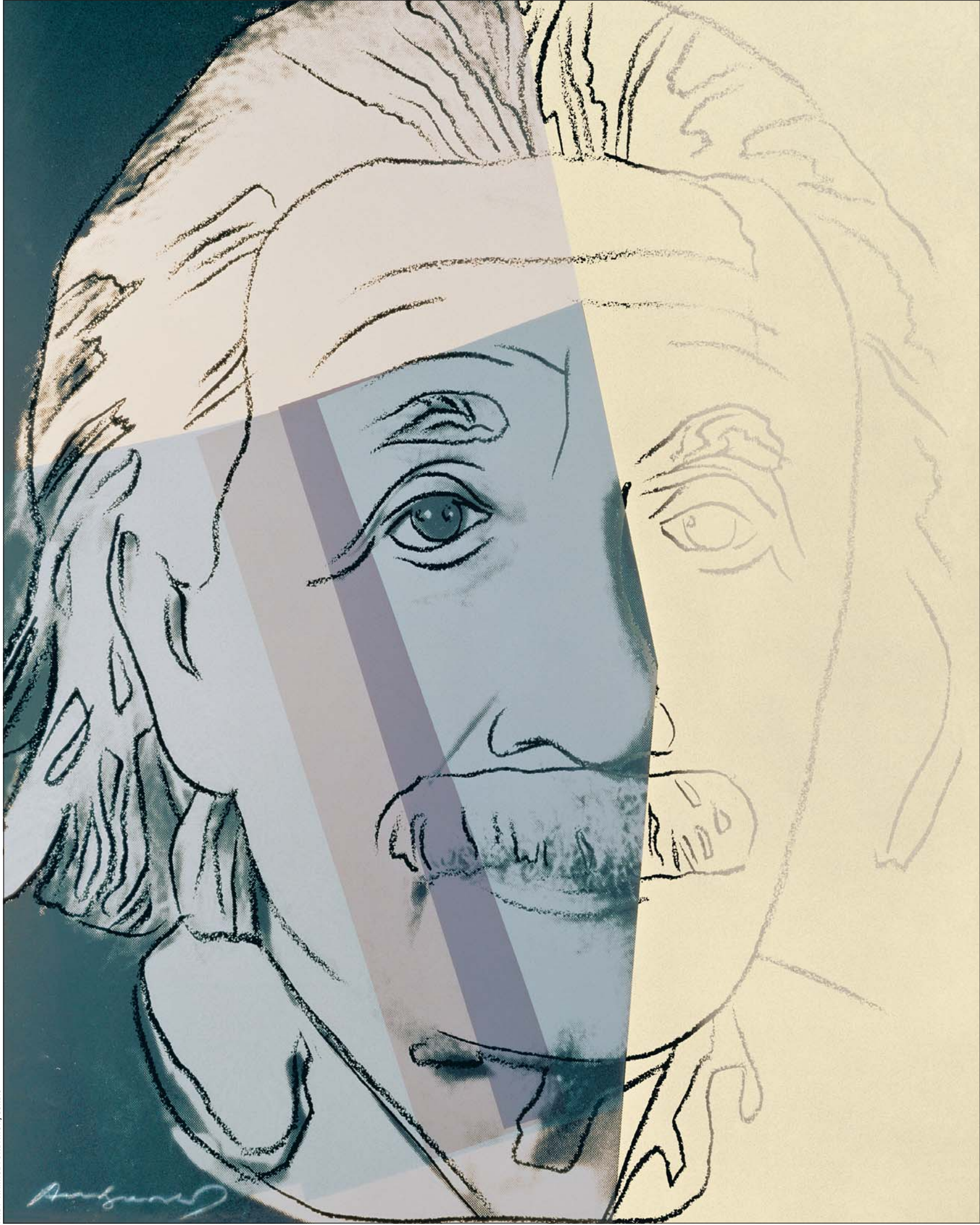


Le Monde

DOSSIER

MERCREDI 8 JUIN 2005



ANDY WARHOL FONDATION/CORBIS

Albert Einstein

LES TROIS COUPS DE GÉNIE DE 1905

Rares sont les scientifiques devenus des stars mondiales de leur vivant. Albert Einstein (1879-1955), cent ans après ses premiers travaux et cinquante ans après sa mort, pourrait, de plus, constater que sa réputation est restée intacte auprès de ses pairs. Les grands physiciens d'aujourd'hui vénèrent jusqu'à ses erreurs, qualifiées de « visionnaires ». Et ils n'apportent

pas le moindre bémol à l'importance majeure de ses trois publications de 1905, cette « année miraculeuse » dont le centenaire est célébré dans le monde entier. L'hypothèse d'une lumière corpusculaire composée de photons est à l'origine de la mécanique quantique. La relativité restreinte prépare la relativité générale de 1915, qui sert de

fondement à l'ensemble de la cosmologie moderne. Quant à la formule la plus célèbre de la science, $E=mc^2$, on la retrouve dans la bombe atomique et dans les centrales nucléaires. C'est dire à quel point les publications très théoriques de 1905 ont contribué à façonner le cours du XX^e siècle.

M. Al.

LES INTUITIONS SCIENTIFIQUES DU PÈRE DE LA RELATIVITÉ RÉVÈLENT UNE INDÉPENDANCE D'ESPRIT QUI A AUSSI GUIDÉ SES ENGAGEMENTS MILITANTS

Albert Einstein, ou le génie du non-conformisme

Une langue impertinente dans un masque de clown triste. Une formule, $E = mc^2$, pied de nez au sens commun... De la relation d'équivalence entre la masse et l'énergie, énoncée à 26 ans, ou de la photographie facéieuse prise quatre ans avant sa mort, on ne sait laquelle a le mieux servi la célébrité d'Einstein.

L'une et l'autre, à leur manière, disent la même chose : que ce petit homme ébouriffé aux intuitions ébouriffantes, ce faux père tranquille au regard débonnaire traversé de géniales fulgurances, celui que le magazine *Time* a élu « *homme du siècle* » et dont le pop art a fait une icône à l'égal de Marilyn Monroe, était mû, décrypte l'une de ses meilleures exégètes, la physicienne Françoise Balibar, par un « *non-conformisme* » absolu. Et même par « *une volonté réfléchie de non-conformisme* ». Une « *posture remarquable qui le différencie de la figure commune de l'intellectuel engagé, en ce sens qu'il ne prend ses ordres qu'après de sa propre raison, ne se laissant dicter sa conduite par aucune instance extérieure, ni tradition, ni famille de pensée, ni parti politique, ni religion* ».

C'est sans doute cette indépendance d'esprit radicale qui a permis au savant de révolutionner la physique. Mais c'est elle aussi qui a valu au militant, de la paix, des droits de l'homme ou du sionisme, de méchantes querelles et d'incessantes tracasseries.

Les signes de sa singularité sont précoces. Né en 1879, à Ulm (Allemagne), le jeune Albert aurait attendu d'avoir presque 3 ans, rapportent ses biographes, pour prononcer ses premiers mots, « *Le lait est trop chaud* », ajoutant qu'il s'est tu jusqu'alors « *parce qu'avant tout était en ordre* ». Peut-on déjà entendre, dans cette parole d'enfant, la quête

future, poursuivie toute sa vie, d'un ordonnancement de l'Univers ?

Il ne tarde pas, en tout cas, à s'écarter du chemin tracé par sa famille. Une famille juive non pratiquante, mais où la tradition reste prégnante. Il n'a que 12 ans quand il se détourne de la foi, après avoir lu une introduction à la *Géométrie des plans* d'Euclide.

Refusant dès lors l'autorité morale des adultes, il rejette aussi celle de l'école. Non pas qu'il soit le cancre volontiers dépeint, même si son professeur de grec lui lance : « *Einstein, on ne fera jamais rien de vous !* » et qu'aucun de ses enseignants au lycée de Munich ne se souviendra plus tard de cet élève lunatique. S'il se désintéresse des langues anciennes, de l'histoire ou de la géographie, il excelle en physique et en mathématiques dont il potasse, au fond de la classe, le manuel de l'année supérieure. Mais il ne supporte pas la rigidité de l'enseignement et son « *rituel d'apprentissage idiot* ».

A 15 ans, il fuit l'Allemagne où il étouffe pour rejoindre sa famille qui s'est installée en Italie, mais surtout pour échapper au service militaire. Cette incartade ne l'empêche pas de réussir à 17 ans, à sa seconde tentative, l'examen d'entrée à l'École polytechnique de Zurich.

Diplômé, il ne trouve qu'un modeste emploi d'assistant de troisième classe, au service des inventions techniques à l'Office fédéral des brevets de Berne. C'est pourtant là qu'en 1905, il publie coup sur coup quatre articles fondateurs. L'un, qui fait l'hypothèse que la lumière est constituée de « grains » d'énergie, posant ainsi les fondations de la mécanique quantique, lui vaudra, en 1921, le prix Nobel de physique. Un autre, rédigé à la façon d'un brevet, énonce la théorie de la relativité restreinte, en redéfinissant les concepts

d'espace et de temps. Il ne s'agit encore que du premier niveau de ce qu'il nomme une « *maison à deux étages* ». Dix années supplémentaires seront nécessaires pour achever sa construction et publier, en 1916, la théorie de la relativité générale.

HUMANISTE DE GAUCHE

Cette prodigieuse fécondité n'est toutefois pas celle d'un penseur solitaire. Sa première épouse, Mileva, une étudiante serbe de quatre ans son aînée, dont il fait la connaissance à l'École polytechnique de Zurich, joue le rôle de confidente, de conseillère, de collaboratrice même. « *Mon inspirateur génial* », dira-t-il. Pour lui, elle sacrifie sa propre carrière.

Quelle fut sa contribution à la théorie de la relativité ? Einstein ne le mentionnera jamais. Mais, poussé peut-être par le remords, alors qu'ils sont depuis longtemps séparés et qu'il s'est remarié avec sa cousine Elsa, il fera don à Mileva du montant de son prix Nobel.

Ses idées s'inscrivent aussi, souligne le sociologue américain Lewis S. Feuer, dans l'effervescence intellectuelle du tournant du siècle, où s'épanouit, comme dans un bouillon de culture, « *une génération de rebelles* » en rupture avec les schémas de pensée établis. C'est l'époque où Picasso, avec *Les Femmes d'Alger*, puis les cubistes chahutent les perspectives. Où Proust, dans *La*



Warren Harding, 29^e président des Etats-Unis, entouré d'Albert Einstein et de son épouse Elsa, et de Sigmund Freud.

