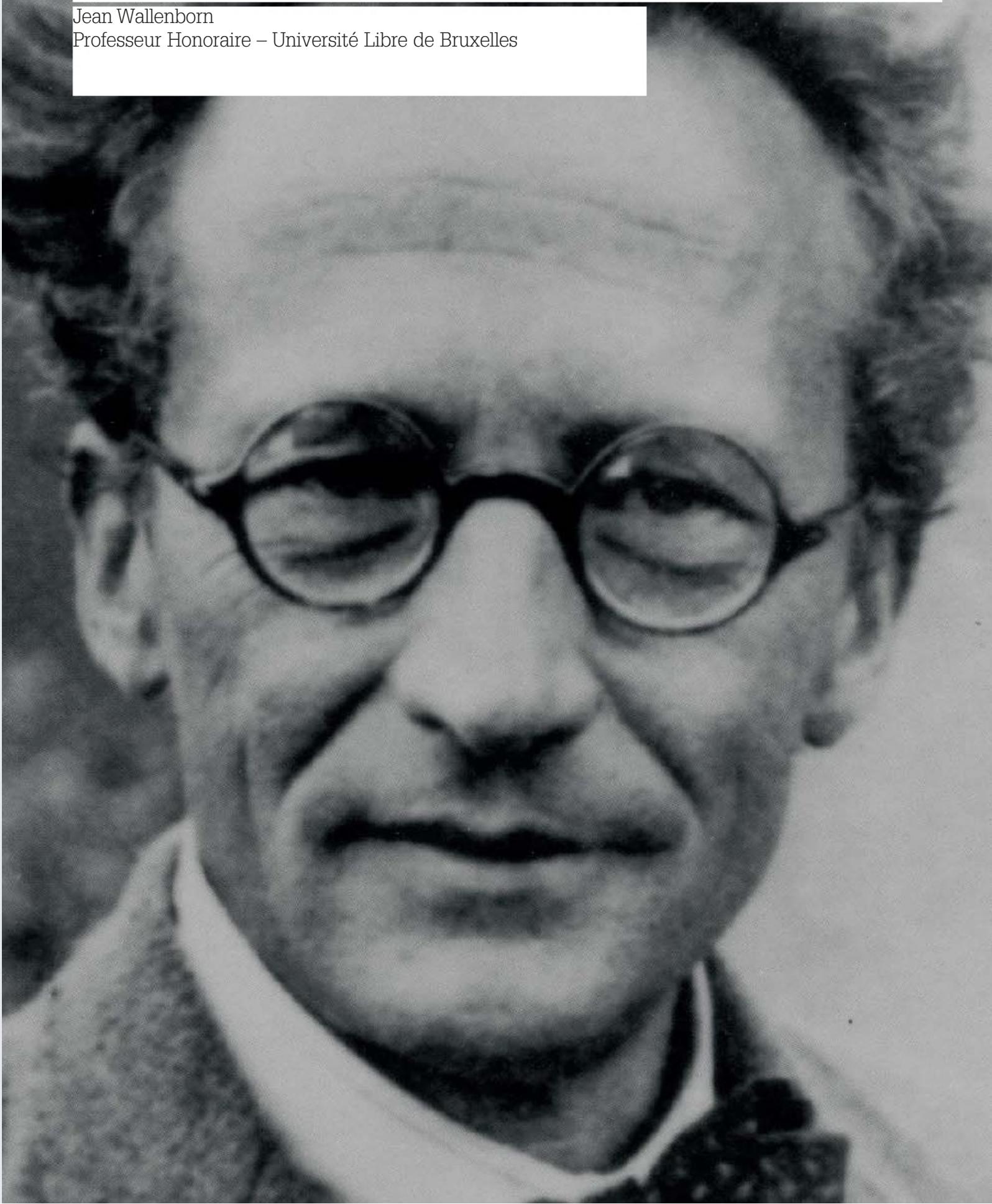
fois dans une fibre optique.



Les vacances du chat de Schrödinger (ou le jeu de la téléportation)

Jean Wallenborn

Professeur Honoraire – Université Libre de Bruxelles



Minou, le chat d'Erwin Schrödinger, vient de réchapper à une expérience inventée par son maître. Il a passé plusieurs jours enfermé dans une boîte dans laquelle le hasard quantique devait le tuer ou le laisser vivre. Le

hasard lui ayant été favorable, quand Schrödinger a ouvert la boîte, il est apparu vivant et en bonne santé.

Qu'est-ce que Schrödinger voulait démontrer avec

cette expérience

(de pensée)

Schrödinger n'admettait pas les conséquences de l'interprétation probabiliste de la mécanique quantique. En particulier celle que, si un système peut être dans plusieurs états, il peut aussi être dans tous ces états à la fois, tant qu'aucune mesure n'est effectuée. Pour en démontrer l'absurdité, il imagine une expérience dans laquelle un chat est enfermé dans une caisse contenant une capsule de cyanure. Celle-ci peut être brisée par un système relié à la désintégration d'un atome, phénomène quantique purement aléatoire. Tant qu'on ne sait pas si la désintégration a eu lieu, le chat est dans un état de superposition « mort et vivant » ou « ni mort, ni vivant ». Seule une expérience peut lever l'ambiguïté. Ici, il s'agit de l'ouverture de la caisse. Il est à remarquer qu'Einstein, avant Schrödinger, avait proposé pratiquement la même expérience mais le chat y était remplacé par un baril de poudre.

Après l'expérience qu'il a subi, ses maîtres qui vont partir en vacances ne veulent pas abandonner Minou et envisagent de l'emmener avec eux. Mais à ce moment, Minou semble atteint d'une bien étrange maladie : tantôt, il est ici, tantôt, il est là ; à chaque fois qu'on le regarde, il disparaît pour réapparaître ailleurs ; lorsqu'on veut l'attraper, son corps semble se dissoudre et se reformer en un autre endroit.

De quelle maladie souffre Minou ?

Après l'expérience dans la boîte, Minou a gardé un caractère quantique. En vertu du principe d'indétermination d'Heisenberg, il n'est pas possible de connaître à la fois sa position et sa vitesse. Il est donc impossible de le repérer en un endroit déterminé plus qu'une fraction de seconde.

Voilà qu'arrive Médor, un sale roquet qui en veut à tous les chats de la terre. Il n'attend pas pour attaquer : une morsure au chat, un coup de griffe au nez du chien et pas mal de bruit. Les Schrödinger profitent de la bagarre pour récupérer le chat : ils peuvent partir en vacances.

Malheureusement, arrivés sur leur lieu de villégiature, ils se rendent compte qu'ils se sont trompés, ce n'est pas Minou qu'ils ont attrapé, mais un autre chat, Raminagobis, au

caractère noir. Des hôtes pas à grif-
fer les enragés. Des hôtes pas à grif-
ferment à un voisin, pour leur demander d'essayer de retrouver Minou. Pendant la conversation téléphonique Erwin Schrödinger, constate que Raminagobis change de couleur à chaque fois qu'il le regarde. Le voisin est très étonné parce que Médor qui cherche la bagarre dans le coin change lui aussi de couleur à chaque fois qu'il l'aperçoit. Plus curieux encore,

Erwin et le voisin constatent que le

chat et le chien ont à chaque fois la même couleur: quand Raminagrobis est noir ou fauve, Médor est également noir ou fauve, au même instant.

Quelle est la maladie contagieuse qui frappe le chien et le chat?

Après leur (violente) interaction, les états de Raminagrobis et de Médor sont intriqués (ou enchevêtrés). L'intrication est un phénomène purement quantique dans lequel les états quantiques de deux objets ou plus ne peuvent

pas être décrits indépendamment, c'est-à-dire qu'ils sont corrélés, même si ces objets sont éloignés les uns des autres. Ils se comportent comme s'ils ne constituaient plus qu'un seul objet. Ce phénomène d'intrication est à la base de technologies nouvelles comme la cryptographie quantique, les ordinateurs quantiques et la téléportation.

C'est en 1935 que Einstein, Podolsky et Rosen ont attiré l'attention sur ces états intriqués qui font de la théorie quantique une théorie non locale. Dans leur esprit, cela démontrait que la théorie était incomplète et qu'elle devait être sous-tendue par des variables cachées. En 1965, J. Bell a montré qu'il était possible de vérifier si ces variables cachées existaient. Des tests expérimentaux réalisés par A. Aspect en 1981 ont définitivement montré que ces variables cachées n'existaient pas et donc que la mécanique quantique a un caractère non local.

Sur ces entrefaites, Minou, qui a maintenant une couleur indéfinissable, fait sa réapparition. Erwin, constatant que toutes les conditions sont réunies, décide alors de téléporter

Minou de son domicile à son lieu de séjour. L'opération est dangereuse parce que si la téléportation rate, au mieux, s'il n'est pas mort, Minou aura complètement changé et sera méconnaissable. Mais Minou en a vu d'autres depuis qu'il a été enfermé dans une boîte avec une capsule de

cyanure. Erwin propose un protocole pour réussir la téléportation qui est suivi à la lettre:

1. Le voisin mesure une combinaison spéciale des couleurs de Médor et Minou sans toutefois déterminer individuellement la couleur du chat ou celle du chien. Minou semble déstructuré et disparaît. Le chien a l'air groggy.
2. Le voisin communique par téléphone le résultat de sa mesure à Erwin.
3. Erwin ajuste l'état de Raminagrobis en tournant sa queue d'un angle approprié. Raminagrobis devient une copie conforme de Minou.

Aucune matière n'a été transportée. Seul l'état de Minou a été transporté sur Raminagrobis qui a fourni ses atomes pour devenir Minou.

Exit la mauvaise humeur de Raminagrobis. Minou se fait cajoler par la famille Schrödinger.

Pourquoi ne pouvez-vous pas téléporter votre chat?

Le protocole de téléportation décrit ci-dessus a été utilisé pour téléporter l'état d'un photon (particule de lumière) sur plusieurs kilomètres et un état d'énergie d'un atome sur quelques micromètres.

Il faut remarquer qu'aucune particule n'est déplacée pendant le processus-même de téléportation et qu'à l'issue de l'opération l'état téléporté est détruit sur la particule qui le portait initialement. D'autre part, il est nécessaire de commu-

niquer par une voie classique (ici, le téléphone) ce qui évite que de l'information soit transférée plus vite que la lumière, ce qui serait contraire à la relativité.

Les atomes et les photons sont des particules qui obéissent aux lois de

la mécanique quantique. Celle-ci que sont les états intriqués et la téléportation dont l'interprétation ne fait pas encore l'unanimité des physiciens.

Il y a peu de chances que votre chat acquière des propriétés quantiques. En effet, quand plusieurs particules sont en interaction, elles perdent leurs propriétés quanti-

ques et cela d'autant plus vite que les particules sont nombreuses. C'est ce que l'on appelle la décohérence. Il ne fait aucun doute que pour faire un chat vivant, il faut un très grand nombre d'atomes liés entre eux et que ce chat appartient au monde classique auquel nous sommes habitués.

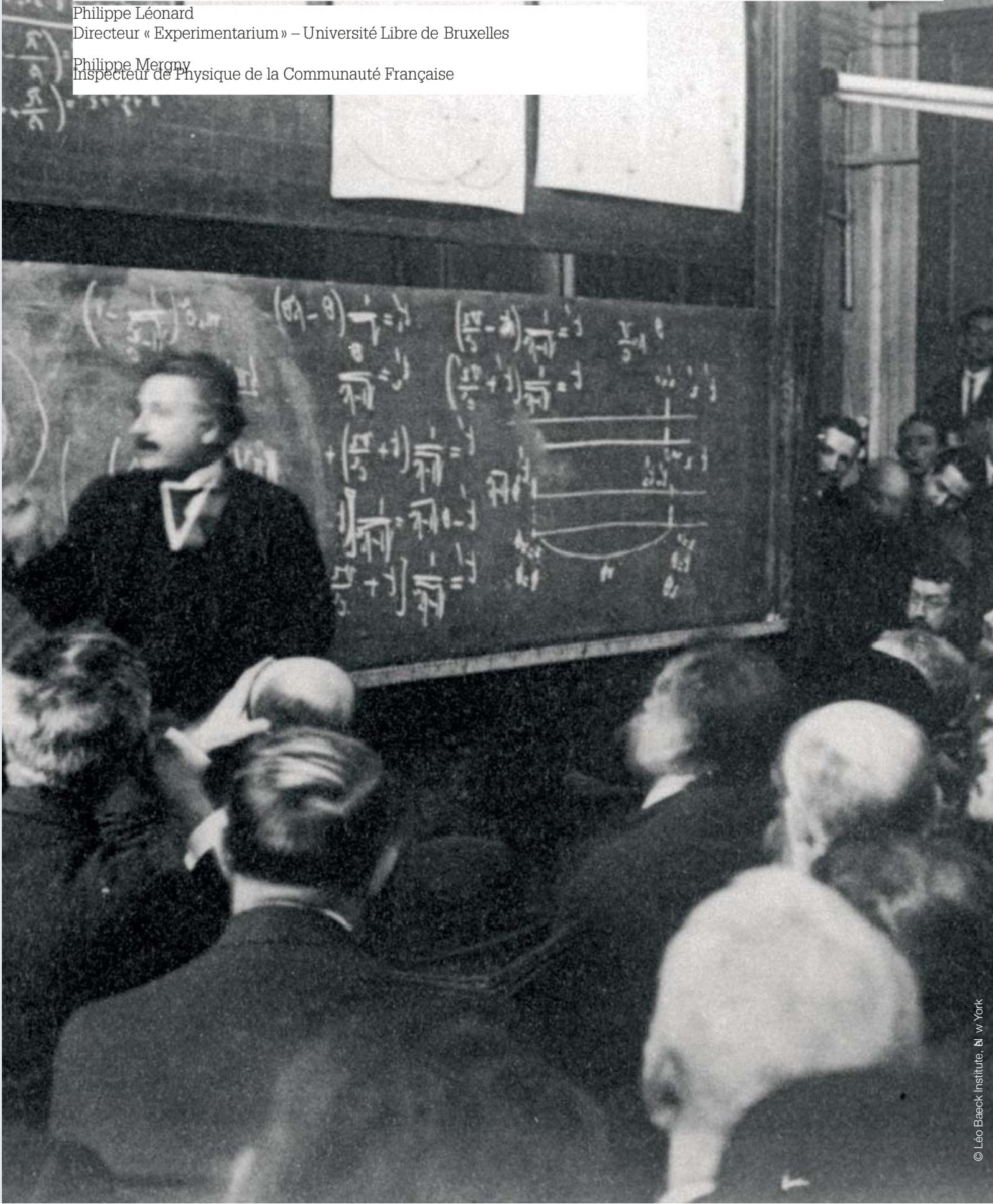
La téléportation d'un chat est donc (encore) du domaine de la science-fiction.

Merci à Caroline Verhoeven et Thomas Durt qui m'ont branché sur le sujet et à Nicolas Cerf pour ses conseils et avis.

La relativité restreinte

Philippe Léonard
Directeur « Experimentarium » – Université Libre de Bruxelles

Philippe Merony
Inspecteur de Physique de la Communauté Française



Tout est relatif !?

Au début du xx^e siècle, le mot relativité était tellement à la mode que nous pouvons, aujourd'hui, sans peine, imaginer les badauds se lançant des invectives dans lesquelles le « tout est relatif » était certainement une façon de clore une discussion en réinventant un fatalisme presque nonchalant.

En fait d'éprouver la relativité des choses comme son nom tend à nous le faire penser, cette théorie qui a révolutionné la physique a surtout comme objet d'en déterminer les caractères absolus!

Le principe de relativité

Quand Galilée, au début du xvii^e siècle, posait la question de savoir où tomberait une pierre lâchée par la vigie d'un bateau qui se déplace à vitesse constante et en ligne droite sur la mer, à savoir : au pied du mât, en avant ou en arrière de celui-ci, c'est bien à la recherche d'une unité dans la description physique des mouvements qu'il pensait. Nous sommes sur un bateau qui a pour nom la Terre et lorsque nous lâchons un objet, il tombe simplement à nos pieds malgré la vitesse hallucinante du navire qui nous emporte (300 m/s en rotation vers l'Est à nos latitudes, 30km/s en orbite autour du soleil et 300 km/s autour du centre de la Voie Lactée, notre galaxie¹). La conclusion à cette question adroite est qu'il semble impossible de distinguer par la physique des bateaux qui sont en mouvement rectiligne uniforme les uns par rapport aux autres. Autrement dit, il est impossible, dans ce cas, de détecter la vitesse du bateau.