Recherche du temps perdu, convoque « *un espace à quatre dimensions* ». Où Freud – qu'Einstein a rencontré et avec lequel il entretient une correspondance, tout en jugeant ses idées « *douteuses* » et ses méthodes « *trompeuses* » – a déjà ébranlé l'édifice cartésien.

Sa puissance visionnaire s'arrêtera au seuil de la mécanique quantique, à laquelle il refusera obstinément de se convertir. L'indéterminisme qui prévaut à l'échelle subatomique,

il est alors sur tous les fronts, prenant fait et cause pour les droits des Noirs et appelant à la désobéissance civile contre le maccarthysme : « *Tout intellectuel cité à comparaître devrait refuser toute déposition, c'est-à-dire être prêt à subir la prison et la ruine, s'enflamme-t-il. Sinon, les intellectuels de ce pays ne méritent que l'esclavage auquel on veut les soumettre.* » Cet activisme lui vaut une surveillance rapprochée du FBI, qui le soupçonne de « *haute trahison* » pour le compte de

« Dieu ne joue pas aux dés »

Le dialogue est passé à la postérité. A Einstein qui lui opposait que « *Dieu ne joue pas aux dés* », le physicien danois Niels Bohr, l'un des pères de la mécanique quantique, répliqua vivement : « *Qui êtes-vous, Einstein, pour dire à Dieu ce qu'il doit faire ?* » Cet échange ciselé a été parfois mal interprété. Einstein, qui s'est détourné du judaïsme dès son plus jeune âge, ne croit pas en un Dieu créateur ou ordonnateur de l'Univers. Le Dieu qu'il invoque, en l'appelant parfois « *le Vieux* », n'est pas celui de la tradition judéo-chrétienne, ni d'une quelconque religion. C'est, dit-il lui-même, le Dieu de Spinoza. C'est-à-dire, en réalité, la nature, comme l'explicite la définition qu'en donne le philosophe hollandais : « *Deus sive natura* », Dieu ou la nature. Einstein croit, en revanche, qu'il existe un ordre naturel, régi par des lois rationnelles qui peuvent être découvertes et qui ne laissent pas place au principe d'incertitude – le « *coup de dés* » – de la théorie quantique.

où il est impossible de connaître à la fois la vitesse et la position d'une particule – le « *hasard* » quantique –, heurte sa conception d'un ordre universel.

La liberté de jugement qui guide l'homme de science, jusque dans ses erreurs, est aussi celle qui traverse ses engagements militants. Humaniste de gauche en marge de tous les partis, il refuse pendant la première guerre, alors qu'il vient d'être nommé professeur à l'université de Berlin, de joindre sa voix aux intellectuels cautionnant, au nom de la « *protection de la culture* », le bellicisme allemand. Il se range aux côtés des objecteurs de conscience, met sa notoriété grandissante au service des combats pacifistes, avant de faire volte-face devant la montée du nazisme. « *J'abhorre l'armée et toute manifestation de force. Je suis néanmoins convaincu qu'aujourd'hui ce moyen exécuté représente la seule protection efficace* », écrit-il en 1933.

Quelques semaines avant l'arrivée d'Hitler au pouvoir, il se résout à quitter l'Allemagne, où il est en butte à de violentes attaques antisémites qualifiant la relativité de « *duperie typiquement juive* ». Il s'installe, définitivement, aux Etats-Unis, où il rejoint l'Institute for Advanced Study de Princeton.

C'est là qu'en 1939, il adresse à Roosevelt une lettre l'exhortant à entreprendre des recherches sur l'arme atomique, dont il craint que l'Allemagne se dote la première. Il se reprochera plus tard ce geste, consacrant ses forces déclinantes à lutter pour le désarme-

ment. Il est alors sur tous les fronts, prenant fait et cause pour les droits des Noirs et appelant à la désobéissance civile contre le maccarthysme : « *Tout intellectuel cité à comparaître devrait refuser toute déposition, c'est-à-dire être prêt à subir la prison et la ruine, s'enflamme-t-il. Sinon, les intellectuels de ce pays ne méritent que l'esclavage auquel on veut les soumettre.* » Cet activisme lui vaut une surveillance rapprochée du FBI, qui le soupçonne de « *haute trahison* » pour le compte de

l'Union soviétique et constitue sur lui un dossier de 1400 pages. Indéfectiblement solidaire de ses « *frères juifs* », sa « *tribu* », il soutient depuis toujours le projet de fondation d'un foyer juif en Palestine, même s'il mesure les difficultés du partage de ce minuscule territoire avec les Arabes, « *son peuple frère* », et qu'il n'est pas partisan de la création d'un Etat juif. En 1952, il décline la proposition de Ben Gourion de succéder à Chaïm Weizmann à la présidence d'Israël.

Moins exemplaire – plus conformiste ? – aura été l'homme privé. Mauvais mari, il traitera rudement Mileva, pour qui son amour s'est mué en détestation, avant de l'oublier. Piètre père, il laissera son épouse, qu'il a peut-être contrainte d'abandonner leur fille à sa naissance, élever seule leurs deux fils, dont le plus jeune deviendra schizophrène. Toute sa vie, il préférera ses équations, son violon, ses parties de voile et ses conquêtes féminines – les maisons closes à l'occasion – à ses proches.

S'arrêtant à son action politique, Françoise Balibar note : « *On a du mal à ne pas la considérer comme une suite d'échecs, inévitables, prévisibles même.* » Lorsqu'il meurt, en 1955, la course aux armements bat son plein. La deuxième guerre israélo-arabe est proche d'éclater. Et la formule ultime de l'Univers reste à découvrir.

Pierre Le Hir

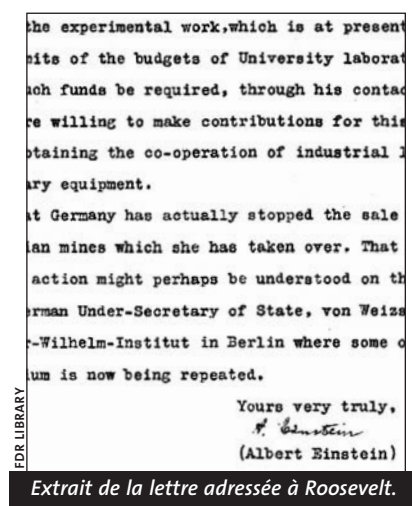
A l'origine de la bombe atomique ?

Quelle fut la responsabilité d'Einstein dans la tragédie d'Hiroshima et de Nagasaki ? En énonçant, en 1905, la relation $E = mc^2$ établissant que la masse pouvait être convertie en énergie, il n'imaginait certes pas que ce principe, appliqué à la fission en chaîne de noyaux d'uranium ou de plutonium, allait libérer, quarante ans plus tard, le feu nucléaire. Mais, s'il ne prit pas part à la fabrication de l'arme atomique, il incita néanmoins l'Amérique à s'en doter.

Einstein est en vacances à Long Island, en juillet 1935, quand Leo Szilard et Eugene Wigner, deux physiciens américains d'origine hongroise, l'alertent : l'Allemagne nazie travaillerait à la fabrication d'une bombe atomique. Horrifié, il écrit alors au président Franklin Roosevelt une lettre l'avertissant du danger.

« *Une seule bombe de ce type, chargée sur un bateau et explosant dans un port, pourrait très bien détruire le port entier en même temps qu'une partie de son environ-*

nement », prévient-il. La mise en garde du Prix Nobel influence-t-elle vraiment le président américain ? Toujours est-il



Extrait de la lettre adressée à Roosevelt.

qu'à partir de 1943, des milliers de chercheurs, dont l'élite des physiciens, sont mobilisés, dans un laboratoire secret aménagé à Los Alamos, dans le désert du Nouveau-Mexique, pour le projet Manhattan. Einstein n'y participe pas, sans doute parce que le FBI se méfie de lui.

Beaucoup de ces savants, conscients de jouer les apprentis sorciers, tenteront de faire marche arrière. Au printemps 1945, Einstein rédige une seconde lettre à l'intention de Roosevelt, dans laquelle il fait état d'un « *grand souci* », sans expliciter plus clairement ses craintes. Trop tard. Le 6 août 1945, l'enfer se déchaîne dans le ciel d'Hiroshima. Puis, le 9 août, dans celui de Nagasaki.

« *Malheur !* », s'exclamera Einstein. Plus tard, il dira : « *Je crois que les anciens Chinois avaient raison. Il est impossible de tirer toutes les conséquences de ses actes.* »

P. L. H.

SA VIE, SON ŒUVRE

1879. Né le 14 mars à Ulm, en Allemagne, où son père possède une petite entreprise d'outillage électrique. Etudes au lycée de Munich dont il fugue à 15 ans.

1896. Admission à l'École polytechnique de Zurich, dont il sort diplômé en 1900.

1901. Obtention de la citoyenneté suisse.

1902. Emploi d'expert de troisième classe à l'Office des brevets de Berne.

1903. Mariage avec Mileva Maric, ancienne camarade de classe de l'Institut polytechnique, dont il a trois enfants : Liesert (1902), abandonnée à sa naissance, Hans-Albert (1904) et Eduard (1910), qui deviendra schizophrène.

1905. Publication, dans *Annalen der Physik*, de quatre articles historiques : « *Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière* (mars 1905), suggérant que la lumière est constituée de quanta d'énergie nommés par la suite photons ; « *Du mouvement des particules en suspension dans les liquides au repos lié à la théorie cinétique moléculaire de la chaleur* » (mai 1905), démontrant la structure atomique de la matière, encore mise en doute ; « *Sur l'électrodynamique des corps en mouvement* » (juin 1905), redéfinissant les relations entre l'espace et le temps et énonçant la théorie de la relativité restreinte ; « *L'inertie d'un corps dépend-elle de son énergie ?* » (septembre 1905), *addendum* au précédent montrant que la masse et l'énergie sont interchangeables.

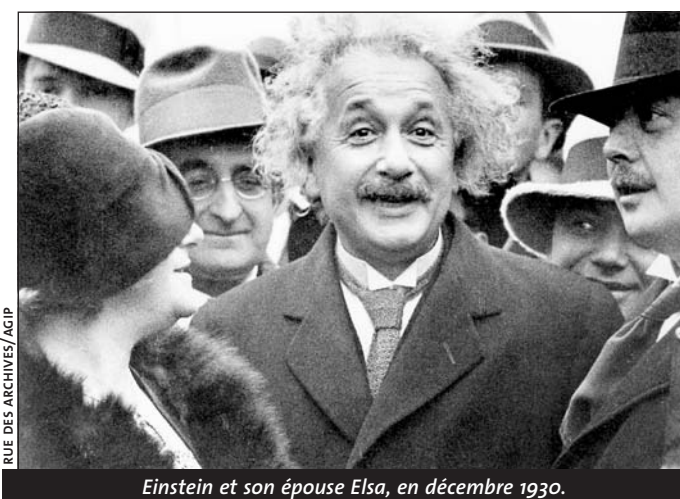
1909. Professeur de physique théorique à l'université de Zurich.

1914. Professeur à l'université de Berlin, membre de l'Académie des sciences de Prusse. Séparation d'avec Mileva, qui repart vivre à Zurich avec leurs fils.

1916. Publication des *Fondements de la théorie générale de la relativité*.

1919. Observation, par l'astronome royal britannique Arthur Stanley Eddington, de la courbure des rayons lumineux d'une étoile sous l'effet du champ gravitationnel du Soleil, confirmant les prévisions de la théorie de la relativité. Divorce d'avec Mileva et remariage avec sa cousine Elsa Löwenthal. Popularité internationale grandissante, mise au service du pacifisme et du sionisme.

1921. Prix Nobel de physique pour ses travaux sur les quanta de lumière et l'effet photoélectrique, et



Einstein et son épouse Elsa, en décembre 1930.

non pour la théorie de la relativité, encore controversée.

1932. Départ d'Allemagne, devant la montée de l'antisémitisme, pour l'Institute for Advanced Study de Princeton.

1936. Mort d'Elsa.

1939. Lettre à Franklin Roosevelt, président des Etats-Unis, l'avertissant du risque que l'Allemagne se dote de l'arme atomique.

1940. Obtention de la citoyenneté américaine, mais conservation de la nationalité suisse.

1945. Après la guerre, engagement très actif en faveur du désarmement, des victimes du maccarthysme et des droits des Noirs.

1946. Lettre aux Nations unies prônant l'établissement d'un gouvernement mondial.

1948. Mort de Mileva.

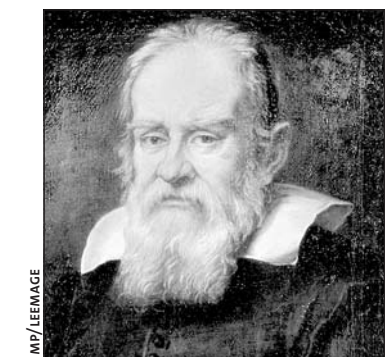
1952. Refus de la proposition de Ben Gourion de prendre la présidence de l'Etat d'Israël.

1955. Signature d'un manifeste en faveur de l'abandon des armes nucléaires.

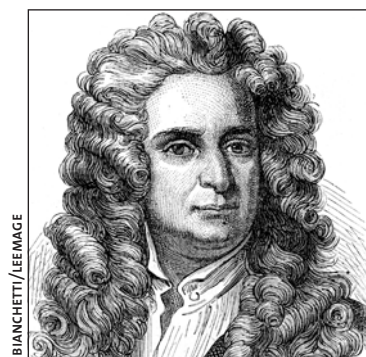
Mort le 13 avril à Princeton, d'une rupture d'anévrisme. Ses cendres sont dispersées sur les rives de la rivière Delaware.

Mouvement et repos sont équivalents

LE PRINCIPE DE RELATIVITÉ, DÉFINI AU XVII^E SIÈCLE PAR GALILÉE, ET LA LOI D'INERTIE, ÉNONCÉE PAR NEWTON EN 1759, PRÉPARENT LES AVANCÉES D'EINSTEIN



Galilée (1564-1642).



Newton (1642-1727).

En 1632 paraît, à Florence, sous la signature de Galilée, le *Dialogue* concernant les deux plus grands systèmes du monde. Cette publication est l'acte inaugural de toute la science classique et, par là, de toute la physique. Avec lui, la physique aristotélicienne va, définitivement, s'effondrer. On y trouve énoncé le principe de relativité. Et ça n'est pas un hasard si, pour ses travaux, Einstein pose, deux cent cinquante ans plus tard, en figure tutélaire, Galilée à côté de Newton. Dans ce dialogue, d'une grande qualité littéraire, se confrontent trois personnages, dont l'un représente l'ancienne physique, Simplicio, Salviati, porte-parole de Galilée, et ce dernier. Le cadre général est celui d'un voyage en mer. Un navire quitte Venise, passe par Corfou, la Crète et Chypre et se rend ensuite à Alep (Syrie).

Le mouvement, ou le repos, est l'indice d'un rapport entre les choses

Voilà comment se disait la physique à cette époque. Salviati : « *Enfermez-vous avec un ami dans la plus vaste cabine d'un grand navire, et faites en sorte qu'il s'y trouve également des mouches, des papillons et d'autres petits animaux volants, qu'y soit disposé un grand récipient rempli d'eau dans lequel on aura mis de petits poissons. (...) Puis alors que le navire est à l'arrêt, observez attentivement, précisez-t-il, comment ces petits animaux volent avec des vitesses égales quel que soit l'endroit de la cabine vers lequel ils se dirigent ; vous pourrez voir les poissons nager indifféremment dans toutes les directions. (...) Et si vous sautez à pieds joints, vous franchirez des espaces semblables dans toutes les directions. Une fois que vous aurez observé attentivement tout cela – il ne fait aucun doute que si le navire est à l'arrêt les choses doivent se passer ainsi –, faites se déplacer le navire à une vitesse aussi grande que vous voudrez ; pourvu que le mouvement soit uniforme et ne fluctue pas de-ci de-là, vous n'apercevrez, ajoute-t-il, aucun changement dans les effets nommés, et aucun d'entre eux ne vous permettra de savoir si le navire avance ou bien s'il est arrêté. Si vous sautez, vous franchirez sur le plancher les mêmes distances qu'auparavant et, si le navire se déplace, vous n'en ferez pas pour autant des sauts plus grands vers la poupe que vers la proue, bien que, pendant que*

vous êtes en l'air, le plancher qui est en dessous ait glissé dans la direction opposée à celle de votre saut. »

Que peut-on tirer immédiatement de ces considérations ? La première est l'équivalence. Pour Galilée il existe une équivalence entre le repos et le mouvement. Le mouvement est « *comme rien* », comme « *nul* ». Ainsi le mouvement ne concerne jamais un corps isolé. Le mouvement, ou le repos, est l'indice d'un rapport entre les choses. Donc le mouvement ne se conçoit qu'à deux. Ici, c'est l'antagonisme entre absolu et relatif qu'il faut retenir. Galilée va introduire l'idée d'un « *mouvement sans cause* ». Si nous considérons les papillons, le mouvement qu'ils partagent avec le navire est « *sans cause* » puisqu'ils n'ont aucun effort à fournir pour aller de Venise à Alep. Ils partagent simplement le mouvement du navire. En termes modernes, on nomme « *référentiel* » le corps par rapport auquel on repère le mouvement que l'on veut étudier. Ce mouvement doit toujours être entendu comme une relation à deux et n'a de sens que par rapport à un autre corps privé de ce mouvement. Dans l'exemple galiléen, Venise peut servir de référentiel, tout comme Alep. Concernant le mouvement du navire, Venise et Alep, immobiles l'un par rapport à l'autre sont équivalents.

C'est Newton qui, par la première loi de ses *Principes mathématiques de la philosophie naturelle* de 1759, devait compléter cet ensemble de considérations. Il s'agit de la loi d'inertie : « *Tout corps persévère dans l'état de repos ou de mouvement uniforme en ligne droite dans lequel il se trouve, à moins que quelque force n'agisse sur lui, et ne le contraigne à changer d'état.* » Cette loi complète le principe de Galilée qui stipule, de manière plus large, qu'il existe des points de vue équivalents sur le monde. Ils forment une classe de systèmes de référence que l'on appelle « *référentiels inertiels* » dans lesquels les lois de la physique gardent la même forme.

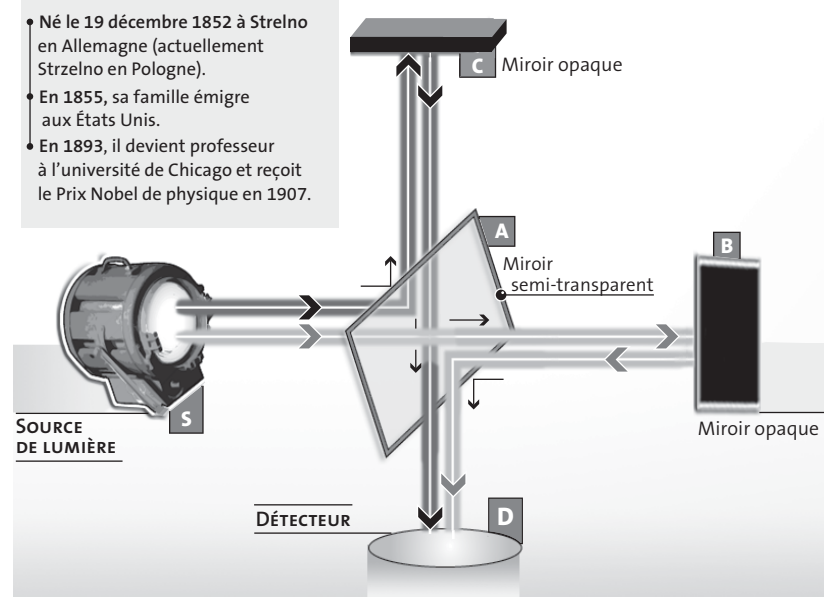
On peut prendre un dernier exemple concret. Celui du train, cette fois. Les lois qui régissent la manière dont le café coule de la cafetière dans une tasse sont les mêmes, dans le « *référentiel* » de la gare et dans celui d'un train roulant en ligne droite à vitesse constante. Dans ce cas, on dira que le référentiel de la gare et celui du train sont équivalents. Ultime conséquence, là encore contre-intuitive. Le principe de relativité implique que le repos est un cas particulier du mouvement inertiel. Seul existe le mouvement.