Quand Isaac Newton raconte sa vision de la chute des pommes, il n'est pas moins absolutiste : la grande transgression de sa pensée est d'avoir fait valoir que la force qui fait tomber la pomme a la même origine que celle qui fait tourner la Lune autour de la Terre. Voici une physique toute fraîchement née qui affirme son existence par l'identité des lois du céleste et du terrestre. La gravitation « inventée » par Newton est un exercice d'universalité. En fait de relativiser, il s'agit surtout d'unifier les champs d'application des lois physiques à l'univers tout entier.

Le zéro et l'infini.

La vitesse d'un mobile mesurée par deux observateurs-bateaux différents sera généralement différente et

¹ Si la durée d'observation n'est pas trop longue, ces différents mouvements de la Terre peuvent être considérés comme des MRU.

la loi galiléenne de composition des vitesses est simple: si vous observez un passant qui marche à 4 km/h sur un tapis roulant qui l'emmène à 2 km/h dans son sens de marche, il vous paraîtra se déplacer à 6 (= 4 + 2) km/h par rapport à vous. Toutefois, lorsque la vitesse de propagation de la lumière dans le vide, notée c et valant environ 300 000 km/s, fut enfin mesurée² vers 1850 (Fizeau et Foucault à Paris), il fut temps de poser la question de savoir si celle-ci était augmentée de 30 km/s dans le sens du mouvement orbital de la Terre et amputée des mêmes 30 km/s en sens contraire. En 1880, l'Américain Michelson tenta de détecter cette différence et échoua malgré l'extrême sensibilité de son dispositif expérimental. Tout se passait donc comme si la vitesse de la lumière jouait le rôle d'infini dans la règle d'addition galiléenne: $\infty + 30 = \infty$!!! Vingt-cinq années de ruminations collectives s'ensuivirent.

Mais alors, comment dois-je

composer les vitesses ?

Si la vitesse est v par rapport à un système de référence qui est lui-même en mouvement à vitesse w par rapport à vous, alors la vitesse par rapport à vous est u telle que :

$$u = \frac{w+v}{1 + \frac{w \cdot v}{c^2}}$$

ce qui donne $u = c$ si $v = c$.

Annus mirabilis

En 1905, année prodigieuse, Albert Einstein proposa de tourner le problème en prenant pour bases l'invariance de la vitesse de la lumière dans le vide et le principe de relativité galiléenne étendu à tous les domaines de la physique, mécanique, optique et également électromagnétisme. Or, le fait que la vitesse de la lumière soit désormais une constante rend nécessairement étranges des notions pourtant considérées comme élémentaires telles que la mesure du temps, de l'espace ou de la simultanéité de deux événements.

En effet, la vitesse de la lumière s'obtient en mesurant la distance parcourue par celle-ci par unité de temps, si cette vitesse doit rester constante en toutes circonstances alors c'est que les mesures de la longueur des objets et celles des durées ne sont pas les mêmes pour tous. La vitesse de la lumière devient un absolu ; les mesures de temps et de longueur deviennent relatives.

Les secondes deviennent-elles des heures ?

Dans la vie de tous les jours, nous percevons couramment que le temps semble se traîner quand nous nous ennuyons alors qu'il nous fait défaut en pleine action. S'agit-il bien de cela quand Einstein dit le temps relatif ?

Pas du tout. Par contre la relativité introduit une relation entre les durées mesurées par les horloges de deux observateurs en mouvement l'un par rapport à l'autre ; une relation qui n'est pas une simple égalité.

Pour comprendre, imaginons deux horloges parfaites, identiques et synchrones embarquées dans deux voitures. Ces horloges d'un nouveau type ont un tic-tac piloté par un fais-

ceau lumineux qui fait la navette entre deux miroirs parallèles fixés aux portières de la voiture.

La voiture n°1 reste immobile au bord de la route et son conducteur observe l'autre voiture qui passe à son côté à vitesse v (constante), vers la droite. Le principe de relativité nous assure que l'horloge de la voiture n°2 fonctionne normalement: la lumière fait le va-et-vient.

Que voit le conducteur à l'arrêt? Puisque la vitesse de propagation de la lumière reste inchangée et qu'il la voit parcourir une distance plus grande que la distance entre les deux miroirs (entre le tic et le tac), il faut bien qu'il admette que la durée correspondante est, elle aussi, allongée. Voici notre conducteur au repos boulevé : alors que sa propre horloge lui paraît battre normalement, celle qu'il voit fonctionner dans la voiture en mouvement lui semble bien lente! Le temps du conducteur en mouvement lui apparaît comme dilaté! Nous pouvons également prévoir que si la vitesse de la voiture n°2 était égale à celle de la lumière, alors le tic-tac de

son horloge paraîtrait suspendu: son temps se serait arrêté.

Interrogeons le conducteur de la voiture n°2: son horloge fonctionne parfaitement, tout est normal, un beau tic-tac régulier battant la seconde. Le paysage défile et, avec lui, une voiture en sens inverse, à vitesse v . Elle possède elle aussi une horloge lumineuse. Surprise: cette dernière bat bien plus lentement que la sienne!

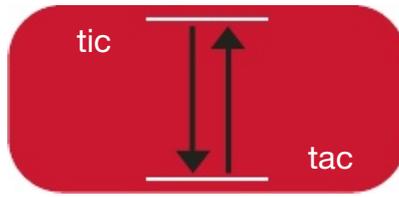
La situation de chaque observateur est donc parfaitement normale, seule la mesure que l'un fait du temps de l'autre est altérée.

Le paradoxe est que si les conducteurs sont jumeaux, l'un voit l'autre vieillir plus lentement que lui alors que l'autre a, de son côté, exactement la même impression⁴.

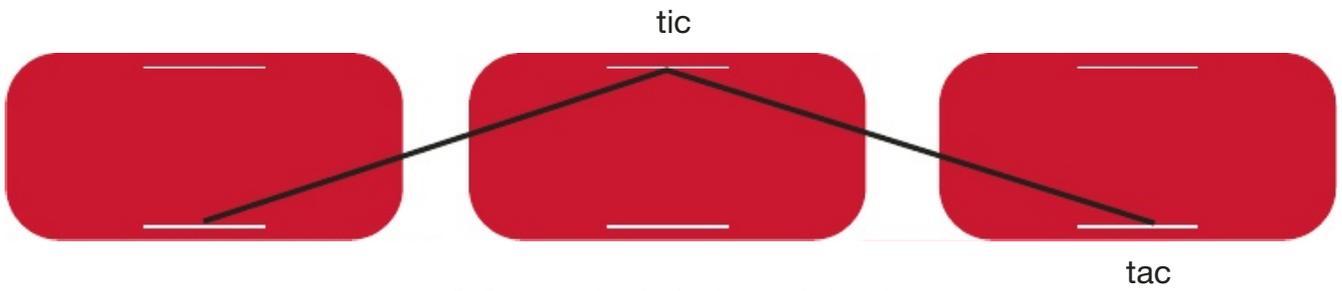
²La valeur exacte de c est 299 792,458 km/s.

³La contraction des longueurs n'est pas envisagée sur ce schéma.

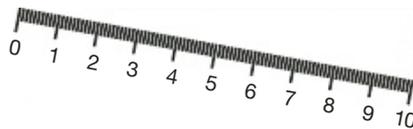
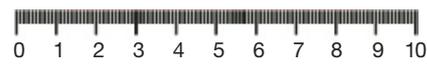
⁴C'est le paradoxe des jumeaux ou paradoxe de Langevin.



1



2. Dans ce dessin, la vitesse de la voiture est exagérée par rapport à celle de la lumière³



3

Comment calculer le facteur de dilatation du temps ?

On définit le facteur γ tel que :

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

et la dilatation du temps est alors $T = \gamma \cdot T_0$ où T_0 est le temps propre mesuré dans le système où l'horloge est au repos.

Si $v = c$, T devient infini.

Sommes-nous des nains portés sur les épaules de géants en mouvement ?

Intéressons-nous maintenant à la mesure que pourrait réaliser le conducteur n°1 de la longueur de sa propre voiture. Profitant du passage de la voiture n°2 à vitesse v , il peut noter successivement à quel moment l'avant de cette voiture croise l'arrière de la sienne et ensuite quand il croise son avant. La longueur de sa voiture est alors $L_0 = v \cdot \Delta t$ où Δt est l'intervalle de temps mesuré. Si par contre, le conducteur n°2 qui, rappelons-le, se pense immobile lui aussi et voit le paysage défiler vers lui à vitesse v , procédait de la même manière que le conducteur 1 pour mesurer la longueur de la voiture 1, il verrait cette voiture passer devant lui en un temps $\Delta t' / \gamma$ plus court⁵. Sa mesure $L = v \cdot \Delta t' / \gamma$ donnerait une longueur plus courte que celle obtenue par le conducteur n°1. C'est la contraction des longueurs. La réciproque est également vraie : les deux conducteurs-observateurs ne seront pas d'accord sur la longueur de la voiture n°2 : le conducteur n°1 la verra plus courte

que la mesure faite par le conducteur n°2. Bien entendu, la longueur apparente semblera d'autant plus contractée que le temps est dilaté. Cet effet ne concerne que les dimensions dans l'axe du mouvement. Tout se passe comme si les unités de mesure utilisées par les deux conducteurs ne coïncidaient pas : une sorte d'obliquité du regard comme lorsqu'une mesure est réalisée avec une parallaxe.

pour des observateurs en MRU l'un par rapport à l'autre. Einstein étudia la relativité entre des observateurs en accélération l'un par à l'autre dans la théorie de la relativité générale.

Une théorie vérifiée ?

Les effets de dilatation du temps ont pu être vérifiés sur les muons,

des particules chargées, électriquement qui ressemblent à des électrons plus massifs. Ces particules sont produites dans la haute atmosphère par les rayons cosmiques et nous savons, par ailleurs, qu'elles se désintègrent en un temps très court (environ $2 \mu s$) lorsqu'elles peuvent être observées à faible vitesse. Dans l'atmosphère terrestre, leur vitesse est proche de c de sorte que ces particules ne pourraient parcourir qu'une distance de $3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 600$ mètres avant de se désintégrer. Comme nous pouvons habituellement les observer jusqu'au niveau du sol, il faut admettre que leur durée de vie s'est considérablement dilatée.

Du point de vue des muons, leur temps de vie vaut $2 \mu s$, mais il y a contraction de l'épaisseur de l'atmosphère terrestre (600 mètres).

Pourquoi cette théorie est-elle restreinte ?

Parce que les symétries décrites ci-dessus entre les perceptions des différents observateurs ne valent que

⁵Par la dilatation du temps.

$E = mc^2$ à la loupe

Jan Heyninck

IWT – Doctoraatsstudent in de Wetenschappen – Vrije Universiteit Brussel



«À quoi vous fait penser le nom d'Einstein?»

Pour beaucoup, la réponse à cette question est celle-ci: «E égal m c carré, monsieur...».

Cette formule est très probablement l'équation physique la plus connue à ce jour. Rares sont pourtant ceux qui peuvent dire ce qu'elle signifie exactement et à quel point son interprétation demeure importante pour la recherche actuelle.

Origine et signification de la formule

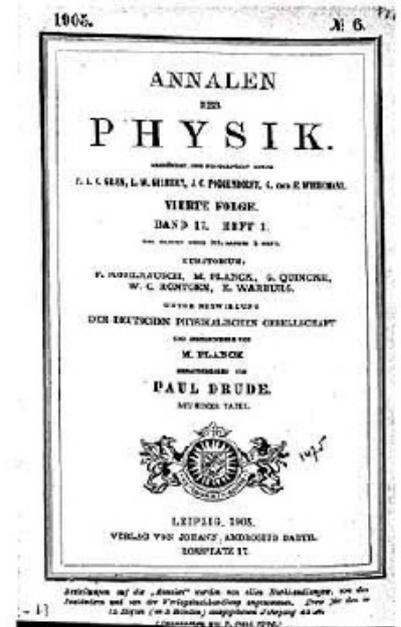
$$E = mc^2$$

C'est en 1905, *annus mirabilis*, qu'Einstein fit paraître l'article intitulé «Est-ce que l'inertie d'un corps dépend de son contenu en énergie?» dans la revue «*Annalen der Physik*»

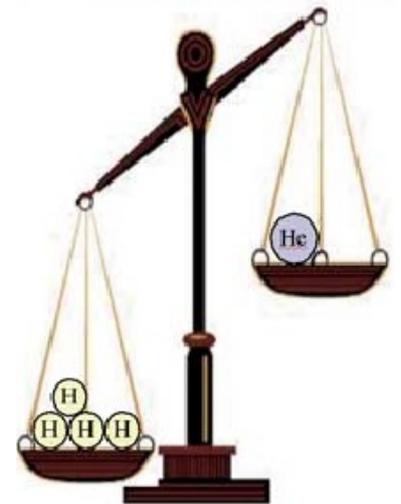
Dans cet article, Einstein est parti de sa propre théorie de la relativité, qui découle de la relativité selon Galilée et présuppose une vitesse de la lumière constante dans tous les systèmes de référence. Il résulte de cette nouvelle théorie que tout objet au repos doit obéir à l'équation $E = mc^2$. Ou, en toutes lettres, l'énergie contenue par un objet équivaut à sa masse multipliée par le carré de la vitesse de la lumière. Mais la formule d'Einstein est bien plus importante. Elle démontre très concrètement que l'énergie et la masse sont en fait identiques, ou, dans les propres termes d'Einstein, qu'elles sont toutes deux des manifestations du même phénomène ; elles sont équivalentes...

elles sont équivalentes...

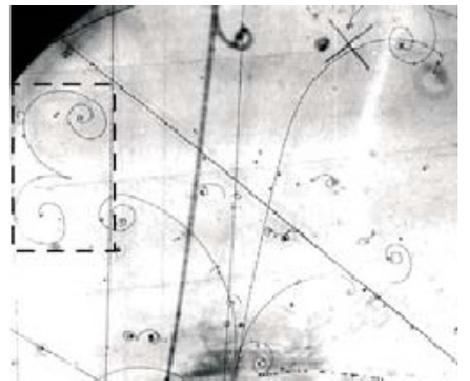
La masse peut-elle donc être convertie en énergie, ou vice-versa? Drôle de question, non ? Un ballon de foot qui se transformerait spontanément en une gigantesque source lumineuse. Ou inversement, la lumière de votre lampe bureau soudain pourvue de masse. De telles transformations semblent pourtant bien exister au niveau (sub)atomique. À l'aide de



1. Première page de la revue scientifique



2. Quatre atomes d'hydrogène (H) pèsent plus qu'un atome d'hélium (He).



3. Production d'une paire électron-positron.

quelques exemples éloquentes, nous entendons démontrer que le contenu de cette formule n'est pas limité à une échelle microscopique et qu'on en trouve de multiples manifestations dans notre vie quotidienne...

Transformation de la masse en énergie

Examinons donc cette équation d'un peu plus près. $E = mc^2$ signifie en effet qu'à toute masse déterminée correspond une quantité d'énergie.

Étant donné que le facteur c^2 , le carré de la vitesse de la lumière, équivaut en fait à $9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$, on peut se re-

présenter comment une faible quantité d'énergie. Supposons par exemple que la masse de votre ballon de football 300 g, et que cette masse soit entièrement convertie en énergie. Un bref calcul montre que l'énergie correspondante ($8,3 \times 10^9 \text{ kWh}$) suffirait pour approvisionner la Belgique en électricité pendant un peu plus d'un mois!

En physique nucléaire, il existe deux processus dans lesquels la conversion de masse en énergie survient concrètement: la fusion nucléaire et la fission nucléaire. La fusion nucléaire est sans doute mieux connue comme le moteur de notre soleil, tandis que la fission nucléaire est ce qui maintient par exemple une centrale nucléaire en activité et nous fournit de l'électricité.

Les rayons du soleil sous une autre lumière

Notre soleil est composé de 75% d'hydrogène et de 25% d'hélium. L'hélium est continuellement formé à partir de la fusion de quatre atomes d'hydrogène. En comparant la

masse de quatre noyaux d'hydrogène avec celle du noyau d'hélium qui en résulte, on constate qu'une partie de la masse d'origine a disparu: elle s'est transformée en énergie sous la forme d'un rayonnement électromagnétique.

Les rayons et la chaleur du soleil résultent donc directement de la fusion nucléaire. C'est grâce à cette manifestation de la formule $E=mc^2$ qu'il est possible de vivre sur terre!

La fission de l'atome, source d'électricité

Comment fonctionne une centrale nucléaire? Grâce à la fission nucléaire. Nous venons d'expliquer comment la fusion de noyaux légers comme ceux d'hydrogène engendrait de l'énergie. Voyons maintenant comment la fission de noyaux très lourds semble également produire de l'énergie. Ainsi, la masse d'un noyau lourd d'uranium ou de plutonium est

plus grande que celle des éléments engendrés. Cette différence de masse est également convertie en une immense quantité d'énergie. Dans le cas d'une centrale nucléaire, cette énergie est utilisée pour chauffer de l'eau. La vapeur ainsi produite fait tourner des turbines qui génèrent à leur tour de l'électricité.

L'uranium et le plutonium sont radioactifs et ils ont par conséquent une très longue durée de vie avant d'expirer spontanément. Les éléments issus de leur désintégration génèrent à leur tour de nouveaux éléments: il en résulte une réaction en chaîne qui maintient la centrale en activité.

Outre les centrales nucléaires, il faut hélas parler aussi de la bombe atomique. Cette application est également basée sur la fission nucléaire, mais la réaction en chaîne est ici tellement

rapide qu'elle libère une gigantesque source d'énergie sur un temps très court: et la bombe explose... Einstein a nié pendant longtemps la possibilité de créer la bombe atomique et il n'a jamais collaboré à son développement. Son unique contribution a été d'encourager dans une

lettre le président Roosevelt à la mettre au point, de peur que les Nazis ne soient les premiers à se procurer de la technologie nécessaire.

Transformation de l'énergie en masse

Bien que l'équivalence entre masse

et énergie soit correcte, il doit aussi exister des processus par lesquels de la matière est produite à partir d'énergie. En guise d'exemple, voici la photo d'une chambre à bulles, réalisée à la fin des années 60.

Toutes les particules chargées, comme les électrons et les protons, laissent sur leur passage une trace sous forme de petites bulles. Afin d'évaluer la charge et l'impulsion (masse x vitesse)

d'une particule, la chambre est placée dans un champ magnétique. Les particules chargées positivement évoluent dans le sens des aiguilles d'une montre et les particules négatives dans le sens inverse. Sur la photo, on distingue clairement deux traces. Elles ont la même courbure, mais l'une se déplace dans le sens des aiguilles d'une montre et l'autre dans le sens contraire. Ainsi naissent, « surgies du néant », deux particules de masse et à vitesse identiques, mais de charge électrique opposée...

Antimatière

La figure 3 illustre la production d'une paire électron-positron à partir d'un rayonnement électromagnétique (énergie). « Positron » est le nom donné à l'antiparticule de l'électron.

Sa masse est la même, mais tous ses nombres quantiques, dont sa charge électrique, sont opposés. Toute particule de matière a son « anti-sosie ». L'un des grands mystères de la physique contemporaine réside dès lors dans cette question : où est passée l'anti-matière ? Aussi loin que porte notre regard à travers l'univers, on peut observer de la matière semblable à celle que nous connaissons sur terre, tandis qu'à l'origine (Big Bang), matière et antimatière furent produites en proportions égales ...

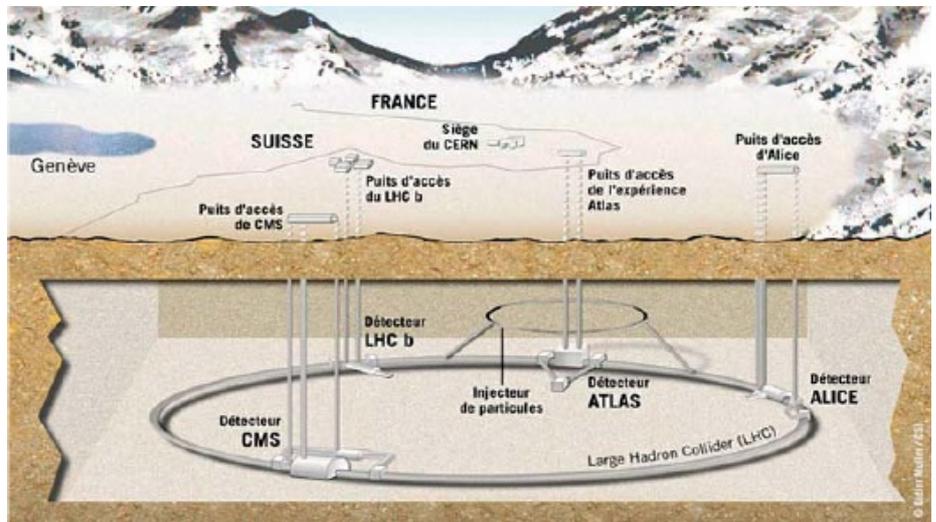
Conclusion

À l'aide de quelques exemples, nous avons illustré la signification et l'importance de la formule $E = mc^2$. Il apparaît clairement qu'une bonne partie de la recherche contemporaine reste basée sur des manifestations de cette célèbre formule.

Création de matière dans un accélérateur de particules

La formule d'Einstein peut s'écrire également $m = E/c^2$. Le facteur c^2 implique désormais qu'une énorme quantité d'énergie est indispensable à la production d'une masse infime. C'est néanmoins possible et ça a déjà été réalisé grâce à des accélérateurs de particules. Au CERN (Centre Européen pour la Recherche Nucléaire), par exemple, des protons (noyaux d'hydrogène) vont être prochainement accélérés à l'intérieur d'un anneau souterrain de 27 km de long (figure 4). Tour après tour, les particules lancées dans les deux sens accumuleront de plus en plus d'énergie et elles finiront par entrer en collision frontale. Ces impacts dégageront une telle quantité d'énergie qu'ils devraient entraîner la production de particules lourdes et instables. C'est

de cette façon qu'a été découvert le boson W, une particule environ 85 fois plus lourde qu'un proton. C'est cette particule qui est responsable de la désintégration radioactive (« force nucléaire faible »). L'un des principaux objectifs des prochaines expériences est la détection du boson de Brout-Englert-Higgs, qui devrait permettre d'expliquer pourquoi la matière est pourvue de masse ...



4. Le nouvel accélérateur LHC en construction au CERN (Genève), avec un schéma des quatre expériences envisagées

Qu'est-ce que la relativité générale?

Glenn Barnich
Maître de Recherches FNRS

Christiane Schemblond
Professeur de l'Université – Université Libre de Bruxelles



La gravitation est, à l'échelle atomique, la plus faible des quatre interactions fondamentales connues; à l'échelle de l'Univers, elle est la force dominante. La relativité générale est la théorie relativiste de la gravitation. Elle est le résultat des efforts consentis par Einstein entre 1907 et 1915 pour faire entrer l'interaction gravitationnelle dans le cadre relativiste.

D'après Newton, la force gravitationnelle entre deux masses M et m est proportionnelle au produit des masses et inversement proportionnelle au carré de leur distance. Aussi, cette force agit instantanément, en contradiction flagrante avec la relativité restreinte selon laquelle aucun signal ne peut se propager plus vite que la vitesse de la lumière.

C'est en cherchant à concilier la théorie de **Maxwell** des interactions électromagnétiques avec la mécanique de **Newton**, qu'Einstein a été amené à développer en 1905 la mécanique relativiste et à modifier, par là, la conception classique de l'espace et du temps. Dès 1907, il s'est mis à chercher une théorie relativiste de la gravitation. La réponse qu'il a apportée a révolutionné la notion d'espace-temps: au lieu d'être le cadre immuable dans lequel se produisent tous les phénomènes, l'espace-temps devient une entité dynamique à part entière: le contenant et le contenu évoluent de concert.

Principes de relativité

Le principe de relativité de Galilée postule que les **lois de la mécanique** sont les mêmes pour tous les observateurs animés d'un mouvement rectiligne uniforme.

Comme le dit Einstein, la théorie de la relativité restreinte est née «...en réponse à la question: *Le principe de relativité est-il réellement en contradiction avec les équations de Maxwell dans l'espace vide?*» En fait, il n'y a pas de contradiction à la condition d'abandonner l'idée d'un temps unique et absolu et de modifier la description même du mouvement rectiligne uniforme.

Le nouveau principe de relativité restreinte d'Einstein postule que les **lois de la physique** sont les mêmes pour tous les observateurs animés

d'un mouvement rectiligne uniforme. Comme le temps aussi dépend du mouvement, le concept de simultanéité est profondément modifié dans la nouvelle théorie et une multitude de nouveaux phénomènes physiques apparaissent comme la dilatation du temps, la contraction des longueurs et l'équivalence entre masse et énergie résumée dans la célèbre relation $E = mc^2$.

Cependant, la relativité restreinte ne s'ouvre pas à la théorie de la gravitation de Newton. Le premier pas vers la relativité générale, c'est-à-dire vers le traitement relativiste de l'interaction gravitationnelle, est l'œuvre de Hermann Minkowski qui a géométrisé la relativité restreinte et introduit la notion d'espace-temps.

Gravitation et accélération sont équivalentes

La théorie relativiste de la gravitation repose sur le fait expérimental que, dans un champ gravitationnel constant, tous les corps tombent de la même manière. Ceci se traduit par l'égalité numérique entre la masse inertielle m (celle qui figure dans $F = m a$) et la masse gravitationnelle m (qui intervient dans l'expression de la force de gravité). Einstein comprend que cette égalité numérique recouvre une équivalence entre gravitation et inertie et bâtit sa théorie sur l'idée que l'observateur en chute

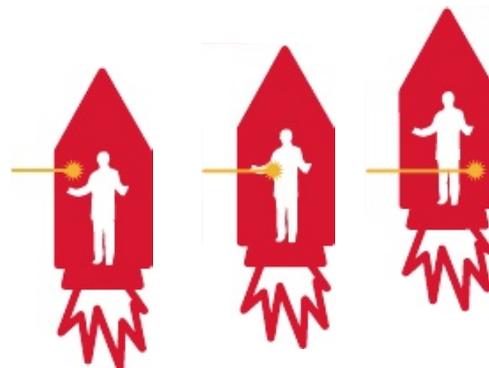
libre dans un champ de gravitation ne perçoit plus l'effet de ce champ. Einstein en tire un nouveau principe: dans un référentiel en chute libre, les lois de la physique doivent être celles que dicte la relativité restreinte à un observateur inertiel. La force gravitationnelle peut être introduite ensuite en passant de l'observateur inertiel à un observateur accéléré.

Le principe d'équivalence

En 1907, Einstein réalise qu'un observateur en chute libre ne sent plus le champ de gravitation. Il comprend que gravitation et accélération doivent, d'une certaine manière, être équivalentes. Ce principe d'équivalence, dont l'origine se situe dans les travaux de Gallée et Newton, est le premier pas vers une théorie relativiste de la gravitation.

B. Les moteurs de la fusée sont maintenant allumés. Pour l'observateur qui est accéléré, le projectile est dévié vers le sol de la fusée.

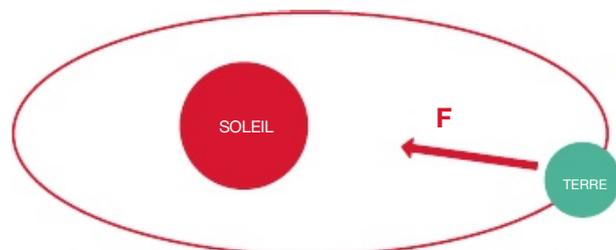
A. Imaginons un observateur dans une fusée en chute libre. Un projectile (en jaune ici) comme une particule de lumière par exemple, se propage en ligne droite, s'il est lancé à l'horizontale.



C. C'est exactement le même effet que produit par un champ de gravitation.



Gravité de Newton et d'Einstein



La gravité selon Newton (fin XVII^e)

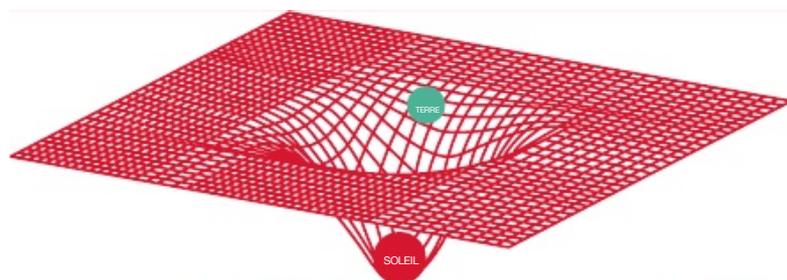
$$F = G \frac{Mm}{d^2}$$

Le soleil exerce une force sur la Terre. Et vice versa.

La gravité selon Einstein (début XX^e)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8 \pi G T_{\mu\nu}$$

La masse du Soleil déforme l'espace-temps. La Terre est en chute libre et suit une trajectoire courbe dans cet espace-temps. Et réciproquement.



«L'espace dit à la matière comment bouger. La matière dit à l'espace comment se courber» (J.A.Wheeler)

La courbure de l'espace-temps remplace la force de gravité

Si on admet des observateurs accélérés, la géométrie des espaces plats de **Minkowski** n'est plus adaptée: c'est la géométrie des espaces courbes de **Riemann** qui prend le relais. Dans ce cadre mathématique, le principe d'équivalence exprime que l'on peut toujours négliger le champ gravitationnel localement. Cependant, il n'est généralement pas possible de l'éliminer partout à la fois. Einstein comprend que la cause de l'obstruction est dans la courbure de l'espace-temps.

Illustrons ce qui précède par un exemple de géométrie courbe qui nous est familier: la surface de la Terre. Si nous voulons mesurer l'aire de notre jardin, nous pouvons utiliser la géométrie d'Euclide et le théorème de Pythagore et ignorer le fait que la Terre est sphérique: à l'échelle de notre jardin, les effets de courbure de

la Terre sont négligeables. Ceci n'est plus vrai à plus grande échelle: le trajet le plus court en avion Séoul-Rio suit un grand cercle. Inversement, sur une carte plane du globe terrestre, ce chemin décrit un arc de cercle et paraît plus long que le segment de droite reliant Séoul à Rio.



Quel est le chemin le plus court? Parce que la Terre est ronde, le chemin le plus court d'un point à un autre est un arc de grand cercle. Dans l'espace-temps aussi le chemin le plus court est généralement courbé.

L'idée que le champ de gravitation doit être identifié à la géométrie de l'espace-temps s'est progressivement imposée à Einstein. Tout au long de la construction de sa théorie de la Relativité Générale, il a été guidé par l'exigence que celle-ci devrait reproduire, dans une certaine limite, les résultats de la gravitation de Newton, dont les succès au niveau de la physique terrestre et du système solaire sont incontestables.

En partant du principe d'équivalence de 1907, il réussit finalement en 1915 à écrire les équations qui relient la géométrie de l'espace-temps aux caractéristiques de la matière et/ou du rayonnement présents. Ainsi, dans la relativité générale, l'espace-temps est devenu une grandeur dynamique gouvernée par la distribution de matière et de rayonnement. Réciproquement, la courbure de l'espace-temps dicte les règles du mouvement de cette matière. C'est ce qu'expriment les équations d'Einstein.

De la dilatation du temps au système GPS

Comme conséquence de la nouvelle théorie de la gravitation, il apparaît que le temps s'écoule moins vite là où la gravité est plus forte.

En réalité, l'explication de cet effet n'utilise pas les équations d'Einstein mais seulement le principe d'équivalence. C'est pour cela qu'il a pu être prédit par Einstein dès 1907. Sa vérification expérimentale n'a pu être faite que dans les années 60.

Plus on est près du centre de gravité, plus le temps y est long; si l'effet n'était pas aussi petit, on pourrait voir le garçon vivant tout en haut de la montagne vieillir plus vite que son jumeau dans la vallée.



Galileo, le futur système GPS européen, repose sur un réseau de satellites en orbite autour de la Terre. Il est nécessaire de prendre en compte les corrections de la relativité générale d'Einstein pour assurer son bon fonctionnement (© ESA)

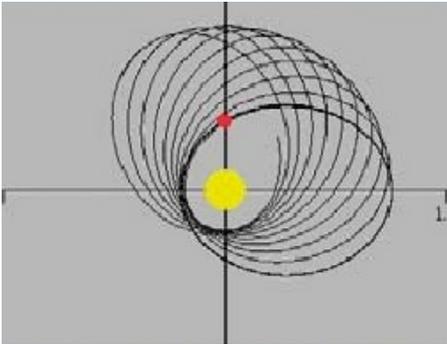
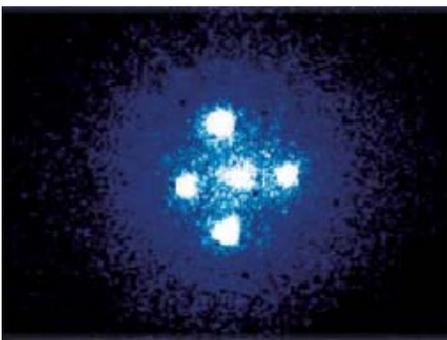


Illustration de l'avance du périhélie. Si l'effet était entièrement dû à la correction relativiste, il faudrait à Mercure 7200 siècles pour que l'avance soit d'un quart de tour.