Stéphane Deligeorges

À LA RECHERCHE D'UNE MANIFESTATION DE L'ÉTHÉR

ALBERT A. MICHELSON

- Né le 19 décembre 1852 à Strzelno en Allemagne (actuellement Strzelno en Pologne).
- En 1855, sa famille émigre aux États Unis.
- En 1893, il devient professeur à l'université de Chicago et reçoit le Prix Nobel de physique en 1907.



L'interféromètre de Michelson est composé d'une source de lumière S, d'un miroir semi-transparent A situé à la même distance des miroirs B et C et d'une lunette de détection D. Ainsi un premier rayon est réfléchi par le miroir semi-transparent A et va parcourir S-A-B-A-D, tandis que l'autre est transmis directement et parcourt S-A-C-A-D. On s'attend que, selon l'orientation de l'appareil par rapport à la vitesse de la Terre, la figure d'interférence change.

La vitesse de la lumière issue de la source S (prise dans l'éther) est la même dans toutes les directions. Mais l'interféromètre (C-B-A-D) étant pris dans le mouvement de la Terre, le temps mis par la lumière pour parcourir A-B-A devrait être différent de celui mis pour parcourir A-C-A. Cette expérience a toujours donné des résultats négatifs.

Schéma de l'expérience conduite dans les années 1880 par Albert A. Michelson et Edward W. Morley.

L'éther joue encore un rôle essentiel au début du XX^e siècle

MALGRÉ LES DÉCOUVERTES DE MICHAEL FARADAY, JAMES MAXWELL, HEINRICH HERTZ, HENDRIK LORENTZ, HENRI POINCARÉ ET MAX PLANCK, LES PHYSICIENS BUTENT SUR DES CONTRADICTIONS ET HÉSITENT À FRANCHIR CERTAINS PAS CONCEPTUELS

À u XIX^e siècle, les physiciens se partagent en deux camps au sujet de la nature de la lumière. Les uns affirment que le rayonnement lumineux est un flot de particules microscopiques, de nature discontinue, des « *globules lumineux* » émis par les corps incandescents. Les autres, avec le physicien français Augustin Fresnel, considèrent la lumière comme une onde, une vibration, de nature continue. On pense alors que la vitesse de la lumière est plus élevée dans les corps transparents que dans le vide, si elle est constituée de particules, plus lente si sa nature est ondulatoire.

En 1850, Léon Foucault, par un dispositif minutieux, constate que la lumière se propage moins vite dans l'eau que dans l'air. Les physiciens en concluent que le rayonnement lumineux est bien de nature ondulatoire. À partir de là, une partie d'entre eux va se convaincre qu'à l'instar du son la lumière est une vibration. Le son, phénomène vibratoire, étant transmis par les molécules d'air, il semblait nécessaire que la lumière se propage dans un milieu répandu dans tout l'univers : l'éther.

D'un tout autre point de vue, les études concernant le magnétisme, d'une part, et l'électricité, d'autre part, formaient des spécialités séparées. L'optique, attachée, elle, à la lumière, constituait aussi une discipline autonome. Michael Faraday, parfait autodidacte, travaillant comme relieur de livres à Londres, va entreprendre, à partir de 1824, une série époustouflante d'expériences. Elles vont le conduire à découvrir, en 1831, l'induction électromagnétique permettant la construction de dynamos transformant l'énergie mécanique en courant, c'est-à-dire en énergie électrique. Mais M. Faraday est, au XIX^e siècle, l'un des rares savants à ne pas avoir recours au langage mathématique, qu'il pratiquait mal.

Vers 1865, un génie écossais, James Clerk Maxwell, à la suite d'un travail mathématique impressionnant, obtient la première unification théorique de toute l'histoire de la

physique. Électricité, magnétisme et lumière, jusqu'alors considérés comme étrangers les uns aux autres, sont désormais réunis au sein de l'électromagnétisme. Le phénomène est, dans ce cadre, conçu de manière parfaitement ondulatoire, continu. Mais une controverse puissante persiste. Pour les physiciens continents, l'électrodynamique, qui s'intéresse aux corps électriques en mouvement, doit se fonder sur des actions à distance, à l'instar de la gravitation de Newton. Pour James Maxwell, tous les effets électriques, magnétiques et les phénomènes ondulatoires sont, à l'inverse, réduits à des actions de proche en proche dans un milieu très particulier... toujours l'éther. Mais quelle est donc la nature exacte de ce fluide mystérieux ? Pour James Maxwell, la propagation de l'énergie électromagnétique n'est concevable que de deux manières. Soit comme le « *vol* » d'une substance matérielle dans l'espace. Soit comme la propagation

hertziennes, montre que l'onde électromagnétique possède toutes les propriétés connues de la lumière. James Maxwell est confirmé. Mais Heinrich Hertz, lui aussi, a besoin de ce fameux éther pour assurer la propagation des ondes électromagnétiques. Il est très difficile, rétrospectivement, de comprendre la nature de cette notion. D'autant qu'elle varie beaucoup d'un physicien à l'autre. L'éther est encore présent chez Hendrik Antoon Lorentz et Henri Poincaré qui ont, l'un et l'autre, beaucoup œuvré pour la relativité restreinte. C'est Albert Einstein qui, le premier en 1905, rejettera abruptement l'éther devenu inutile.

Fin XIX^e siècle et début XX^e siècle, deux expériences ouvrent une perspective absolument inédite sur la nature de la réalité physique de notre univers. En 1887, Hertz constate que lorsqu'on expose un métal à un rayonnement lumineux de fréquence élevée, il émet des électrons. Mais, au-dessous d'une certaine fréquence, le phénomène disparaît. Il constate ainsi l'existence d'un seuil, d'une discontinuité. Pour étudier la nature du rayonnement, les physiciens vont également se doter d'une petite boîte, tel un four parfaitement clos, donc noir. Cette enceinte expérimentale, où la température est constante, est percée d'un trou minuscule qui laisse s'échapper le rayonnement (dit du « *corps noir* ») qui est alors mesuré. Lorsque Max Planck s'attaque à ce problème, une lourde contradiction grève les prédictions de mesure. Les physiciens possèdent deux lois. Mais celle qui décrit la partie ultraviolette du spectre électromagnétique est en complète contradiction avec celle qui traite la partie infrarouge. La crise théorique est totale.

Le 19 octobre 1900, Max Planck propose une loi qui, si elle décrit le rayonnement sur tout le spectre, contient une étrangeté radicale. L'énergie lumineuse est en effet émise de manière discontinue ! Elle est composée de quantités élémentaires, les « *quanta* ». Le monde quantique est né. Il choqua Planck. Mais pas Einstein, qui en fera l'objet de son premier article de 1905.

S. De.

L'électricité, le magnétisme et la lumière se rangent dans une unique interaction : l'électromagnétisme

d'un mouvement ou d'une tension d'un milieu déjà existant dans l'espace. Ainsi, la propagation du champ électromagnétique est conçue comme une sorte d'ébranlement d'un milieu élastique emplissant tout l'espace.

Il faut attendre 1887 pour que le physicien allemand Heinrich Hertz réalise un dispositif expérimental qui produit un champ électrique et un champ magnétique perpendiculaires l'un à l'autre. Heinrich Hertz, qui a découvert les ondes radio baptisées

L'UNIFICATION EST UN MOTEUR DE L'INVENTION

JEAN EISENSTAEDT, historien des sciences à l'Observatoire de Paris

Quelles sont les sources de la découverte de la relativité ?

Les sources de la découverte des questions qui amèneront à la relativité d'Einstein plongent dans le XIX^e siècle. Mais elles préexistent déjà au XVIII^e siècle.

La question est celle de la constance – vérifiée de plus en plus précisément au cours des siècles – de la vitesse de la lumière et ce, quelles que soient les vitesses de la source de lumière, de l'instrument de mesure ainsi que la direction de la rotation de la Terre sur laquelle se fait cette mesure. La vitesse de la lumière semble bel et bien constante. Et elle l'est !

Dans le contexte « *classique* » – de Galilée et Newton –, la vitesse de la lumière devrait dépendre aussi bien de la vitesse de la source que de celle de l'observateur. Or il

n'en est rien. Si l'on ne sait toujours pas « *pourquoi* », on sait depuis cent ans, depuis la relativité d'Einstein, comment décrire ce phénomène étrange. On procède de la même manière que pour la vitesse du passager qui se déplace dans le train. On ajoute donc toujours les vitesses, celle du passager à celle du train (et c'est en ce sens que la théorie d'Einstein est relativiste). Mais cette addition n'est pas classique car c'est une loi de composition des vitesses qui permet de ne pas dépasser une valeur limite, « *c* », qui est la vitesse de la lumière. Il s'agit d'une « *addition* » particulière.

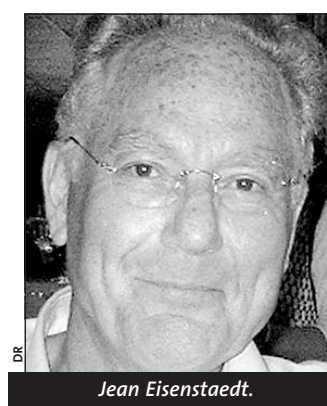
À la fin du XVIII^e siècle, une conception classique des corps en mouvement avait été proposée et aussitôt délaissée. Elle consistait à traiter, en théorie de Newton, les

corpuscules lumineux de la même manière que les particules matérielles. Bien que la vitesse de la lumière y soit variable, cette conception offre des résultats étonnants, nombreux et qualitativement proches de ceux d'Einstein. C'est aujourd'hui un chemin qui permet d'accéder plus simplement, plus pédagogiquement, aussi bien à la relativité restreinte qu'à la générale. Mais cette théorie, morte-née, n'avait jamais encore été explicitée ; ce n'est donc pas la voie empruntée par Einstein.

Quel était le problème majeur qui se posait avant les publications de 1905 ?