La déviation des rayons lumineux par une concentration de masse peut donner des images multiples d'un même objet. Ici un même quasar apparaît cinq fois formant la « croix d'Einstein ». C'est un exemple de mirage gravitationnel. (© HST)

Il faut tenir compte de cet effet dans le fonctionnement du GPS, qui fait appel à des horloges très précises embarquées sur des satellites. Sans cela, l'erreur sur la détermination des positions atteindrait près de 10 kilomètres par jour.

Avance du périhélie des planètes

La théorie de Newton rend compte des lois de Kepler sur les mouvements des planètes. La première de ces lois stipule que l'orbite d'une planète autour du soleil est une ellipse dont le soleil occupe un des foyers.

En étudiant plus précisément les orbites des planètes, on a remarqué qu'elles ne sont pas des ellipses parfaites, mais que pour repasser à son périhélie – le point de l'orbite le plus proche du soleil – la planète doit parcourir plus qu'un tour.

Une grande partie de cet effet est due à la présence des autres planètes, mais il reste une différence que la théorie de Newton ne peut pas expliquer. Pour la planète Mercure, elle vaut 43 secondes d'arc par siècle, précisément la correction fournie par les équations d'Einstein.

Ces corrections s'obtiennent assez facilement par le calcul de la trajectoire d'un corps dans le champ de gravitation relativiste du soleil tel qu'il est décrit par la solution de Schwarzschild. Cette toute première solution exacte des équations d'Einstein fut écrite dès 1916 par Karl

Schwarzschild, peu de temps avant sa mort dans les tranchées de la première guerre mondiale.

Déviations des rayons lumineux

Par un calcul du même type mais relatif cette fois-ci aux rayons lumineux dans le champ de gravitation du so-

leil, on montre que la déviation de ces trajectoires est deux fois plus grande que celle que l'on obtient par la théorie de Newton.

Pour mettre ceci en évidence, Einstein propose d'observer la déviation de la position d'étoiles lors d'une éclipse totale du soleil. En 1919 l'astronome anglais Eddington organise une expédition vers deux îles de l'Atlantique où une éclipse du soleil devait permettre de faire les mesures nécessaires : les prédictions de la relativité générale sont en bon accord avec les observations. Cette vérification spectaculaire valut à Einstein une célébrité immédiate auprès d'un large public. C'est le même phénomène qui permet de comprendre l'effet de lentille gravitationnelle, produit par un objet très massif sur la lumière issue d'objets lointains.

Les ondes gravitationnelles

Les équations d'Einstein prédisent l'existence de perturbations de l'es-

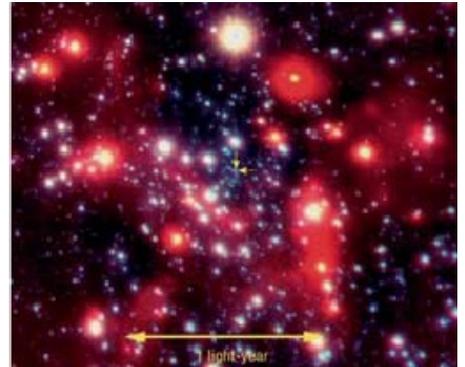
pace-temps appelées ondes gravitationnelles. Ces ondes voyagent à la vitesse de la lumière, comme les ondes électromagnétiques de la théorie de Maxwell. Un peu à la manière d'une vague sur l'eau, le passage d'une onde gravitationnelle « ride » l'espace-temps et affecte les mesures des distances. Ces ondes gravitationnelles n'ont pas encore pu être observées. Il faudrait disposer d'une part de sources très puissantes d'ondes gravitationnelles, telles que des collisions d'étoiles, et d'autre part de détecteurs très grands et extrêmement sensibles.

De tels détecteurs, qui utilisent des interféromètres à lasers pour mesurer les distances avec précision, sont actuellement en construction (LIGO aux USA, VIRGO en Europe). Il y en a même un, appelé LISA, qui devrait être envoyé dans l'espace vers 2011.

Ils devraient permettre d'ouvrir une nouvelle fenêtre sur notre univers. Il existe une preuve indirecte de l'existence d'ondes gravitationnelles basée sur les observations d'un « pulsar binaire » découvert en 1974. Il s'agit de deux étoiles très denses en orbite l'une autour de l'autre, dont l'une émet des ondes radios à intervalles réguliers, un peu à la manière d'un phare. Ce système binaire perd de l'énergie par émission d'ondes gravitationnelles, ce qui implique que les étoiles se rapprochent l'une de l'autre et donc tournent de plus en plus rapidement. Ce phénomène est décrit correctement par la théorie d'Einstein et constitue une preuve indirecte de l'existence d'ondes gravitationnelles. En 1993, les astronomes américains Hulse et Taylor ont reçu le prix Nobel de physique pour cette découverte.



LISA devrait être le tout premier interféromètre à tenter de détecter des ondes gravitationnelles directement dans l'espace. (© ESA)



Le cœur de notre galaxie, la Voie Lactée, vu dans l'infrarouge. Les deux flèches indiquent le centre où se trouverait un trou noir. Sa masse serait supérieure à un million de masses solaires. (© European Southern Observatory)

Trous noirs

Le trou noir le plus simple est celui de la solution de Schwarzschild. C'est l'objet que l'on obtiendrait, par exemple, si la masse du soleil était comprimée dans un volume de quelques kilomètres cubes. Dans l'univers, un trou noir pourrait se former lorsqu'une étoile suffisamment lourde s'effondre sous son propre poids et que l'effet de la gravitation ne peut plus être compensé par la pression de la matière.

D'après la théorie d'Einstein, ce processus devrait donner naissance à une singularité : la courbure de l'espace-temps devient infinie au centre d'un trou noir. Il n'est dès lors plus possible, en restant dans le cadre strict de la relativité générale, de comprendre ce qui s'y passe. Bien qu'embarrassante, a priori, cette singularité ne rend pas la physique caduque car elle est cachée par un horizon : il s'agit d'une surface qui divise l'espace-temps en deux régions. Aucun signal émis à l'intérieur ne peut traverser l'horizon et en sortir.

C'est pourquoi, pour un observateur

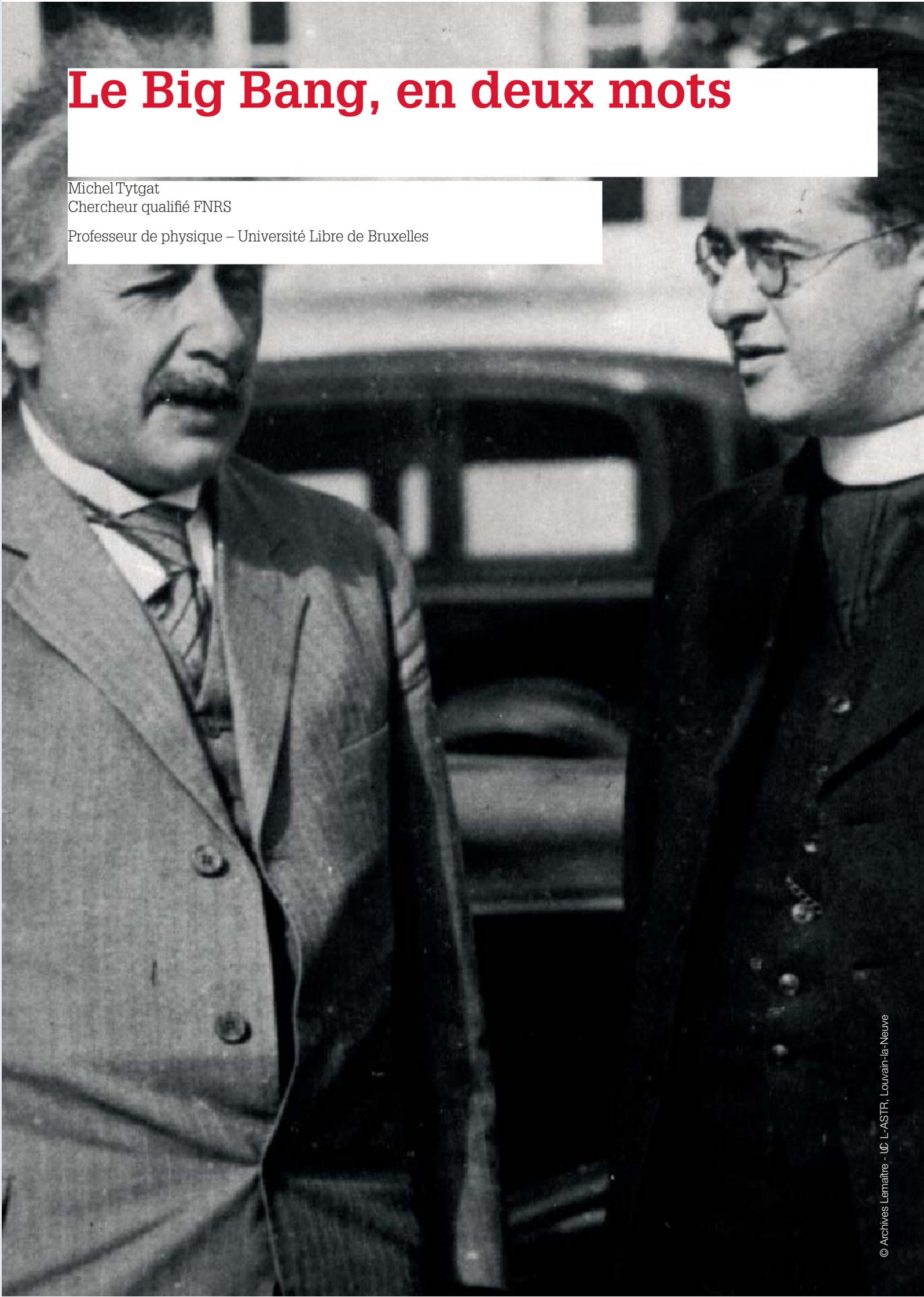
extérieur, l'horizon apparaît comme la limite d'un objet complètement noir. Même s'il n'y a pas encore de preuve irréfutable de l'existence de trous noirs dans notre Univers, un certain nombre d'objets astronomiques ont été répertoriés qui sont d'excellents candidats trous noirs. En fait, les observations actuelles rendent très plausible l'existence d'un trou noir supermassif au centre de notre galaxie, la Voie Lactée.

À propos des trous noirs, Stephen Hawking écrit : « Il n'y avait aucune indication expérimentale pour guider les enquêteurs. Au contraire, la théorie des trous noirs fut développée avant qu'il y ait le moindre indice de leur existence. Je ne connais pas d'autre exemple en science de réussite d'une extrapolation aussi extrême fondée sur la pensée pure. Cela montre la puissance et la profondeur remarquables de la théorie d'Einstein. »

Le Big Bang, en deux mots

Michel Tytgat
Chercheur qualifié FNRS

Professeur de physique – Université Libre de Bruxelles



La théorie du Big Bang, c'est quoi ?

C'est la théorie scientifique selon laquelle notre univers aurait émergé d'un état extrêmement dense et chaud il y a de cela près de 14 milliards d'années.

Le Big Bang repose d'abord sur la fuite des galaxies découverte dans les années 1920 par l'américain Edwin Hubble. Cet avocat, devenu astronome, a considérablement élargi notre horizon. Il a démontré que certaines nébuleuses qui apparaissaient dans les télescopes de ses prédécesseurs étaient en fait des galaxies, des îlots d'étoiles analogues à notre Voie Lactée, mais situés bien au-delà. En étudiant le mouvement de ces galaxies, il découvrit ensuite qu'elles semblaient se fuir les unes les autres, comme si l'univers était en proie à une gigantesque mais silencieuse explosion.

« Je ne prétends pas comprendre l'Univers - Il est bien plus grand que moi. »

Albert Einstein

La cosmologie, c'est la science de

l'univers. En 1917, Albert Einstein envisageait un univers statique, éternel et immuable. Aujourd'hui au contraire, après de nombreuses découvertes, nous pensons que l'univers évolue, qu'il a une histoire et que cette histoire, qui commence par le Big Bang, peut être contée à l'aide des lois de la physique.

visible est défini par la plus grande distance que la lumière a pu parcourir depuis le Big Bang, soit près de 40 milliards d'années-lumière. Dans la comparaison ci-dessus, l'univers visible aurait la taille du système solaire.

Aujourd'hui, ce phénomène est interprété comme étant causé par l'expansion de l'univers. Dès lors, si l'on remonte dans le passé, on rencontre un moment où la matière est infiniment comprimée. Cette singularité initiale, c'est le Big Bang proprement dit mais nous ne pouvons pas en parler dans l'état actuel de nos connaissances : les conditions sont telles que la relativité générale n'est pas applicable. Trouver la théorie qui la remplacera est un des grands enjeux de la physique.

Expansion d'accord, mais dans quoi ?

Ou de quoi, devrait-on dire. D'après

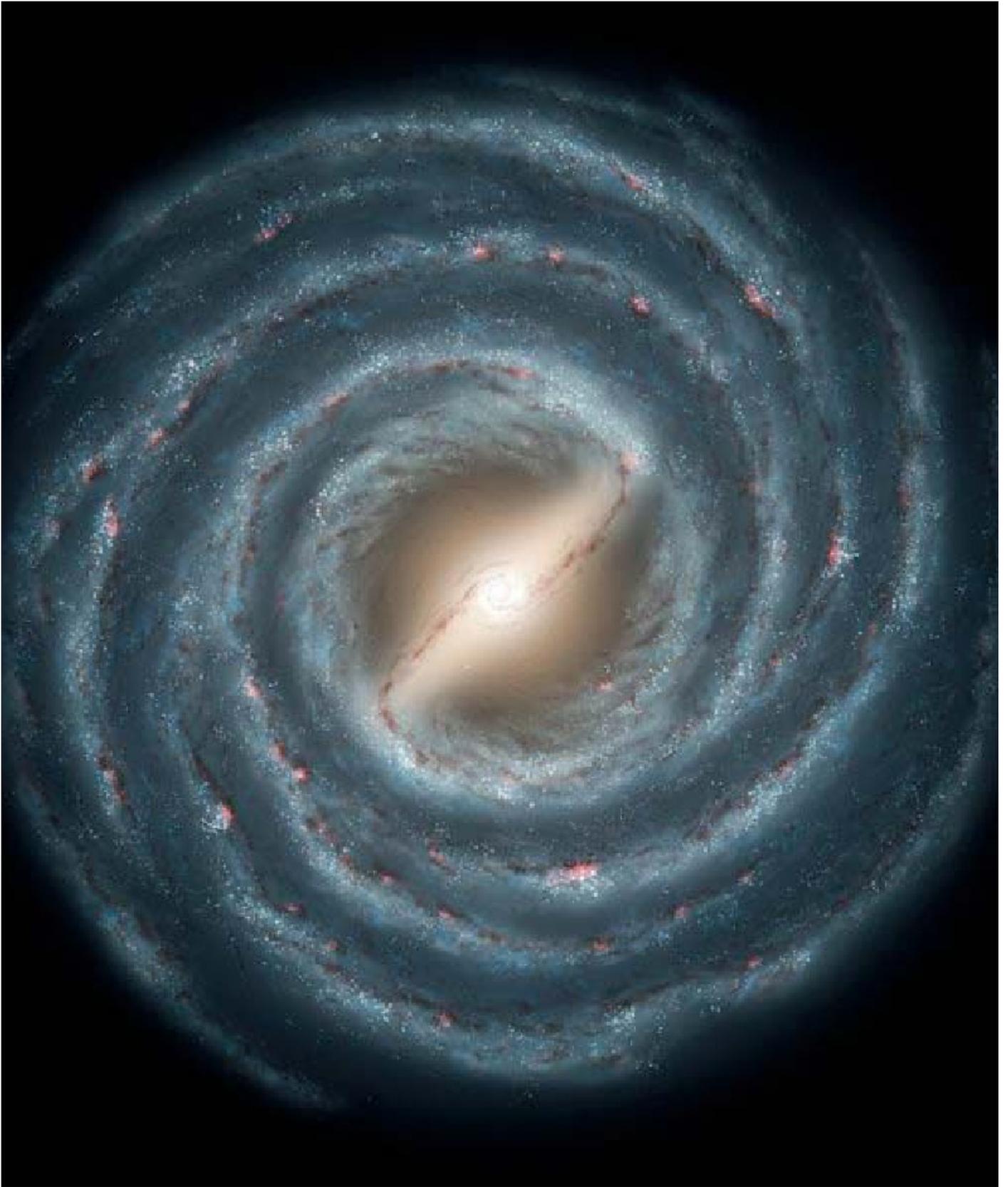
la théorie de la relativité générale, l'espace-temps est un milieu déformable, un peu à la manière d'un élastique. Aussi étrange que cela puisse paraître, l'expansion de l'univers est donc à prendre au sens littéral d'un objet en expansion. L'analogie souvent citée est celle d'un gâteau aux raisins. Durant la cuisson le gâteau gonfle et les raisins s'éloignent les uns des autres. L'espace c'est le gâteau, et les raisins, ce sont les galaxies.