L'éther ! Au début du XIX^e siècle, l'éther tient une place centrale dans l'optique. À l'image de la propagation du son dans l'air, la lumière est considérée comme un ébranlement, une mise en vibra-

tion, de l'éther. La source se déplace dans l'éther, mais elle ne communique pas sa vitesse à celle de la lumière qu'elle émet. En fait, l'éther noie, en quelque sorte, la vitesse de la source mais non celle



Jean Eisenstaedt.

de l'observateur. La loi de composition des vitesses n'est donc plus symétrique et ce système de l'éther n'obéit donc pas à la relativité classique. En ce sens, l'éther n'est pas relativiste... On aboutit alors à deux physiques distinctes : celle de la lumière, de l'électromagnétisme – avec l'éther – et celle des corps matériels. C'est incohérent.

Peu à peu, on s'est rendu compte que la vitesse de la lumière ne dépendait pas non plus de celle de l'appareil de mesure ni de la vitesse de la Terre. L'expérience de Michelson a été le point d'orgue de cette évolution. On était tout à fait perdu : l'éther ne suffisait pas à résoudre la question. Einstein a balayé l'éther. Il est revenu au principe de relativité et a posé la constance de la vitesse de la lumière. Il a ainsi redéfini temps, vitesses, addition des vitesses. Et l'ensemble est devenu tout à fait cohérent.

Après 1905, la relativité restreinte est-elle définitivement acceptée ?

Elle le sera rapidement et elle est, depuis lors, l'outil de toute la physique. Ainsi 1905 est un moment essentiel, celui d'une unification de deux physiques : celle de la lumière et de l'électromagnétisme, d'une part, celle des particules matérielles, d'autre part. Une génération auparavant, James Maxwell avait unifié électricité et magnétisme, lumière et électromagnétisme.

Mais Albert Einstein prend vite conscience que la physique est encore divisée : la gravitation n'obéit pas à la nouvelle théorie. Après dix ans d'effort, il unifiera à nouveau la physique avec la relativité générale.

Pourtant, deux domaines essentiels resteront – une fois de plus ! – séparés : gravitation et physique quantique... C'est un problème récurrent : l'unification est un moteur de l'invention en physique.

Propos recueillis par S. De.

EINSTEIN

LES TROIS COUPS DE GÉNIE

Relativité restreinte : la fin du temps absolu

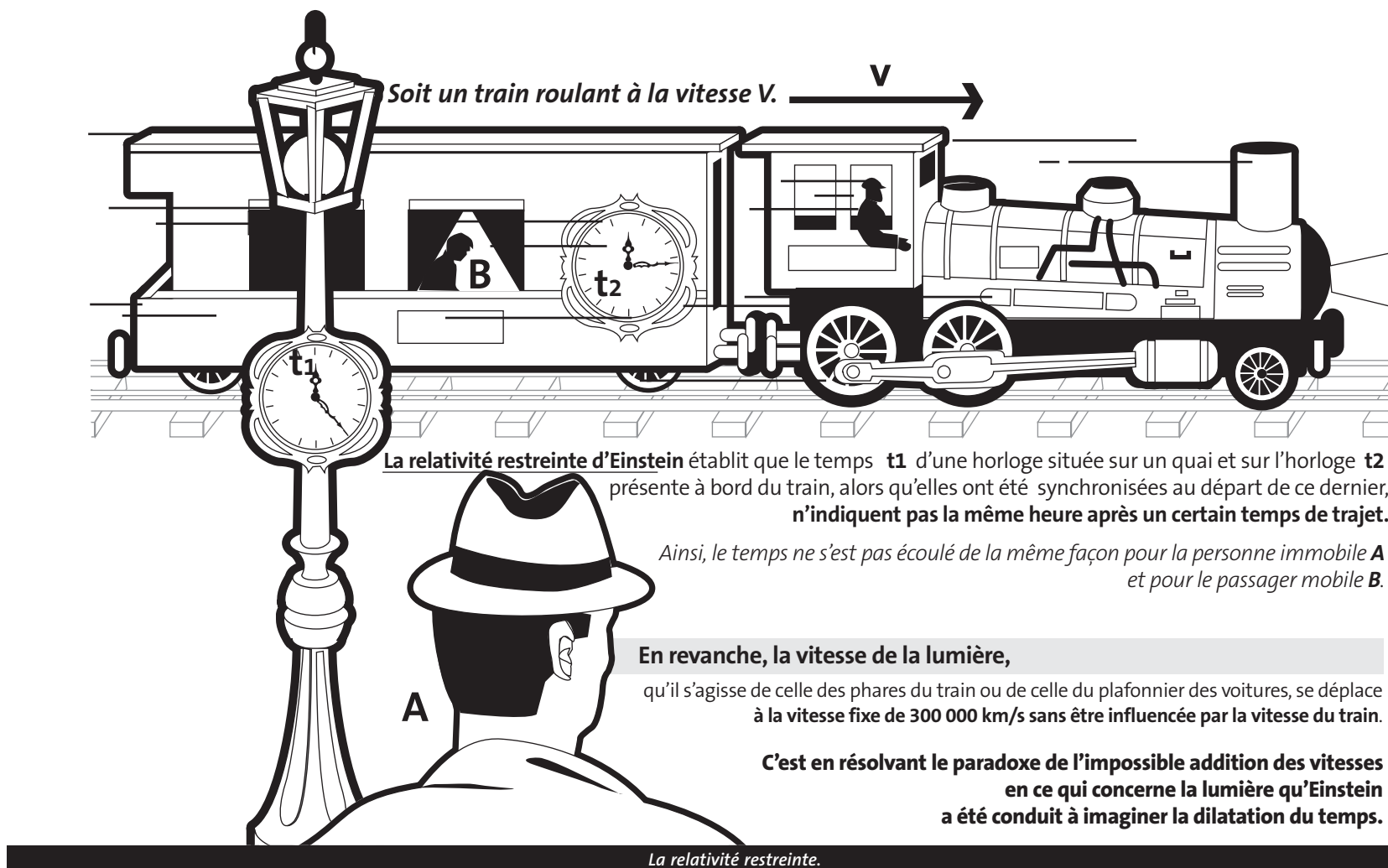
JUIN 1905 : ALBERT EINSTEIN PUBLIE UN ARTICLE INTITULÉ « SUR L'ÉLECTRODYNAMIQUE DES CORPS EN MOUVEMENT ». IL Y DÉMONTRE QUE LES HORLOGES EN MOUVEMENT PRENNENT DU RETARD PAR RAPPORT AUX HORLOGES FIXES

Une horloge placée à l'Equateur de la Terre et entraînée par elle retardera d'une minime fraction sur le temps marqué par une horloge de même construction que la première mais placée au pôle. » Cette phrase, extraite de la publication, dans la revue *Annalen Der Physik* de juin 1905, intitulée « Sur l'électrodynamique des corps en mouvement », bouleverse l'un des fondements de la science de l'époque : la notion de temps. A 26 ans, Albert Einstein, jeune ingénieur du Bureau des brevets de Berne, publie, lors de l'année que la communauté scientifique qualifiera de « miraculeuse », trois articles et un addendum qui vont imprimer un élan extraordinairement puissant à la physique du XX^e siècle. Cent ans plus tard, il est possible de mesurer l'impact de ces publications. L'ensemble confirme qu'Einstein s'inscrit dans la lignée de Galilée et de Newton parmi les plus grands noms de la physique.

En 1905, hormis l'article sur le mouvement brownien, toutes les autres publications ont un rapport avec la lumière, phénomène électromagnétique mal connu et compris à l'époque. En un an, Einstein va affirmer qu'elle se comporte comme un ensemble de corpuscules, les photons, confirmant ainsi les découvertes de Max Planck. Il va affirmer que la vitesse de la lumière est fixe et indépassable. Il montre comment cette vitesse engendre une dilatation du temps et précise le rôle qu'elle joue dans l'équivalence entre la masse et l'énergie.

Le mérite d'Einstein réside essentiellement dans son aptitude à raisonner sans se laisser enfermer dans le carcan des idées reçues de son époque. En matière de relativité, ses résultats s'appuient sur une rupture unique. Alors que, depuis Newton, l'existence d'un temps absolu fait partie des dogmes, la théorie d'Einstein lui substitue une multitude de temps liés à des lieux géographiques et affectés par la vitesse de déplacement de ces lieux. Ainsi, le temps de la gare n'est plus exactement le même que celui du train. Les prédécesseurs d'Einstein, en particulier Hendrik Lorentz et Henri Poincaré, avaient déjà découvert l'importance de ce qu'ils appelaient des « temps locaux ». Mais ils ne s'étaient pas affranchis de la notion de temps absolu. Pour eux, il était donc nécessaire de prendre en compte la relation entre « temps local » et « temps absolu ». Einstein, lui, règle définitivement la question : il n'existe que des temps locaux. Les conséquences de cette innovation en apparence mineure se révèlent considérables.

Exit le temps absolu hérité de la conception divine de Newton qui le considérait comme le « temps de Dieu ». Exit, également, l'espace absolu, l'éther et la loi d'addition des vitesses appliquée à la lumière. Grâce à ce grand nettoyage des idées de son



La relativité restreinte.

temps, Einstein peut y voir plus clair et s'attaquer à un ensemble de problèmes en apparence insolubles.

Paradoxalement, le jeune physicien accomplit ce progrès considérable en appliquant le vieux principe de relativité conçu par Galilée trois siècles plus tôt. Son coup de génie est de parvenir à sortir du piège de la loi d'addition des vitesses. Comment conserver fixe la vitesse de la lumière lorsqu'elle est émise, par exemple, depuis un train en mouvement ? Pour l'observateur qui se tient sur le quai, faut-il ajouter la vitesse du train à celle de la lumière pour obtenir la vitesse « totale » de la lumière ? Einstein répond non et en déduit l'inconcevable : la vitesse de la lumière reste fixe à 300 000 km par seconde car, dans le train, le temps ne passe pas de la même façon que sur le quai, de même que les longueurs y sont différentes. Le physicien ne craint pas d'être le tout premier à affirmer que la façon dont le temps s'écoule ainsi que la taille des objets varient avec la vitesse de déplacement du lieu dans lequel on les mesure.