Imaginez que le gâteau s'étende jusqu'à l'infini dans toutes les directions et vous aurez un modèle raisonnable de notre univers. Notez qu'aucun raisin n'occupe une position privilégiée dans ce gâteau hypothétique.

Quelle est la taille de l'univers ?

Notre galaxie, la Voie Lactée, contient environ 100 milliards d'étoiles et il faut près de 100.000 de nos années à la lumière pour la traverser de part en part. Notre plus proche voisine est la galaxie d'Andromède. Elle ressemble à la Voie Lactée et se trouve à environ 3 millions d'années-lumière. Si la taille de la Voie Lactée était ramenée à un disque de 15 kilomètres de diamètre, notre système solaire ferait à peine un peu plus d'une fraction de millimètre et la galaxie d'Andromède serait éloignée de quelques centaines de kilomètres.

Il y aurait environ 100 milliards de galaxies dans l'univers visible. Cela fait au total autant d'étoiles que de grains de sables sur l'ensemble des plages de la Terre. L'univers



Voici, d'après des travaux récents, à quoi pourrait ressembler notre propre galaxie, la Voie Lactée, si nous étions capable de la voir de l'extérieur. Le système solaire se situerait dans un des « bras » de cette galaxie spirale, à environ deux tiers du « coeur ».

Qui a inventé le Big Bang?

Toute observation doit être interprétée dans un cadre théorique. Ce sont

le russe Alexander Friedmann et le belge Georges Lemaitre qui, en empruntant la voie ouverte par Einstein, furent les premiers à proposer des modèles d'univers en expansion. Bien qu'édifiés dans les années 1920, leurs modèles restent très proches de celui auquel nous faisons appel aujourd'hui encore pour décrire notre univers. On peut donc dire qu'en partie au moins, le Big Bang c'est *du belge!*

Lumière fossile

Dans les années 1960, deux ingénieurs américains, Arno Penzias et Robert Wilson, s'affairent autour d'une nouvelle antenne radio destinée à l'observation astronomique. Leur appareil perçoit un étrange bruit de fond, une onde électromagnétique qui semble baigner tout l'univers. Ils viennent, sans le savoir, de découvrir un écho du lointain Big Bang.

Pour comprendre l'origine de ce rayonnement, il nous faut remonter au tout début de l'univers. Du fait de son énorme densité, la matière subit de multiples collisions et ne peut exister que sous forme d'un gaz incandescent de particules élémentaires. La lumière est piégée par ses

multiples interactions avec la matière (essentiellement des **protons** et des **électrons**); l'univers est opaque.

L'expansion de l'univers induit une diminution de la température. Vers

400.000 ans, lorsque la température n'est plus que de quelques milliers de degrés, les **protons** et **électrons** se combinent pour former de l'hydrogène. Rapidement l'univers devient transparent et, libérée de l'étreinte de la matière, la lumière commence son long voyage.

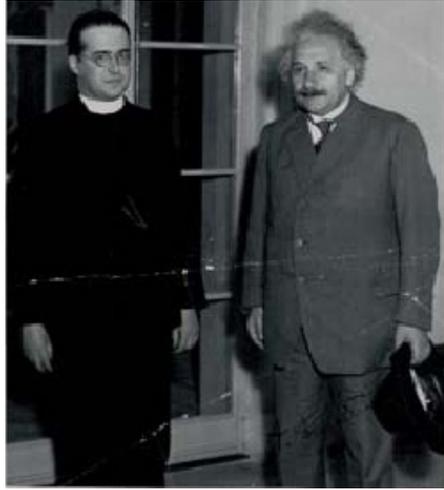
Initialement, ce rayonnement est très énergétique et porte la signature caractéristique du bain de particules

dont il est issu : son spectre est celui d'un **corps noir** à une température de quelques milliers de degrés. À cause de l'expansion de l'univers, la lumière perd de l'énergie mais sa signature ne change pas. Aujourd'hui, nous percevons cette lumière primordiale sous la forme d'un rayonnement électromagnétique millimétrique, dont le spectre est celui d'un **corps noir** à 3 K (Kelvin) ou moins 270 degrés C (Celsius). Cette lumière fossile, témoin du passé tumultueux de l'univers, est une des pierres angulaires de la théorie du Big Bang.

Des photons fossiles dans votre salon

La lumière du Big Bang que nous voyons aujourd'hui a voyagé durant près de 14 milliards d'années. Elle vient donc d'aussi loin que l'on peut voir. Cet horizon limite ce que l'on appelle l'univers visible. C'est comme pour les galaxies ou les étoiles: lorsque nous les observons, nous les voyons telles qu'elles étaient lorsque la lumière les a quittées.

Si vous voulez observer la première lueur de l'univers, rien de plus simple. Allumez votre téléviseur. Lorsqu'il est entre deux canaux, la neige que vous voyez sur l'écran est causée par des ondes électromagnétiques millimétriques, dont une partie au moins provient des confins du cosmos.



Einstein en compagnie du belge Georges Lemaître



Dernières nouvelles du cosmos

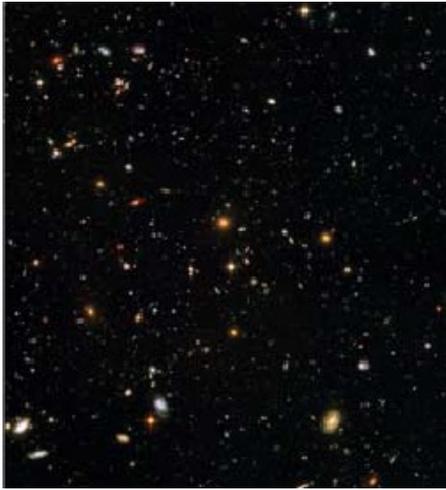
Lorsque Einstein se penche sur l'univers, les observations dont il dispose sont plutôt maigres; en 1917, les grands télescopes dont Edwin Hubble se servira quelques années plus tard n'existent pas encore. Mais Einstein a la tête bien faite. Il raisonne ainsi: pour qu'il n'y ait pas de centre, pas de lieu privilégié, que tous les points de vue soient équivalents, l'univers doit être le plus uniforme possible. Par extension, il doit aussi être statique, le même à tout instant, uniforme dans le temps comme dans l'espace.

Le problème est que la gravité est une force attractive: sous son action, toute distribution de matière doit donc obligatoirement finir par se concentrer. Pour compenser cet

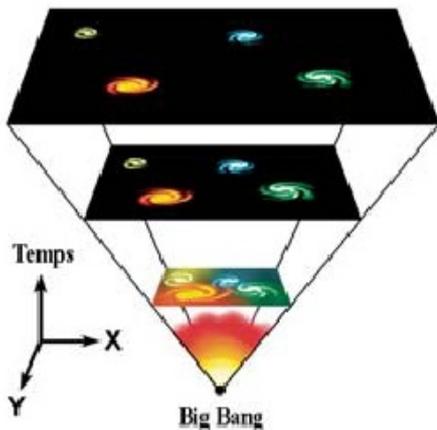
effet, Einstein introduit une force ré-

L'astronome américaine Henrietta Leavitt (en haut) a aussi contribué à élargir notre horizon. Elle a découvert une catégorie particulière d'étoiles variables qu'Edwin Hubble (en bas) a utilisé pour déterminer la distance des galaxies et les situer au dehors de notre Voie Lactée.

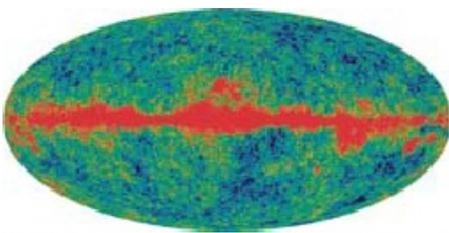




Photographie du ciel profond par le télescope Hubble. Le champ couvert correspond à la taille d'une tête d'épingle tenue à bout de bras. Chaque objet sur cette image est une galaxie ...



Modèle à deux dimensions de l'expansion de l'univers. Observez que la distance entre les galaxies augmente, mais pas leur taille.



L'univers n'a pas la forme d'un œuf : cette image est simplement une projection dans le plan de la sphère céleste (la grande bande horizontale correspond à notre galaxie). Les taches représentent des variations infimes de la température ou de l'énergie des photons primordiaux. Leur étude nous révèle la composition de l'univers lorsqu'il était âgé d'environ 400.000 ans.

pulsive, une sorte « d'anti-gravité ». Il lui donne le nom de **constante cosmologique**... et manque la découverte de l'expansion de l'univers ! Sa plus grande erreur, dira-t-il un jour.

Au cours du xx^e siècle, tel un phœnix renaissant de ses cendres, la constante cosmologique est régulièrement venue hanter les nuits des cosmologistes. Aujourd'hui nous sommes à nouveau confrontés à cette mystérieuse notion. L'expansion de l'univers devrait se ralentir si l'univers ne contenait que de la matière, or cette expansion est apparemment en train de s'accélérer. Une explication possible serait à trouver dans l'existence d'une constante cosmologique. On l'appelle aujourd'hui *énergie noire*, mais c'est la même chose (les impératifs du marketing n'épargnent pas la physique) : elle reste une énigme.

Comme si cela ne suffisait pas, les dernières observations ont révélé une chose déprimante, tout au moins pour certains d'entre nous : non seulement nous ne sommes pas au centre de l'univers, mais en plus nous ne sommes pas constitués de la forme de matière la plus abondante dans l'univers. En effet, la **matière noire**, ainsi nommée parce que nous ignorons tout d'elle, hormis le fait qu'elle est massive et qu'elle est invisible à nos instruments, est cinq fois plus abondante dans l'univers que la matière qui constitue les étoiles, les planètes et toutes les choses avec lesquelles nous sommes familiers.

En guise de conclusion

Un physicien célèbre avait l'habitude de dire que « les cosmologistes sont souvent dans l'erreur, jamais dans le doute ». C'est en explorant notre environnement immédiat et en l'analysant que nous découvrons les lois de la physique. Les extrapoler à l'ensemble de l'univers est une démarche osée mais raisonnable, tant que nous n'avons pas de raison d'en douter. Ainsi que l'évoque Einstein avec humour, tout au plus le sujet invite-t-il à une certaine modestie.

Grâce à l'avènement de grands instruments, télescopes ou satellites, la cosmologie observationnelle a fait d'énormes progrès ces dernières années. La cosmologie théorique n'est pas en reste : songez que notre compréhension des lois de la physique (en particulier des lois de l'infiniment petit) nous permet d'envisager ce qui a pu se produire durant les premières fractions de seconde de l'histoire de l'univers. Certains spéculent même sur ce qui a pu se produire au moment du Big Bang. Certes les mystères de l'univers restent entiers mais nous ne pouvons nous empêcher de penser que, un siècle après les premiers travaux d'Einstein, des coins de voile ont été soulevés par et grâce à la théorie du Big Bang.

Regard sur un autre Einstein

Jean Wallenborn

Professeur Honoraire – Université Libre de Bruxelles



Né dans une famille où le père essaye de commercialiser les inventions de l'oncle, Albert Einstein, dès les années d'école, fabrique des objets mécaniques. Plus tard, pendant ses études à Zürich, il projette, à l'aide du matériel de laboratoire de l'ETH (École Polytechnique), de mettre en évidence l'**éther**, ce curieux support des ondes électromagnétiques qu'il mettra bientôt au rebut. Mais son projet est contrarié par ses professeurs qui le mettent à la porte du laboratoire.

La communauté scientifique sait à quel point Einstein a modifié notre vision du monde ; les historiens et les sociologues ont reconnu à quel point il s'est engagé socialement et politiquement ; son effigie est populaire et

son nom est maintenant synonyme de génie. Mais sait-on qu'Einstein fut un expérimentateur et un inventeur et qu'il s'est intéressé à des sujets qui pourraient paraître futiles à côté de ceux qui ont fait son renom ?

Alors qu'il travaille au Bureau des Brevets, il s'intéresse à la possibilité d'amplifier des petites différences de potentiel à l'aide de condensateurs placés en série. Cette « Maschinchen » (petite machine), qu'il a essayé de construire lui-même, sera finalement réalisée et améliorée par ses amis, Conrad et Paul Habicht, et présentée avec succès à Berlin en 1912.

D'autre part, il fait dans le Gymnasium de Berne des expériences sur l'hypothèse d'Ampère selon laquelle des courants moléculaires seraient à l'origine du magnétisme. Il reprendra

plus sérieusement ce problème dans le cadre d'une véritable recherche expérimentale avec son assistant W.J. de Haas en 1914-1915.

L'effet Einstein - de Haas

Ampère avait émis l'hypothèse selon laquelle le magnétisme était engendré par des charges électriques microscopiques en mouvement. De la masse est donc mise en mouvement lors de la magnétisation d'un barreau de fer et ce mouvement doit provoquer un léger recul du barreau. Pour détecter ce recul, Einstein et de Haas suspendent un cylindre de fer à un fil souple et détectent sa rotation lorsqu'il est soudainement magnétisé : le cylindre doit tourner en

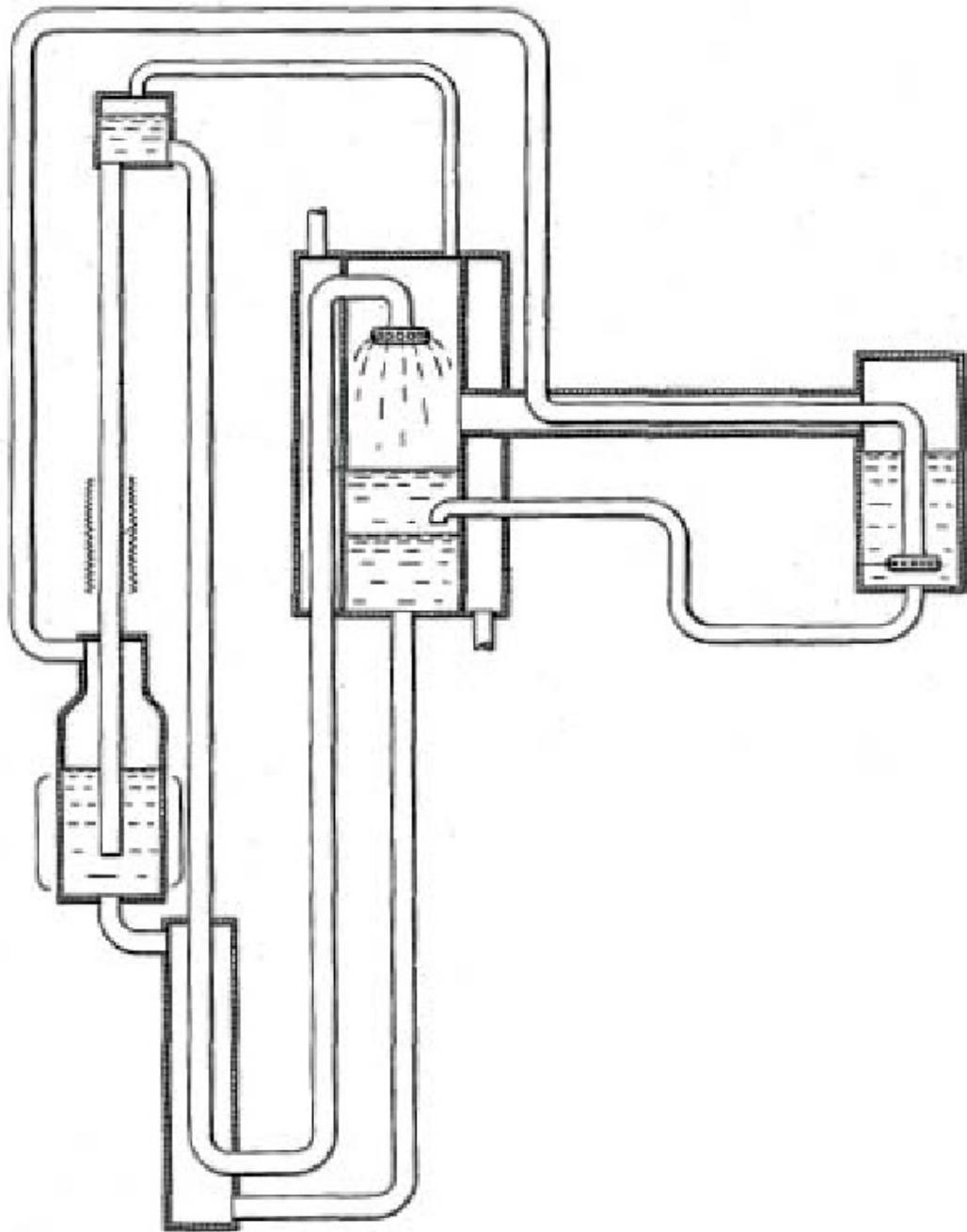
sens inverse du courant créé. Einstein et de Haas ont montré qualitativement l'existence de l'effet, mais ils ont fait ce que jamais un expérimentateur ne doit faire : ils ont écarté une série de résultats qui ne concordaient pas quantitativement avec leur théorie. Ils ignoraient à cette époque l'existence du **spin** qui joue un rôle très important dans les phénomènes magnétiques.

En 1915 également, Einstein est expert dans un procès de validité de brevet concernant les gyrocompas qui sont des boussoles non magnétiques, dont le fonctionnement repose sur les propriétés du gyroscope. Sa compétence acquise dans le domaine lui permettra de toucher de 1926 à 1938 des redevances de la firme hollandaise Giro pour des améliorations qu'il a suggérées. Remarquons que c'est en 1915, qu'Einstein met la dernière main à sa théorie de la relativité générale.

Einstein continuera encore longtemps

à s'intéresser à des problèmes de physique pure et de problèmes de lui connaît habituellement. Par exemple, à Berlin, Einstein a un ami médecin, le Dr. Mühsam, avec lequel il écrit en 1923 un article sur la détermination expérimentale de la perméabilité des filtres ; mais il s'intéressera aussi à des problèmes théoriques comme l'origine des méandres des rivières et l'émission de lumière par les rayons canaux (des ions positifs produits dans certaines circonstances dans les **tubes de Crookes**).

De manière assez étonnante, Einstein s'est montré un inventeur fécond qui a pris de nombreux brevets. Au début des années 1920, Einstein apprend que toute une famille a été tuée par le gaz échappé de son réfrigérateur. Constatant que c'étaient les pièces mobiles du compresseur qui rendaient les frigos fragiles, avec



Einstein Refrigerator

Patent number U.S. 1781541 -- November 11, 1930

*Albert Einstein
Leo Szilard*

Leo Szilard¹, un jeune et brillant physicien au début de sa carrière, il va développer trois technologies de réfrigération sans pièce mobile. L'une de ces technologies utilise l'eau du robinet, mais comme la pression de l'eau est trop variable, le projet est vite abandonné. D'autre part, une pompe électromagnétique est construite par la firme AEG, mais également abandonnée suite à la découverte du fréon qui, à l'époque, ne semble pas nuisible; cependant, elle est actuellement utilisée dans des réacteurs nucléaires. Enfin, un brevet de frigo à gaz est acheté mais jamais exploité par Electrolux. Récemment, dans le cadre de sa thèse de doctorat à l'Institut Technologique de Géorgie (USA), Andrew Delano a montré que ce frigo était tout à fait fonctionnel et il en a réalisé un prototype.



La réalisation du frigo par A. Delano

C'est encore la sensibilité d'Einstein qui est à l'origine du brevet déposé en 1934 avec l'ingénieur Goldschmidt. En effet, c'est pour venir en aide à une cantatrice un peu dure d'oreille qu'ils mettent au point un nouveau type d'appareil auditif.

À l'occasion de sa collaboration avec Goldschmidt, Einstein écrit un petit poème qui montre quel était son état d'esprit devant les problèmes pratiques :

*Ein bisschen Technik dann und wann
Auch Grübler amüsieren kann.
Drum kühnlich denk ich schon so
weit!
Wir legen noch ein Ei zu zweit.*²

On ne peut mieux le dire: pour Einstein, il n'y a ni grande ni petite physique. Tous les problèmes sont passionnants à résoudre.

¹ C'est Leo Szilard qui, en 1939, pressera Einstein d'écrire au Président Roosevelt pour le persuader de la nécessité de développer l'armement nucléaire.

² *Un peu de technique de temps en temps*

Peut aussi amuser le penseur.

Voilà pourquoi je songe déjà audacieusement qu'un jour lointain

Nous referons ensemble quelque chose de bien.

L'homme Einstein

Elie Bamavi

Professeur d'Histoire – Université de Tel-Aviv

Conseiller scientifique de Tempora s.a.



Le franc-tireur

L'enfant pensif et timide, à l'élocution difficile et aux réflexes lents, se montre d'emblée rétif à l'autorité. Ses parents sont des juifs allemands typiques, assimilés et agnostiques ; lui passe par une phase de religiosité intense, avant de se convertir à 12 ans à la science, dont il se fera une nouvelle religion. Au lycée de Munich, il est bon élève, sans plus ; c'est qu'il déteste la discipline de caserne qui y règne, au point qu'un de ses professeurs l'invite à quitter l'école, qu'il asubvertit par sa seule présence. Élève de l'Institut technologique de Zurich, dont il sort sans distinction particulière, il est rejeté par l'establis-

fi
ment universitaire et débouche sur un bureau des brevets de Berne. Ses travaux, il les élabore en marge de l'Université, dans des débats avec des amis aussi obscurs que lui et le silence des bibliothèques. Il finira par s'imposer, et des postes universitaires prestigieux lui seront offerts, y compris dans cette Allemagne dont, jeune homme en rupture de ban, il a abandonné la citoyenneté. Mais ce sera par des chemins de traverse.

Ainsi, le génie particulier d'un homme s'inscrit dans une sociologie particulière : celle d'un judaïsme de langue allemande, culturellement intégré mais sociologiquement marginal, dont la position inconfortable a été propice à l'éclosion de grands esprits révolutionnaires. Marx, Freud, Einstein : c'est bien de ce milieu qu'est issue la triade de notre modernité.

Le chercheur

En 1905, lorsqu'il envoie coup sur coup aux *Annalen der Physik* ses quatre articles fondateurs, Einstein est encore un obscur fonctionnaire du Bureau des brevets à Berne. Moins d'une décennie plus tard, il est invité par le gouvernement allemand à rejoindre la prestigieuse Académie

prussienne des sciences. Dans l'intervalle, il est devenu un savant universellement reconnu et respecté. Une telle carrière scientifique serait-elle possible aujourd'hui ? C'est peu probable. Le chercheur isolé qui peaufine ses découvertes dans le secret de son laboratoire serait une incongruité dans le monde scientifique contemporain, tributaire d'énormes crédits de recherche et de réseaux mondialisés.

Einstein héros solitaire, Einstein génie qui ignore les limites humaines, Einstein pur théoricien de l'univers – autant de mythes de notre imaginaire. D'abord, son isolement a été relatif. Toute sa vie, il a bénéficié non seulement de solides amitiés, mais aussi d'appuis puissants, au premier chef de celui de Max Planck, le plus grand nom de la physique de son temps et son premier défenseur. Ensuite, il a refusé, avec une fougue qui ne laisse pas d'étonner aujourd'hui, les implications de sa propre théorie des quanta. Esprit assoiffé d'absolu et prisonnier d'un déterminisme scientifique qu'il a été le premier à mettre à mal, il a refusé toute sa vie que Dieu

fi
puisse jouer aux dés. En nos jours de science, l'homme sait faire preuve d'esprit pratique et se montre féru de science appliquée. Après tout, à Berne son travail consistait à juger d'inventions bien concrètes. Mieux, lui-même s'est attaché à inventer ... le réfrigérateur, objet usuel s'il en est.

Un savant dans le siècle

De même qu'une aventure scientifique comme celle d'Einstein serait impossible de nos jours, aucun savant n'a pu prétendre depuis au statut intellectuel et moral qui fut le sien. Ce statut d'exception, il le mit au service de ses idées, il en fit un outil de combat. Car Einstein fut toute sa vie un

savant engagé, dont l'œuvre scientifique et l'action politique constituaient les deux faces d'un même et profond humanisme.

Aussi bien, ses engagements ne sont paradoxaux qu'en apparence. Cosmopolite, méprisant de toutes

ses forces le nationalisme, il s'est fait sioniste. Mais son sionisme resta d'essence culturelle: il s'agissait pour lui d'assurer aux Juifs un lieu où ils puissent développer leur génie, à l'abri de la haine et des préjugés antisémites. Pacifiste de la première heure, Européen ardent qui appelle de ses vœux « une organisation étatique » supranationale qui bannisse les guerres entre nations européennes « comme le Reich allemand les bannit entre la Bavière et le Wurtemberg », il fut aussi l'homme de la lettre fameuse à Roosevelt. Mais le danger prenait alors le visage hideux de l'hitlérisme. En fait, un engagement sous-tend tous les autres : les droits de l'homme et la démocratie. Citoyen américain choyé, se sentant chez lui à Princeton comme jamais et nulle part auparavant, il s'est opposé au maccarthysme et a milité pour l'éga-

lité civique des Noirs.

Il était sans doute logique que Ben Gourion offrît au plus grand Juif vivant l'honneur de devenir le deuxième président de l'État d'Israël. Mais il était tout aussi logique que celui-ci, soucieux de préserver sa liberté, le refuse poliment. Au grand soulagement des dirigeants de l'État juif (« Que faisons-nous s'il accepte? »), conscients qu'un tel homme, parfait-

tement incontrôlable, ne pouvait être qu'une source d'infinis ennuis politiques.

Einstein et nous

Après sa mort, un pathologiste s'est empressé d'ouvrir son crâne pour tenter de lire le secret de son génie dans les circonvolutions de son cer-

veau. *Paris Match* évoquait en cou-

verture « le plus puissant cerveau du siècle ». Au tournant du millénaire, l'hebdomadaire américain *Time* le couronnait « *person of the century* ». Einstein fut bien le héros intellectuel de son époque, le modèle indépassable du génie absolu.

Pourquoi? Parce qu'il a fait reculer les limites du savoir humain et changer notre perception de l'univers? Sans doute. Mais, pour exceptionnelle qu'elle ait été, son aventure scientifique n'explique pas à elle seule qu'il soit devenu un héros de la culture populaire contemporaine. Crayonné à l'infini, portraituré par Warhol, figuré dans d'innombrables films, utilisé *ad nauseam* dans l'industrie du souvenir et la publicité, il est l'aune à laquelle on mesure l'intelligence humaine en même temps que le rêve secret des papas et des mamans du monde entier. Son allure de professeur Nimbus y est pour quelque chose, lui qui a incarné jusqu'à la caricature le pur esprit de notre imaginaire. Il faut y ajouter la simplicité de ses manières, sa disponibilité et son affabilité légendaires, son violon, et aussi, bien sûr, ses prises de position politiques.

Mais il y a plus et plus profond, et ses ennemis idéologiques ne s'y sont pas trompés: sa physique n'était-elle pas juive pour les nazis, décadente et bourgeoise pour les staliniens, athée pour les bigots? C'est qu'Einstein a offert une justification rationnelle aux incertitudes d'un ^{xx}e siècle déboussolé, il a été le pendant scientifique de l'avant-garde artistique de notre modernité. Peu de gens com-

prennent vraiment pourquoi et comment il aura bouleversé notre vision du monde; mais beaucoup sentent confusément qu'il l'a fait. Et que, ce faisant, il a été non seulement le fossoyeur de nos certitudes, mais aussi le grand explorateur des chemins de notre liberté.

Glossaire

Absorption : en mécanique ondulatoire, transfert d'énergie de l'onde à la matière. S'applique aussi bien à une onde acoustique, mécanique ou

électromagnétique.

Amas : groupe de quelques dizaines à plusieurs milliers de galaxies. Le plus connue est l'*amas de la Vierge*. Notre galaxie, la Voie Lactée, appartient au Groupe Local, un amas de quelques galaxies auquel appartient également la galaxie d'Andromède, notre plus proche voisine.

Année-lumière : En astronomie, unité correspondant à la distance que parcourrait la lumière en une année (dans le vide). Une année-lumière équivaut à environ 10^{16} mètres.

Bohr, Niels (1885 - 1962) : un des plus grands scientifiques du xx^e siècle. Prix Nobel de physique en 1922. Il fut le premier à appliquer la théorie des quanta aux atomes. Son interprétation de la mécanique quantique et de son caractère probabiliste, appelée « interprétation de Copenhague », est la pierre angulaire de cette théorie.

Boyle, Robert (1746 - 1823) : théologien et philosophe naturel britannique. Son œuvre scientifique concerne la chimie, l'hydrostatique, la médecine, la géologie, la biologie et l'alchimie. Sa découverte la plus célèbre est la « Loi de Boyle »

(1662) qui établit qu'à température

constante, la pression (p) et le volume (V) d'un gaz sont reliés : $p \cdot V = \text{constante}$.

Catastrophe ultraviolette : prédiction erronée de la théorie du rayonnement qui prévaut au xix^e siècle, suivant laquelle tout corps devrait rayonner une énergie infinie. C'est pour résoudre ce problème que Planck propose en 1900 la quantification de l'énergie rayonnée.

Champ électrique : concept inventé par Michael Faraday. C'est le champ de force qui emplit l'espace autour de toute charge électrique. Une charge électrique exerce une force sur une autre charge électrique par l'intermédiaire de son champ électrique.

Champ magnétique : concept inventé par le physicien Michael Faraday. Entité qui, d'une part, est produite par des charges électriques en mouvement et qui, d'autre part, exerce une force sur des charges électriques en mouvement. Le champ magnétique d'un aimant permanent est interprété comme étant dû au mouvement des particules chargées au niveau microscopique.

Charles, Jacques (1746 - 1823) : savant français, physicien et inventeur, avec Nicolas Robert (1783), du premier ballon à hydrogène. Vers 1787, il formula la « Loi de Charles »

(plus tard renommée « Loi de Gay-

Lussac ») qui établit qu'à pression constante, le volume (V) d'un gaz et sa température (T) sont directement proportionnels, $V/T = \text{constante}$.

Constante cosmologique : historiquement, paramètre cosmologique introduit par Einstein pour contrebalancer l'effet attracteur de la gravité et obtenir un univers statique. Fut pratiquement abandonnée après la découverte de l'expansion de l'univers. Les données cosmologiques récentes suggèrent cependant que l'expansion de l'univers est dominée par une constante cosmologique.

C'est un des grands mystères de la physique.

Contraction des longueurs : effet relativiste pour la première fois envisagé par Lorentz et Fitzgerald par lequel la dimension longitudinale d'objets en mouvement relativiste (vitesse proche de la vitesse de la lumière) apparaît raccourcie par rapport à sa longueur mesurée au repos.

Corps noir : le corps noir est un modèle utilisé pour étudier le rayonnement électromagnétique (infrarouge, lumière) d'un objet en fonction de sa température. Il est défini comme étant un objet absorbant totalement la lumière à toutes les longueurs d'ondes. Contrairement à ce que son nom suggère, un corps noir n'est pas nécessairement noir

mais émet de la lumière dont le

spectre dépend uniquement de la température. Le nom corps noir a été introduit par Gustav Kirchhoff en 1862. Le modèle du corps noir permit à Max Planck de découvrir un des fondements de la physique quantique : la quantification de l'émission du rayonnement électromagnétique.

De Broglie, Louis-Victor

(1892 - 1987) : Louis Victor de Broglie est né à Dieppe, en Normandie. Il a reçu le prix Nobel en 1929 pour sa découverte de la nature ondulatoire de l'électron (dualité onde-corpuscule).

Déterminisme : Ordre des faits suivant lequel les conditions d'existence d'un phénomène sont déterminées, fixées absolument de telle façon que, ces conditions étant posées, le phénomène ne peut pas ne pas se produire (petit Robert). En physique, signifie que la connaissance des conditions initiales d'un phénomène permet d'en déterminer tout le passé et tout l'avenir.

Dilatation du temps : phénomène

relativiste par lequel le temps d'un système en mouvement apparaît comme étant ralenti par rapport à celui du système de référence au repos.

Éclipse : Une éclipse correspond à l'occultation d'une source de lumière par un objet physique. En astronomie, une éclipse se produit lorsqu'un objet tel qu'une planète ou un satellite naturel s'intercale entre une source de lumière, comme une étoile, et un autre objet, masquant du point de vue de l'observateur soit la source de lumière, soit l'objet éclairé. Lorsque l'objet s'intercalant a un diamètre apparent nettement plus petit que celui de l'autre objet, on parle plutôt de transit.