COURIR NUIT ET JOUR

Le voilà revenu à l'un de ses points de départ : la synchronisation des horloges, problème sur lequel il travaillait au bureau de brevets de Berne. Avec un constat pour le moins surprenant : le temps se dilate avec la vitesse. Plus la vitesse du lieu en mouvement, train, avion ou fusée, se rapproche de la vitesse de la lumière, plus l'horloge qui est à son bord affichera un retard important par rapport à une horloge restée immobile sur Terre. Et Einstein fournit une valeur numérique de ce retard.

Dans publication de juin 1905, il écrit : « Si aux points A et B de K se trouvent des horloges au repos (considérées dans le système au repos) dont la marche est synchrone, et si l'on déplace l'horloge en A avec une vitesse v le

long de la ligne qui la relie à B, les deux horloges ne sont plus synchrones. L'horloge qui a été déplacée de A en B retarde sur celle qui a gardé une position invariable en B de $1/2 t (v/V)^2$ de seconde (à des grandeurs du quatrième ordre et d'un ordre supérieur près), si t est le temps que met l'horloge pour aller de A à B. »

On peut souvent négliger un tel retard à cause de la valeur de la vitesse de la lumière V. Lorsque v est faible, le rapport $(v/V)^2$ reste infinitésimal et le retard est négligeable. Dans son ouvrage *Si Einstein m'était conté*, Thibault Damour se livre à un calcul permettant d'évaluer la dilatation du temps à des vitesses humaines : « Courir nuit et jour pendant 75 ans à la vitesse d'un maratho-

nien permet de « gagner » seulement un tiers de microseconde. » Einstein lui-même, en 1911, imagine d'enfermer un organisme vivant dans une boîte en mouvement à une vitesse proche de celle de la lumière. A son retour sur Terre, l'organisme aurait à peine vieilli. Le physicien français Paul Langevin a illustré ce propos en imaginant le paradoxe des jumeaux. Un homme propulsé dans un boulet de canon, comme l'imaginait Jules Verne, reviendrait sur Terre beaucoup plus jeune que son jumeau resté sédentaire. Le paradoxe fonctionne encore mieux avec une fusée. Tout le problème est d'obtenir une vitesse assez grande ou une durée de voyage assez longue pour que le « retard »

du voyageur devienne significatif. Thibault Damour note que lorsque la vitesse atteint 86,6 % de celle de la lumière, soit 260 000 km/s, le temps semble s'écouler deux fois moins vite.

Toute la difficulté de compréhension réside dans le fait que, pour l'occupant de la fusée, le temps s'écoule de la même façon que sur Terre. Ainsi, son pouls bat à la même cadence. Pourtant, dans l'engin spatial en mouvement, il passe un nombre d'années inférieur à celui que vivent les Terriens pendant la même « durée ». Il n'est donc plus jeune que parce qu'il a moins vécu.

Michel Alberganti

E=mc² : l'équivalence entre masse et énergie

Si Henri Poincaré était proche de la découverte de la théorie de la relativité restreinte, il était encore plus près de celle de l'équivalence entre la masse et l'énergie. En fait, dans un calcul réalisé en 1900, il a effectivement mis le doigt sur la célèbre formule : $E = mc^2$. Le mathématicien français utilise l'image d'un canon à énergie électromagnétique qui envoie un rayonnement dans une direction et subit, de ce fait, un recul. Dans le calcul, Poincaré utilise implicitement la relation entre masse et énergie sans la citer. « On pourrait également vendre des tee-shirts représentant le recul d'un canon envoyant de la lumière, Poincaré à son bureau et, bien sûr, en lettres rouges, la formule magique ! », écrit Jean-Claude Boudenot dans son ouvrage *Comment Einstein a changé le monde*. Poincaré note, en conclusion de son calcul, que l'énergie de recul de son canon à lumière est bien trop faible pour être détectée par l'expérience. Un effet du carré de la vitesse de la lumière.

Pendant l'été 1905, après avoir posté son article sur la relativité restreinte, Albert Einstein écrit à son ami Konrad Habicht : « Le principe de relativité associé aux équations fondamentales de Maxwell a en effet pour conséquence que la masse est une mesure de l'énergie qui est contenue dans le corps. » Fin septembre, comme le relate Jean-Claude Boudenot, Einstein adresse à la revue *Annalen der Physik* un nouvel article extrêmement court, sorte d'addendum à celui de juin, sous le titre : « L'inertie d'un corps

dépend-elle de sa capacité d'énergie ? » Il y écrit : « Si un corps subit une perte d'énergie L sous forme de radiation, sa masse diminue de L/c^2 . » Beaucoup plus explicite que chez Poincaré, l'équation mythique n'a pas encore sa forme finale. En mai 1907, il précise : « Par rapport à l'inertie, une masse m est équivalente à une énergie mc^2 . Ce résultat revêt une importance extraordinaire... »

Reste à vérifier la formule. Einstein mise sur les phénomènes radioactifs découverts par Pierre et Marie Curie avant 1900. Par chance, les travaux sur l'atome progressent rapidement à partir de la découverte du noyau en 1911 par Ernest Rutherford. Mais il faut attendre 1932 et l'expérience de John Cockcroft et Ernest Walton (tous deux Prix Nobel en 1951) pour une mise en évidence de l'équivalence entre masse et énergie grâce au bombardement d'atomes de lithium avec des protons produisant des particules alpha. La même année, James Chadwick (Prix Nobel en 1935) découvre le neutron, et, en 1938, Otto Hahn (Prix Nobel 1944) et Fritz Strassman réalisent la première fission nucléaire. Le Manhattan Project est créé en juin 1942, et Enrico Fermi (Prix Nobel 1938) réalise, en décembre, la première « pile atomique » qui dégage un demi-watt. Le 6 août 1945, quarante ans après la publication d'Einstein, explose la première bombe atomique, dont l'énergie dissipée est l'équivalent... d'un gramme de matière.

M. Al.

LA LAME DE FOND D'UNE ESPÈCE DE REJET DE LA SCIENCE

THIBAUT DAMOUR, physicien, professeur permanent à l'Institut des hautes études scientifiques (IHES)

En tant que spécialiste de la relativité générale, comment expliquez-vous que, cent ans après les premières publications d'Albert Einstein, la relativité conserve sa réputation de domaine réservé à quelques cerveaux dans le monde ?

Lorsque j'ai passé le bac, en 1968, une initiation à la relativité faisait partie des manuels de physique de terminale. C'était en fin d'ouvrage et on y parlait d'Einstein, ce qui pouvait donner aux élèves le désir d'en savoir plus. Dans les années 1980, un gros effort de renouvellement a été effectué avec une partie intitulée : « Initiation à la science moderne » et comprenant physique des particules, physique quantique et relativité. Mais ensuite, de nouvelles directives ont allégé les programmes et le

résultat, en l'an 2000, c'est que l'on n'enseigne plus que la physique du XVII^e siècle, celle de Newton, et l'apparition d'Einstein en terminale S est limitée à des considérations caricaturales et, surtout, sans enseignement de la relativité restreinte...

Pour vous, à quel moment du cursus scolaire la relativité restreinte pourrait-elle être enseignée ?

Au moins en terminale. Lorsqu'on enseigne la loi de la dynamique qui dit qu'à une force est associée une accélération, ce n'est pas difficile de prolonger en précisant que cette loi fonctionne pour les voitures mais qu'au-delà, pour des vitesses supérieures, c'est différent. Dans les années 1980, la relativité appliquée aux collisions de particules était enseignée.

L'absence d'initiation en terminale explique-t-elle la méconnaissance actuelle de la relativité ?

C'est un facteur. Derrière ce facteur, je pense qu'il y a une lame de fond métaphysique d'une espèce de rejet de la science. Les gens amalgament les peurs comme celles des OGM ou du CO₂ avec la science au sens de ce que faisaient Einstein, Dirac ou Heisenberg. Cette science est, pour moi, une des pointes de l'intellectualité humaine et de la justification de notre vie en tant qu'êtres sur Terre. La vie n'est pas faite uniquement d'économie et de divertissement. Ce qui justifie que l'homme existe dans l'Univers, c'est qu'il lève la tête vers les étoiles et qu'il essaie de comprendre en utilisant les moyens dont il dispose,

c'est-à-dire son cerveau. Et ça marche ! Depuis deux mille ans, depuis la découverte de la rationalité par les Grecs, la science est un succès pour la société. Je constate qu'elle devrait faire partie de la culture



Thibault Damour.

humaine, que c'est quelque chose d'enthousiasmant. En tout cas, pour moi, c'est toute ma vie. Sans m'empêcher de poursuivre une recherche philosophique et métaphysique à côté de la science qui ne résout pas tous ces problèmes.

Estimez-vous que les scientifiques sont mal considérés ?

Ce qui est considéré comme l'intelligentsia, la culture, c'est le côté « humanités ». N'importe quel philosophe de troisième ordre est considéré comme une lumière de l'esprit alors que les plus grands scientifiques français ou mondiaux n'existent pratiquement pas dans notre société.

Etait-ce déjà le cas du temps des travaux d'Einstein ?

En 1922, sa visite à Paris est frappante. Tous les journaux en parlent. Les grands philosophes, comme Henri Bergson, viennent discuter avec Einstein. La science, alors, faisait partie de la culture. On se dit que la relativité apporte des choses entièrement nouvelles sur

le temps, concept fondamental de présence de l'homme à la réalité.

A l'époque, cet intérêt pour la science n'était-il pas réservé à une élite ?

Certainement, mais il touchait l'ensemble des hautes couches de la société. Or aujourd'hui, on constate qu'un concept comme le paradoxe des jumeaux est très mal connu alors que personne ne devrait sortir de terminale, quelle que soit la filière, sans l'avoir compris. Par comparaison, si l'on considère le programme de terminale de 1912, dans la filière philo, on constate qu'il est fait mention, en physique, de découverte sur la radioactivité datant de 1902, soit dix ans auparavant seulement. Malgré l'absence de compréhension du phénomène à l'époque, il se trouvait dans le programme de philo... Aujourd'hui, le décalage dépasse les cent ans. C'est cela qui est effrayant.

Propos recueillis par M. Al.