Eddington, Sir Stanley

(1882 - 1944) : un des plus importants astrophysiciens du début du

xx^e siècle. Il est surtout connu pour ses travaux concernant la théorie de la relativité. Il organise en 1919 une expédition pour vérifier au cours d'une éclipse de Soleil la déviation des rayons lumineux par la matière prédite par Einstein.

Effet photoélectrique : effet par lequel des électrons sont libérés par le bombardement d'un métal par de la lumière. L'explication de ce phénomène, par Einstein, a été un des premiers succès de la théorie des quanta.

Électron : particule élémentaire, porteuse d'une charge électrique négative, et un des constituants fondamentaux de l'atome. L'antiparticule de l'électron est le positron.

Émission stimulée : processus dans lequel un photon incident provoque l'émission par un atome, préalablement préparé dans un état excité, d'un second photon ayant exactement les mêmes propriétés que le photon incident.

Espace-temps : ce concept mathématique fut introduit par P. Minkowski en 1908 et sous-jacent à la théorie de la relativité restreinte d'Einstein, lie l'espace et le temps par l'intermédiaire de la vitesse de la lumière. Pour des observateurs en mouvement relatifs, l'espace et le temps sont différents. Seul l'espace-temps est identique pour eux.

Éther : fluide hypothétique, envisagé à la fin du ^e XIX^e siècle comme milieu matériel porteur des ondes électromagnétiques. La découverte de l'invariance de la vitesse de la lumière pour tous les observateurs sonnera son glas.

Exo-planète : planète en orbite autour d'une étoile autre que le Soleil.

Fréquence (et couleur) : le nombre de fois par unité de temps

qu'un phénomène périodique se reproduit. On parle de la fréquence d'une onde, l'unité étant le hertz (1 Hz = 1/s). La lumière visible a une fréquence comprise entre 4.10^{14} Hz (lumière rouge) et $7,5.10^{14}$ Hz (lumière bleue).

Gay-Lussac, Louis (1778 - 1850) : savant français et physicien, connu pour ses études des propriétés des gaz. Il découvre au début du XIX^e siècle la « Loi de Gay-Lussac », qui établit qu'à la même température, les gaz suivent des lois volumétriques simples en fonction de la température.

Heisenberg, Werner

(1901 - 1976) : Physicien allemand, prix Nobel de physique 1932 pour son travail sur la mécanique quantique. Découvre le « principe d'incertitude » qui porte son nom.

Hyades : amas ouvert (groupe de quelques dizaines d'étoiles appartenant à un même nuage gazeux) situé dans la constellation du Taureau.

Induction : naissance d'un courant électrique dans un conducteur en présence d'un champ magnétique variable.

Interférence : lorsque des ondes (lumineuses, acoustiques, etc.) se superposent on dit qu'elles interfèrent, c'est-à-dire que leurs amplitudes s'additionnent algébriquement : deux creux forment un creux plus profond, deux crêtes forment une crête plus élevée, une crête et un creux s'annulent mutuellement. Ce phénomène est visualisé par des figures, dites figures d'interférence.

Leavitt, Henrietta Swan

(1868 - 1921) : astronome américaine renommée pour son travail concernant les étoiles variables à la base d'une méthode d'évaluation des distances des galaxies dans l'Univers.

Lemaître, Georges Henri

(1894 - 1966) : prêtre catholique belge et astronome. À proposé la théorie du Big Bang de l'origine de l'univers, appelée initialement « hypothèse de l'atome primitif ». Il a basé sa théorie d'un univers en expansion, publiée en 1927 et 1933,

sur la relativité générale d'Einstein (ce dernier pensait que l'univers devait être au contraire statique et immuable). Il a estimé l'âge de l'univers entre 10 et 20 milliards d'années, une fourchette qui est en accord avec les estimations les plus récentes.

Loi de Hubble : loi qui énonce que les galaxies s'éloignent les unes des autres et que leur vitesse d'éloignement (v) est proportionnelle à leur distance (d), $v = H d$. H est la constante de Hubble. Sa valeur actuelle est de l'ordre de 70 km/s/Mpc (1 Mpc = 1.000.000 parsec soit environ 3 millions d'années-lumière). Découverte par Edwin Hubble dans les années 1920.

Longueur d'onde : la distance entre deux maxima (crêtes) d'une onde.

Maric, Mileva (1875 - 1948) : mathématicienne d'origine serbe-orthodoxe et première épouse d'Albert Einstein, mais également sa collègue et confidente. Sa participation aux travaux d'Einstein de l'année 1905 n'est pas connue et reste un sujet de polémique.

Mariotte, Edmé (1620 - 1684) : physicien et botaniste français. En

1676, il découvre, indépendamment de Boyle, que la pression (p) et le volume d'un gaz (V) à température constante sont reliés : $p \cdot V = \text{constante}$ (Loi de Boyle-Mariotte).

Matière noire : matière qui, dans l'univers n'émet ni n'absorbe de lumière et de manière plus générale est indétectable. Sa présence est invoquée pour expliquer la structure des galaxies, et des amas de

galaxies. Apparemment, il y aurait dans l'univers en moyenne cinq fois plus de matière noire que de matière « ordinaire » (celle qui entre dans la composition des étoiles, planètes et de toutes les choses avec lesquelles nous sommes familiers).

Maxwell, James Clerk

(1831 - 1879) : physicien et mathématicien écossais surtout connu pour ses lois de l'électromagnétisme, théorie unifiant l'ensemble des phénomènes électriques et magnétiques et prédisant l'existence d'onde électromagnétiques, dont la lumière visible est une manifestation. À également contribué au développement de la théorie cinétique des gaz.

Mécanique quantique : théorie fondamentale qui remplace les lois classiques (mécanique de Newton, électromagnétisme de Maxwell) aux niveaux atomique et subatomique. Développée entre 1900, date de l'invention des quanta par Planck, et les années 1930. Sa caractéristique principale est l'abandon de la description déterministe propre à la mécanique classique pour une des-

cription probabiliste de l'issue des expériences.

Mouvement rectiligne uniforme :

il s'agit d'un mouvement dans lequel la vitesse ne change ni en direction ni en grandeur. Un tel mouvement est toujours relatif : il est nécessaire de dire par rapport à quoi la vitesse est mesurée. Le wagon se meut par rapport à la gare. Mais on peut tout aussi bien dire que la gare se meut

par rapport au wagon. Abréviations : MRU.

Newton, Isaac (1642 - 1727) :

mathématicien, philosophe, alchimiste et physicien anglais. A établi les lois de la mécanique qui portent son nom ainsi que les lois de la gravitation universelle. A également développé une théorie corpusculaire de la lumière.

Onde électromagnétique : un champ électrique ou un champ magnétique variable se comporte comme une onde. Les deux phénomènes sont indissociables, de sorte que l'on parle d'onde électromagnétique. La lumière est la forme la plus familière d'onde électromagnétique mais ce qu'on appelle le « spectre électromagnétique » est bien plus étendu. Mentionnons les micro-ondes, les ondes radios vers les grandes longueurs d'onde et les rayons X et gamma vers les petites longueurs d'onde.

Onde de matière : concept introduit par de Broglie qui associe une nature ondulatoire à toute particule de matière. Remplacé par le concept d'onde de probabilité.

Orbitale atomique : indique la probabilité de présence d'un électron autour d'un noyau. Liée à la fonction d'onde de l'électron.

Photon : quantum ou particule de lumière dont l'énergie est reliée à sa fréquence par la formule de Planck : $E = h\nu$.

Physique statistique : domaine de la physique théorique qui utilise des méthodes statistiques pour décrire le comportement de systèmes ayant un grand nombre de degrés de liberté (gaz, liquides, solides, ...).

Planck, Max (1858 - 1947) : physicien allemand, prix Nobel de physique en 1918. Est surtout connu pour avoir posé la première pierre de

la mécanique quantique, par la résolution du problème du corps noir. Constante de Planck (h).

Preuve de Young : expérience révolutionnaire nommée d'après Thomas Young (1773 - 1829). Lorsque de la lumière émanant d'une source est envoyée sur un écran au travers de deux fentes parallèles, séparées d'une distance appropriée, une figure d'interférence se forme sur

l'écran. Cette figure est la caractéristique d'une onde, pas de particule.

Principe de relativité (restreinte) :

Principe remontant à Galilée et Newton suivant lequel les lois de la physique (y compris les lois de l'électromagnétisme après Einstein)

sont identiques dans tous les repères inertiels (systèmes de référence en MRU).

Processus stochastique : phénomène dont le déterminisme n'est pas absolu et pouvant être étudié par la statistique. Un exemple important est le phénomène de diffusion, caractéristique du mouvement brownien.

Proton : particule élémentaire ayant une charge positive et environ 2000 fois plus lourde qu'un électron. Les protons forment, ensemble avec les neutrons, les noyaux des atomes.

Radiogalaxie : galaxie qui émet essentiellement des ondes radios.

Relativité générale : théorie de la gravitation, publiée par Einstein en

1916, qui établit en outre l'équivalence des lois de la physique pour tous les observateurs, y compris ceux en accélération.

Rutherford, Ernest (1871 - 1937) : physicien néo-zélandais. Grand expérimentateur, il est le père de la physique nucléaire. Il a découvert l'existence du noyau de l'atome ainsi que les rayons alpha et bêta.

Schrödinger, Erwin (1887 - 1961) : physicien autrichien. Prix Nobel

1933, pour la découverte de l'équation qui porte son nom. Également connu pour son « paradoxe du chat », qui mit en évidence une propriété fondamentale de la mécanique quantique.

Spectre électromagnétique : est la décomposition du rayonnement électromagnétique selon ses dif-

férentes composantes en terme de fréquences ou d'énergie des photons, les deux grandeurs étant liées par la constante de Planck h : $E = h \cdot \nu$.

Spectre radio : partie du spectre électromagnétique pour laquelle les longueurs d'onde sont plus grandes que celles de la lumière visible et de l'infrarouge et les fréquences plus basses.

Spectroscope : instrument permettant d'analyser le spectre électromagnétique. Le prototype le plus simple est le prisme qui décompose la lumière blanche en ses différentes composantes ou couleurs, comme dans l'arc-en-ciel.

Spin : de l'anglais *to spin* (tourner). Moment angulaire associé aux particules élémentaires et aux atomes. Le spin est une quantité quantifiée : il est toujours le multiple entier de la constante de Planck h divisée par 4π .

Télégraphie sans fil : la télégraphie sans fil ou TSF se développe à partir de 1890, date à laquelle Edouard

Breth (1844 - 1940) réussit à émettre et à recevoir une onde sur une distance de 25 mètres. En 1894, le Britannique Sir Oliver Lodge en fait de même, mais sur 100 mètres, puis 800 mètres. L'année suivante, l'Italien Guglielmo Marconi (1874 - 1937) établit un nouveau record : 2,4 km ! En 1896 on atteint les 12 km, puis 15 km en 1897. En 1899, la Manche est franchie sur 46 km, puis l'Atlantique en 1901 sur 3 400 km.

Théorie cinétique : théorie visant à décrire les propriétés macroscopiques des gaz (température, pression, etc) à partir des mouvements au niveau moléculaire.

Théorie ondulatoire et théorie corpusculaire : dans le débat relatif à la nature de la lumière, les physiciens se rangeaient en deux camps.

Ceux qui pensaient qu'elle est formée de petits grains, de corpuscules, et ceux pour qui la lumière est un phénomène vibratoire, c'est à dire une onde. Ce débat prend fin, du moins pour une cinquantaine d'années, vers 1850 lorsqu'on montre que la lumière va moins vite dans l'eau que dans l'air.

Thomson, Joseph John

(1856 - 1940) : physicien anglais qui a découvert l'électron. Prix Nobel en 1906.

Bibliographie

Ouvrages généraux sur Einstein :

FRANÇOISE BALIBAR, *Albert Einstein, la joie de la pensée*, Découvertes Gallimard.

PIERRE MARAGE, *Albert Einstein dixit*, Éditions E=mc².

BANESH HOFFMANN, *Albert Einstein, créateur et rebelle*, Seuil, Points Sciences.

FRANÇOIS DE CLOSETS, *Ne dites pas à Dieu ce qu'il doit faire*, Seuil, Points Sciences.

ALBERT EINSTEIN, *Comment je vois le monde*, Champs Flammarion.

Ouvrages plus pointus sur son œuvre scientifique et sa correspondance :

ALBERT EINSTEIN ET FRANÇOISE BALIBAR, *Physique, philosophie, politique*, Seuil,

Points Sciences

ABRAHAM PAIS, *Albert Einstein, la vie et l'œuvre*, Dunod.

Sur la physique, Einstein et les autres...

ALBERT EINSTEIN et LÉOPOLD INFELD, *L'évolution des idées en physique*, Champs Flammarion.

ALBERT EINSTEIN, *La relativité*, Petite bibliothèque Payot.

JEAN EISENSTAEDT, *Avant Einstein : relativité, lumière, gravitation*, Seuil, Science

Ouverte.

ÉTIENNE KLEIN, *Il était sept fois la révolution : Albert Einstein et les autres*, Flammarion.

THIBAUT DAMOUR, *Si Einstein m'était compté*, Le Cherche Midi.

KIP THORN, *Trous noirs et distorsions du temps*, Champs Flammarion.

S. WEINBERG, *Les trois premières minutes de l'univers*, Seuil, Points Sciences.

SIMON SINGH, *Le roman du Big Bang*, J.C. Lattès.

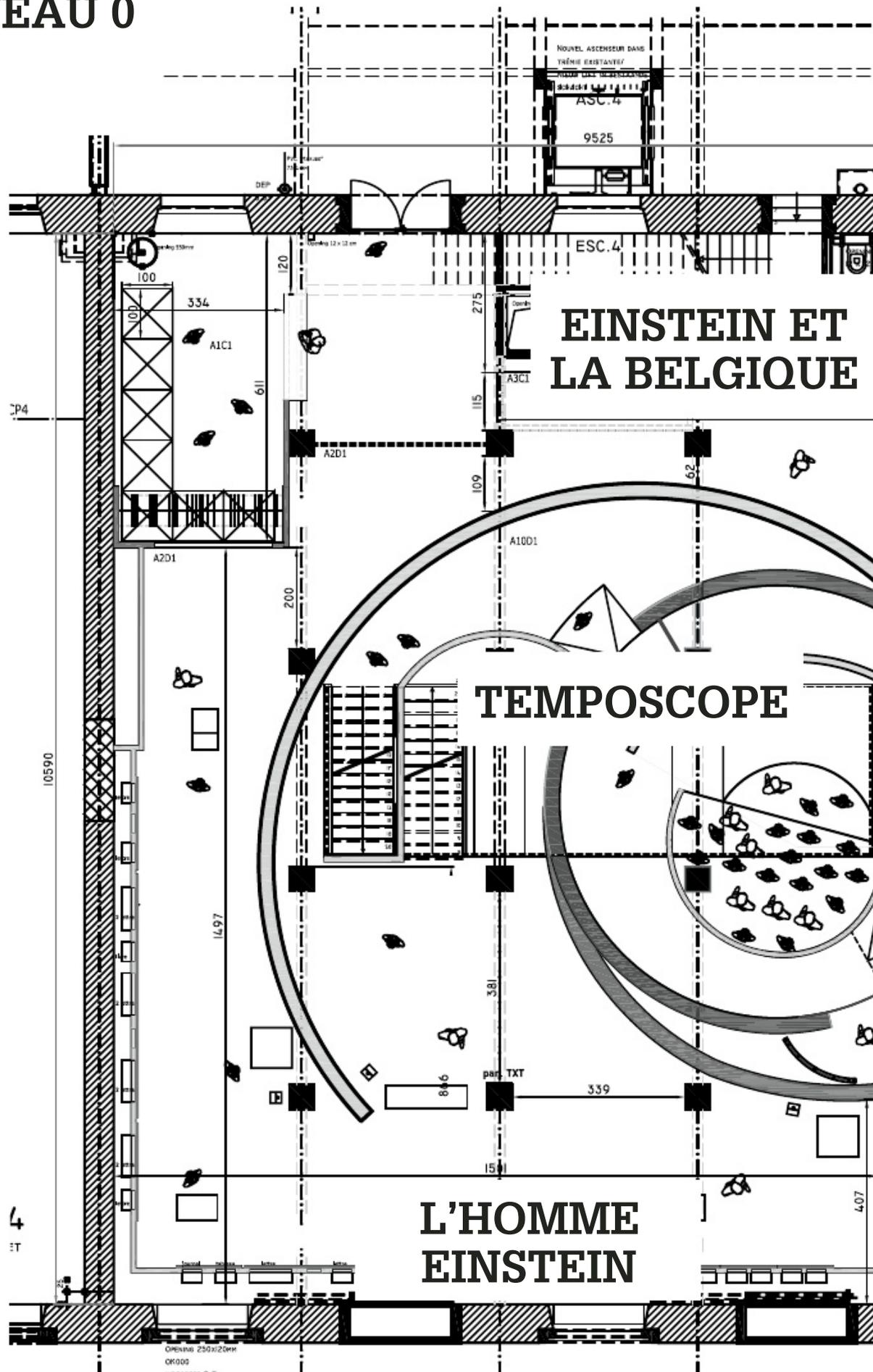
ÉTIENNE KLEIN, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Champs Flammarion.