La démonstration de la réalité tangible du modèle atomique

SEPT PARTICULES SOUMISES À UN GAZ DE PARTICULES



En 1905, Albert Einstein établit que les mouvements irréguliers des particules en suspension dans un liquide sont engendrés par les collisions aléatoires avec les molécules du liquide. Jean-François Colonna, chercheur à France Telecom et au Centre de mathématiques appliquées de l'École polytechnique, a réalisé une simulation...

... de ces mouvements pour sept particules P initialement au repos et plongées dans un gaz de particules GP. Dans la figure 1, la masse des particules du gaz est cent fois supérieure à celle des particules P. Dans la figure 2, la masse des 7 particules P est dix fois supérieure à celle des particules du gaz. On constate que plus le rapport de masse est élevé, plus le mouvement est restreint.

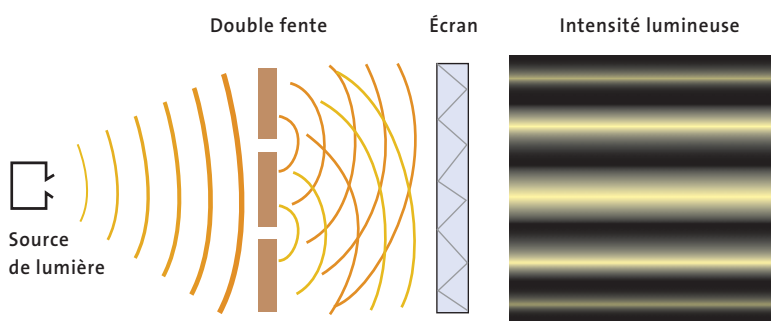


Photos : Jean-François Colonna

Simulation du mouvement brownien.

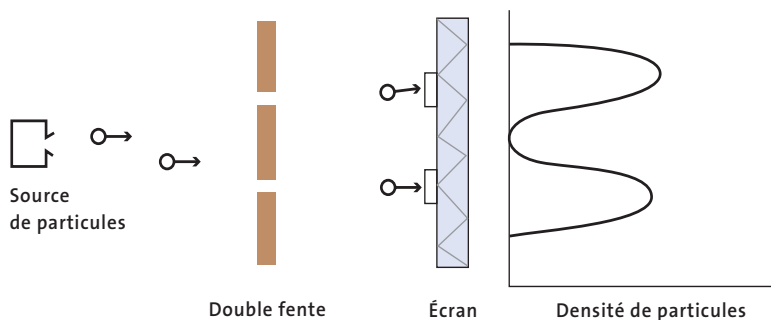
EXPÉRIENCE DE THOMAS YOUNG (1773-1829)

ONDULATOIRE



Une source de lumière éclaire une paroi ouverte en deux endroits. Au-delà de ces deux fentes, la lumière est recueillie sur un écran. Des franges sombres et brillantes apparaissent en alternance. Pour les physiciens du XIX^e et du début du XX^e siècle, cette figure d'interférence implique la nature ondulatoire de la lumière.

CORPUSCULAIRE



Dans le même schéma expérimental, on remplace la source de lumière par une source de petites particules. Sur l'écran, aucun signe d'interférences n'apparaît. Cet argument a été utilisé par les physiciens pour rejeter la quantification de la lumière proposée par Albert Einstein en 1905. En réalité, les quanta de lumière d'Einstein ne sont pas contradictoires avec une vision ondulatoire.

Au XIX^e siècle, la nature ondulatoire de la lumière est démontrée. Avec les quanta lumineux, Einstein révolutionne cette vision univoque.

MÉCONNUE, LA PUBLICATION DE MAI 1905 SUR LE MOUVEMENT BROWNIEN EST TOUTEFOIS IMPORTANTE

Le philosophe et géomètre grec Démocrite l'avait bien pressenti, au V^e siècle avant l'ère chrétienne : la matière est discontinue, formée d'objets élémentaires, les atomes. Il fallut cependant attendre près de 2 500 ans pour que l'idée de Démocrite soit validée. En mai 1905, Albert Einstein publie dans la revue *Annalen der Physik* un article intitulé « Sur le mouvement de particules en suspension dans un fluide au repos impliqué par la théorie cinétique de la chaleur », donnant à l'atome une réalité tangible. Au début du XX^e siècle, les « énergétistes », et notamment le chimiste allemand Wilhelm Ostwald, demeurent convaincus que l'atome n'est qu'un artefact théorique, sans la moindre réalité tangible.

L'article d'Einstein, pourtant important, est la moins fameuse des trois grandes contributions de 1905. La démonstration menée par le grand physicien d'origine allemande n'introduit pas de révolution conceptuelle à la mesure de celles qui ont résulté de la publication sur la quantification de la lumière ou de celle sur l'électrodynamique des corps en mouvement. Einstein s'appuie au contraire largement sur les notions de thermodynamique introduites par Boltzmann et sur les travaux de Maxwell. Le travail d'Einstein établissant la réalité matérielle du modèle atomique reçoit, d'ailleurs, un accueil globalement favorable dans la communauté scientifique, ce qui n'a pas été le cas, deux mois plus tôt, lorsqu'il publie son travail sur les quanta lumineux.

Pour aboutir à son résultat, Einstein étudie le mouvement de particules en suspension dans un fluide. Ce mouvement – dit brownien, du nom du botaniste britannique Robert Brown, qui fut, en 1828, le premier à le décrire – est celui des petites particules macroscopiques (pollens, poussières, etc.) en suspension. Observés au microscope, ces mouvements sont incessants, anarchiques et semblent a priori rétifs à toute tentative de modélisation simple. Au tout début du XX^e siècle, le mouvement brownien est l'objet d'interrogations dans la communauté scientifique. Les physiciens ont déjà remarqué que les particules en suspension s'agitent d'autant plus vite que la

température de leur milieu est élevée. Plusieurs physiciens voient d'ailleurs dans ce phénomène une violation des principes de la thermodynamique établis au milieu du XIX^e siècle.

Einstein part du principe que découvrir les lois qui gouvernent ce mouvement brownien peut conduire à obtenir des informations sur les plus petits composants de la matière. Et il formule l'hypothèse que le mouvement brownien d'une particule est dû aux intenses bombardements des molécules plus petites, invisibles au microscope, et dont l'agitation – dite agitation thermique – croît en fonction de la température.

L'agitation d'une particule croît en fonction de la température

Il se penche notamment sur une donnée demeurée ignorée par les physiciens : le « déplacement quadratique moyen » d'une particule en suspension, c'est-à-dire sa fluctuation moyenne autour de sa position de départ en fonction du temps écoulé. Il relie cette grandeur à une autre, le « coefficient de diffusion » des particules, et en déduit une méthode de détermination du nombre d'Avogadro – soit le nombre de molécules ou d'atomes dans une mole, unité alors déjà fréquemment employée par les chimistes. D'autres estimations quantitatives en découlent, et notamment la taille des atomes.

Un scientifique français, Jean Perrin, publie entre 1908 et 1912, notamment dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, des travaux purement expérimentaux confirmant les grandeurs données quelques années plus tôt par Einstein. Ces mises en évidence expérimentales achèveront de convaincre les derniers énergétistes, dont Ostwald, de la réalité du modèle atomique.

S. Fo.

La lumière : onde et corpuscule

EN MARS 1905, DANS UN ARTICLE RÉVOLUTIONNAIRE, EINSTEIN SUPPOSE QUE L'ÉNERGIE LUMINEUSE EST QUANTIFIÉE. IL FONDE AINSI LA THÉORIE QUANTIQUE

La publication en mars 1905, dans *Annalen der Physik*, de l'article intitulé « Sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière » est une révolution. C'est pour cette contribution que le physicien recevra en 1922 (au titre de l'année 1921) le prix Nobel de physique. L'hypothèse que formule Albert Einstein sera le fondement de la mécanique quantique : ces travaux, les premiers publiés par le jeune physicien, laissent déjà entrevoir la nature duale de la lumière, à la fois ondulatoire et corpusculaire. D'ailleurs, Einstein ne s'y trompe pas et sait que son hypothèse est particulièrement iconoclaste. Il parle donc, dans le titre de sa publication, d'un « point de vue heuristique ». C'est-à-dire d'une approche pragmatique visant à expliquer certains phénomènes observés.

Pour expliquer l'effet photoélectrique, Einstein fait l'hypothèse que la lumière est constituée de petits grains transportant chacun une quantité d'énergie proportionnelle à la fréquence de leur rayonnement associé. Au début du XX^e siècle, cet énoncé publié par *Annalen der Physik* est jugé intolérable par l'ensemble des physiciens. Il le demeurera pendant plus de onze ans, jusqu'à ce que le physicien américain Robert Millikan, en cherchant à démontrer de manière expérimentale qu'Einstein a tort, finisse en 1916 par démontrer qu'il avait raison. Millikan dira que la confirmation expérimentale de l'hypothèse d'Einstein est « indiscutable », bien qu'elle soit « déraisonnable » et qu'« elle semble contredire tout ce que les physiciens savent des interférences lumineuses ».

Pourquoi une telle défiance de l'ensemble du monde scientifique ? Parce que les travaux du jeune physicien allemand remettent en cause un principe bien établi par l'expérience depuis le milieu du XIX^e siècle : la lumière est une onde. Elle n'est pas, comme le pensait Isaac Newton, dans sa vision balistique de l'optique, constituée de petits projectiles. Pour preuve, la manipulation de Thomas Young. Cel-

le-ci utilise une source lumineuse qui éclaire un écran percé de deux fentes. Au-delà de ces deux orifices, un écran recueille la lumière. Des franges d'interférences – c'est-à-dire des alternances de stries sombres et lumineuses – apparaissent et trahissent la nature irrémédiablement ondulatoire de la lumière, car seules les ondes peuvent ainsi interférer. La lumière ne peut donc pas raisonnablement être corpusculaire. Elle est seulement ondulatoire.

Erreur ! Elle est aussi discontinue, comme la matière, comme les flux électriques. Ce paradoxe profond, cette dualité, Einstein la pressent clairement en mars 1905. L'énergie lumineuse dépend en effet, selon la formulation d'Einstein, de la fréquence de l'onde associée. Quantifiée, cette énergie suppose cependant l'existence d'une unité élémentaire de la lumière qui portera plus tard le nom de photon.