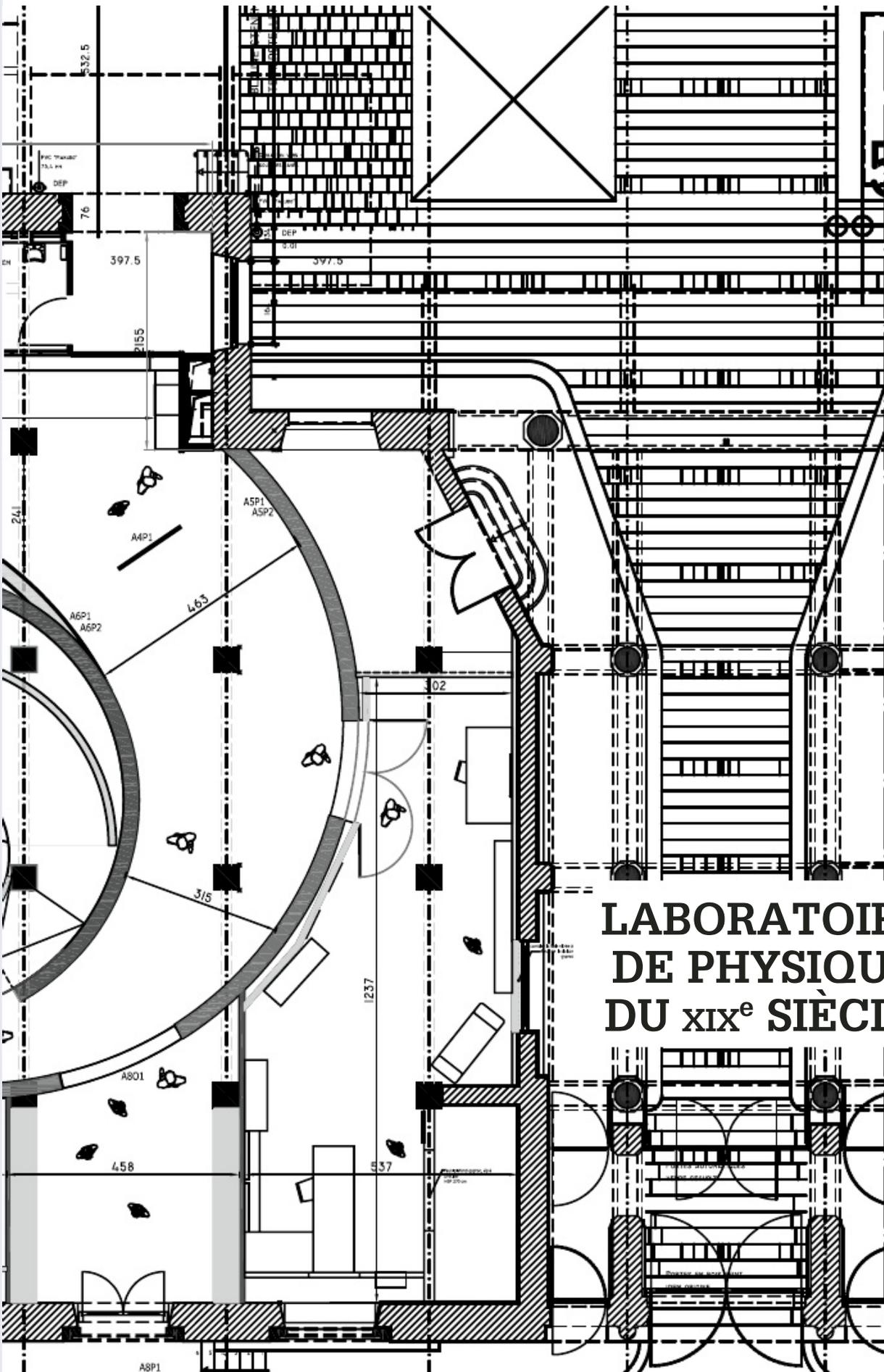
J.P. MCEVOY et OSCAR ZARATE, *La physique quantique sans aspirine*.

Einstein aujourd'hui, collectif, EDP Sciences/ CNRS Editions.

L'EXPOSITION

EXPO NIVEAU 0

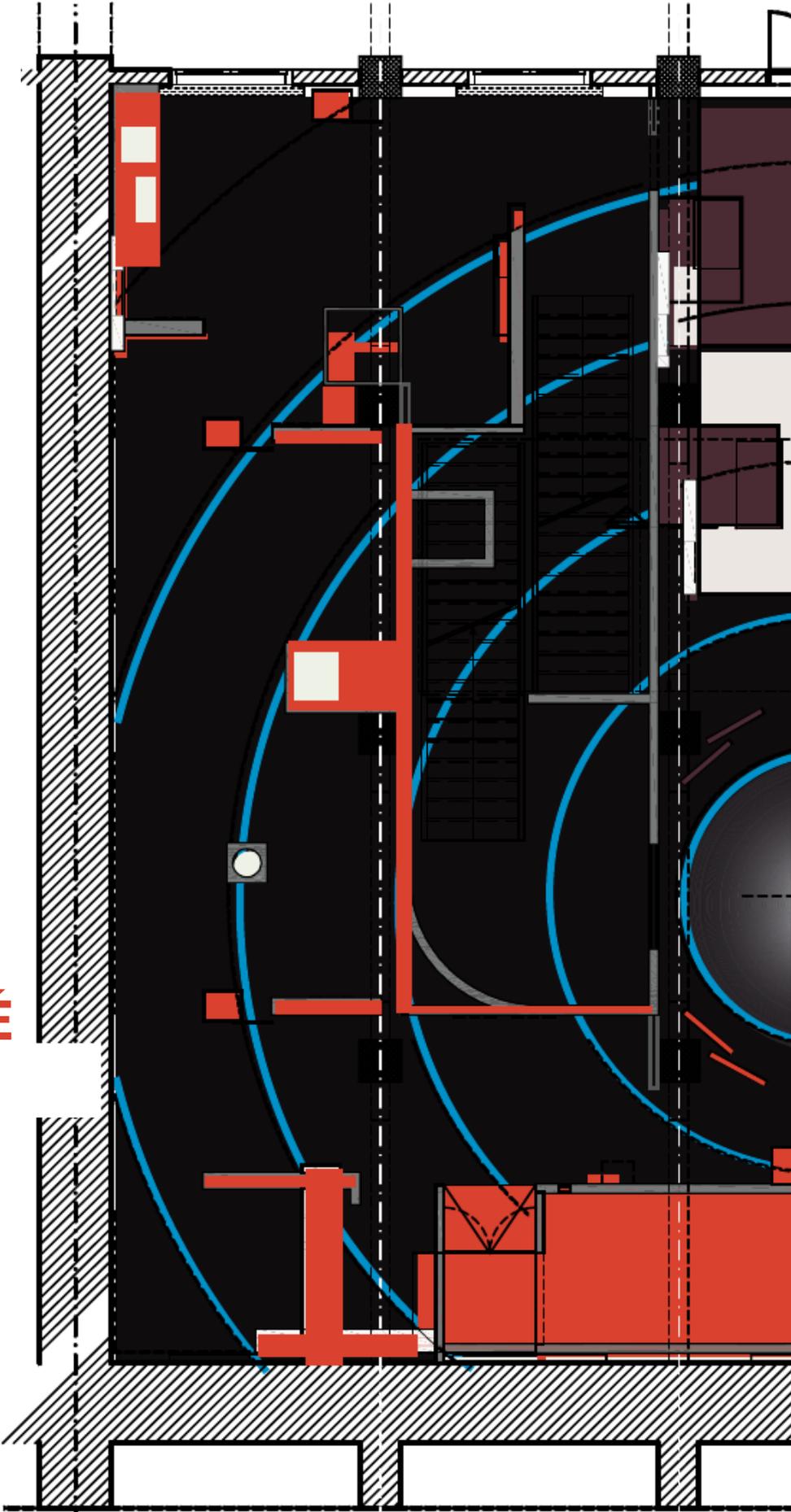


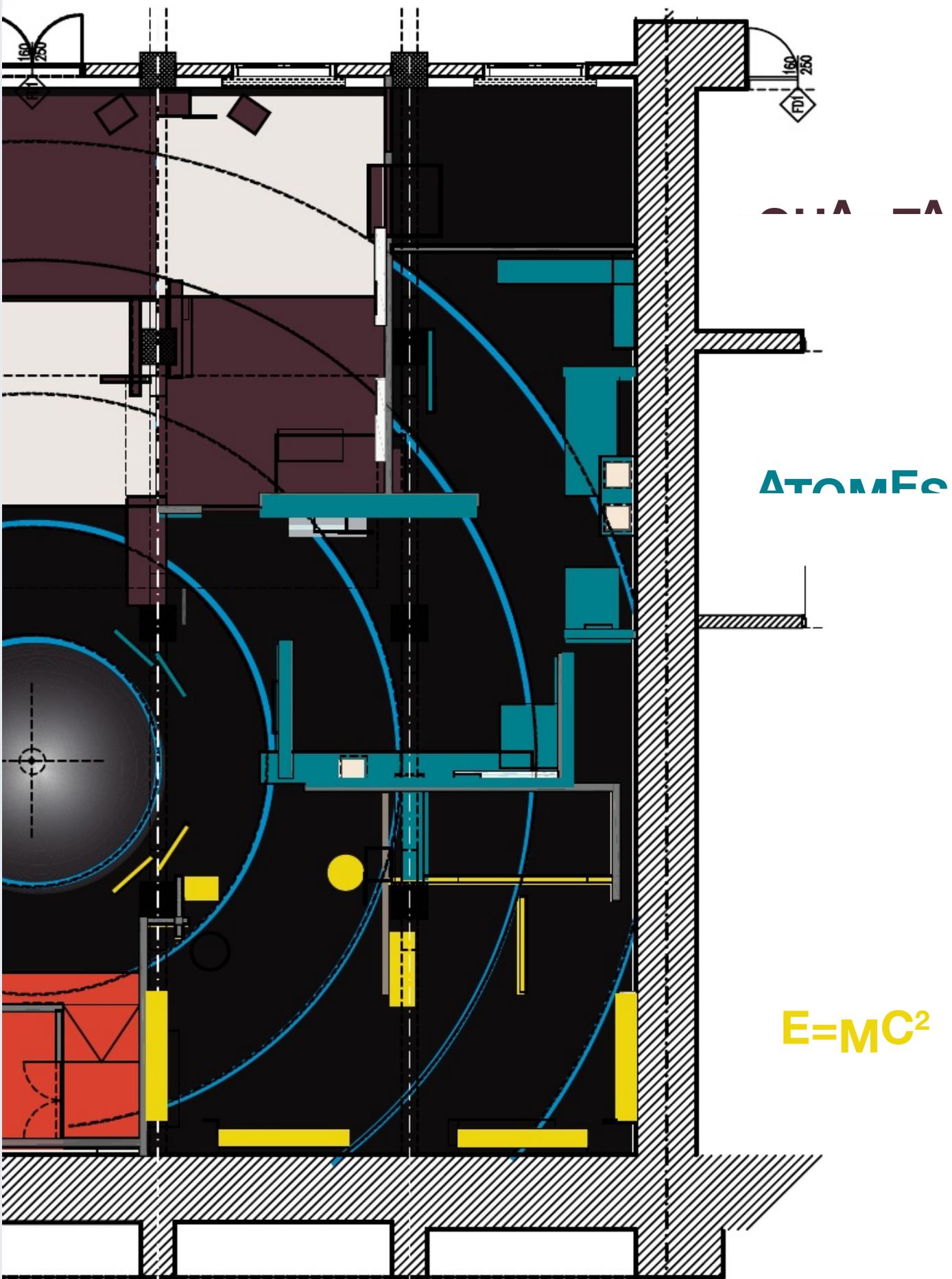


LABORATOIRE DE PHYSIQUE DU XIX^e SIÈCLE

EXPO NIVEAU -1

RELATIVITÉ







Einstein et la Belgique

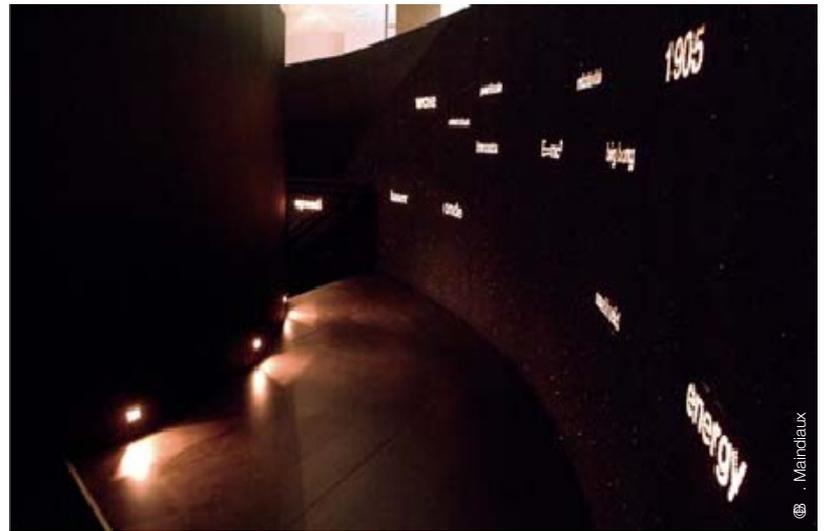


Einstein et la Belgique



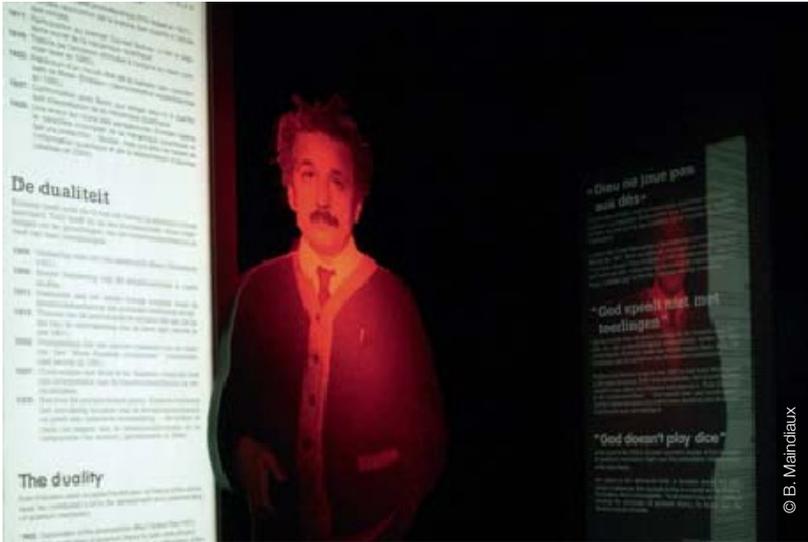
Le labo de physique du XIX^e

La fresque de la physique



Les quanta





© B. Maillard

Les quanta



© B. Maillard

$E=mc^2$



© B. Maillard

Microscope à effet de champ

Les quatre articles



Le détecteur de muons





La vie d'Einstein



La vie d'Einstein



Einstein aujourd'hui

Sous le Haut Patronage de Sa Majesté le Roi Albert II

La réalisation de l'exposition *Einstein, l'autre regard* n'aurait pas été possible sans le soutien de pouvoirs publics, de fondations et d'entreprises qui partagent avec les organisateurs le désir de diffuser le goût de la science et les valeurs humanistes dont Albert Einstein était porteur.



Région de Bruxelles-Capitale

Charles Picqué

Ministre-Président

Benoît Cerexhe

Ministre en charge de
la Recherche scientifique

Guy Vanhengel

Ministre des Relations extérieures



Marie-Dominique Simonet

Ministre de l'Enseignement
supérieur
et de la Recherche scientifique



Bert Anciaux

Minister van Cultuur



Evelyne Huytebroeck

Ministre en charge du Tourisme
à la Commission communautaire française
(COCOF)

Françoise Dupuis

Ministre en charge de la Culture
à la Commission communautaire française
(COCOF)





avec le soutien de

Collection et Patrimoine – Musée de l'Europe – IBA – Celio – Tour & Taxis – Barco