DES « VARIABLES CACHÉES »

Max Planck avait certes franchi un premier pas au tout début du XX^e siècle, dans son interprétation du phénomène dit du « rayonnement du corps noir », en introduisant la constante qui porte son nom et en formulant l'hypothèse que les échanges d'énergie entre lumière et matière se faisaient de manière quantifiée. Mais l'idée que c'est la lumière elle-même qui est granulaire semble par trop iconoclaste.

La théorie quantique, ainsi née en mars 1905, se montrera, de nombreuses années plus tard, d'une prodigieuse efficacité pour expliquer un très grand nombre de phénomènes. Elle a résisté, jusqu'à présent, à toutes les expérimentations qui ont tenté de la mettre en défaut. Mais, de manière assez paradoxale, Einstein, véritable fondateur de cette théorie, ne participera pas réellement à son développement et à sa formalisation ultérieurs, dans les années 1920 et 1930. D'autres physiciens s'en chargeront. Le physicien d'origine allemande entretiendra d'ailleurs, tout au long de sa vie, des relations ambiguës avec sa capricieuse création.

Capricieuse, car, malgré ses succès, elle ne correspond pas à l'image que se fait Einstein de l'ordre des choses. Elle prévoit que le comportement des particules élémentaires ne peut pas être prévu de manière certaine et unique, les composants élémentaires du monde se comportant de manière fondamentalement probabiliste. C'est cette étrange de la physique quantique qui amènera Einstein à prononcer ce mot resté fameux : « Dieu ne joue pas aux dés ! »

Confronté sur ce point au grand physicien danois Niels Bohr, Einstein n'a de cesse de montrer que la théorie quantique, telle qu'elle a été développée depuis sa naissance en mars 1905, est non pas fautive, mais incomplète. Il y manque des paramètres, des « variables cachées ». En 1935, dans la *Physical Review*, le grand physicien publie, avec Nathan Rosen et Boris Podolsky, un article qui doit mettre en déroute la pensée de Bohr. Les trois hommes mettent en évidence un paradoxe qui prouve à coup sûr que la théorie quantique est imparfaite, qu'il y manque un niveau sous-jacent de description. Einstein, Podolsky et Rosen montrent que le formalisme quantique autorise une magie inconcevable. Si deux particules quantiques se heurtent, elles demeurent ensuite irrémédiablement liées. Même distantes de plusieurs milliers de kilomètres, elles se comportent comme un seul et même objet : que la première soit perturbée, et la seconde en subit immédiatement les effets. C'est le paradoxe dit EPR (Einstein, Podolsky, Rosen), dont Einstein estime qu'il est la démonstration des imperfections de la théorie quantique.

En réalité, ce paradoxe n'en est pas un et, en 1982, des chercheurs français mettent en évidence la réalité physique de ce phénomène, dit de l'intrication. Jusqu'à la fin de sa vie, Einstein a donc cru incomplète la théorie qu'il avait contribué à inventer en mars 1905. Sur cet unique point, il avait tort. A moins que l'avenir ne finisse par lui donner raison. Qui sait...

Stéphane Foucart

EINSTEIN - POINCARÉ : LA VAINNE POLÉMIQUE RÉAPPARAÎT

OLIVIER DARRIGOL, directeur de recherche au CNRS

Plusieurs ouvrages ont, récemment, attribué au mathématicien français Henri Poincaré la véritable paternité de la théorie de la relativité restreinte. Cette polémique est-elle nouvelle ?

Ces tentatives révisionnistes sont anciennes. Elles se sont intensifiées avec le centenaire des découvertes d'Einstein, mais elles remontent à une publication du mathématicien et historien britannique Edmund Whittaker, qui, en 1953, dans son *Histoire des théories de l'éther et de l'électricité* – c'est-à-dire du vivant même d'Einstein – nommait la relativité restreinte « théorie de Lorentz-Poincaré », sans citer Einstein du tout. Aujourd'hui, il y a tout un spectre d'interprétations, dont la plus extrême est la théorie d'un complot ourdi par des scientifi-

ques allemands qui auraient utilisé Albert Einstein comme prête-nom. A quels éléments tient cette controverse ?

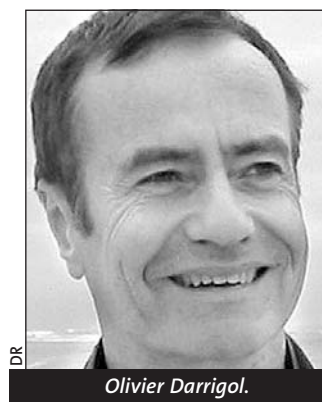
Certains ne voient que la structure mathématique de la théorie. Or Poincaré avait très bien identifié l'appareil mathématique de la relativité restreinte, notamment, le groupe de Lorentz, et cela dès son article de juin 1905, antérieur à celui d'Einstein.

Cependant, attribuer la paternité de la théorie de la relativité restreinte exclusivement à Poincaré relève d'une confusion fondamentale qui consiste à réduire une théorie physique à son cadre mathématique. Alors que l'on sait très bien qu'il y a aussi un cadre conceptuel essentiel et qui est très différent selon que l'on parle des travaux d'Einstein ou de Poincaré.

Qu'est-ce qui distingue les deux approches ?

Dans sa publication de juin 1905, parue dans les comptes rendus de l'Académie des sciences, Poincaré démontre que les équations de Maxwell-Lorentz sont invariantes par le groupe de transformations dites de Lorentz. Poincaré affirme que cette invariance des équations de l'électrodynamique est ce qui permet à cette théorie de satisfaire au postulat de relativité. Il en ressort que les phénomènes mesurables de la physique sont les mêmes, quel que soit le référentiel inertiel. En d'autres termes, si on considère un ensemble de corps qui interagissent, leurs interactions seront les mêmes, que le système soit animé d'un mouvement d'ensemble par rapport à l'éther ou non.

Poincaré va plus loin. Il suggère que toute la physique – et pas seulement l'électrodynamique – est conforme à ce principe de relativité. Cependant, Poincaré conservera jusqu'à la fin de sa vie le



Olivier Darrigol.

concept d'éther. Dans sa vision des choses, il y a un espace et un temps « vrais », liés à un éther fondamentalement immobile. Les espaces et les temps mesurés dans un repère en mouvement ne sont qu'« apparences » liées aux conventions de mesure.

Einstein, pour sa part, rejette l'éther, traite les espaces et les temps mesurés dans divers repères inertiels exactement sur le même pied et montre que leurs relations mutuelles peuvent s'obtenir à l'aide du principe de relativité et du principe de constance de la vitesse de la lumière, indépendamment de toute référence à l'électrodynamique de Lorentz. Il tire de sa formulation originale un nombre important de conséquences physiques dont la plus spectaculaire est la dilatation du temps.

Poincaré n'a pas cette idée qu'une horloge qui a fait le tour de monde à grande vitesse retarde par rapport à une horloge fixe.

Certains accusent Einstein de ne pas avoir suffisamment cité Lorentz dans ses travaux...

Cela n'a pas lieu d'être. D'abord, Einstein cite une fois Lorentz. Ensuite, la façon même d'écrire, dès le début de sa publication « *L'électrodynamique de Maxwell – telle qu'on la conçoit habituellement aujourd'hui* » est une référence implicite, pour le lecteur de l'époque, à Lorentz. Einstein avait une admiration immense pour Lorentz et a reconnu, dans ses écrits autobiographiques, qu'une étape tout à fait radicale et nécessaire dans le passage de la théorie de Maxwell à la relativité, avait été franchie par Lorentz. De toute manière, il est vain de chercher à attribuer la théorie de la relativité à un seul auteur. Les apports de Lorentz, de Poincaré et d'Einstein à cette théorie sont tous trois considérables, même si Einstein est le seul à avoir osé révolutionner les concepts d'espace et de temps.

Propos recueillis par S. Fo.

Le riche héritage des travaux d'Einstein

LE PHYSICIEN
EST À L'ORIGINE
D'UNE MULTITUDE
D'APPLICATIONS
DONT CERTAINES
ONT TRANSFORMÉ
EN PROFONDEUR
LE XX^E SIÈCLE

C'est peu dire qu'Albert Einstein a largement contribué à fonder la physique moderne. C'est également peu dire que ses découvertes ont contribué aux profondes mutations technologiques et industrielles de la seconde moitié du XX^e siècle. Des trois contributions de 1905, deux – la relativité restreinte et la quantification de l'énergie lumineuse – sont porteuses de bouleversements conceptuels majeurs. La première redéfinit les notions d'espace et de temps. La seconde ouvre la voie au développement d'une nouvelle physique, la mécanique quantique, dont le formalisme est stable depuis maintenant près de quatre-vingts ans.

Les choses auraient pu en rester là. Mais les travaux d'Einstein, pourtant toujours très théoriques, ont eu, en cascade, d'innombrables répercussions industrielles. Celles-ci ont découlé des progrès immenses permis par la mécanique quantique et l'invention du laser, dont Einstein pose la première pierre théorique en 1917 avec la théorie de l'émission stimulée. Ces deux instruments, l'un théorique, l'autre expérimental, vont permettre aux physiciens de comprendre la structure fine de la matière comme ils n'avaient jamais espéré le faire. De cette masse de connaissances sont nées la science puis l'industrie des semi-conducteurs. Partant, c'est toute la micro-électronique actuelle issue des premiers microprocesseurs des années 1970, de même que l'informatique et les télécoms actuelles qui sont redevables des avancées d'Einstein.

Le laser lui-même, d'abord utilisé dans les laboratoires pour sonder la matière, refroidir et isoler des atomes, est aujourd'hui au centre de multiples applications industrielles qui génèrent des chiffres d'affaires colossaux. Les héritiers d'Einstein se plaisent à rappeler, car l'exemple a le mérite d'être compris par tout le monde, que les vulgaires lecteurs de disques compacts reposent entièrement sur la maîtrise des diodes lasers. Ces composants électroniques exploitent progressivement une gamme croissante de fréquences : 780 nm pour les CD, 650 nm pour les DVD en attendant les supports de la haute définition, le laser bleu (405 nm). Ce sont toujours les diodes laser que l'on trouve dans les réseaux de communication à haut débit exploitant la fibre optique. On peut donc dire que l'émission stimulée imaginée par Einstein en 1917 a fini par bouleverser l'univers de l'électronique grand public et celui des télécommunications, Internet compris.

L'ORDINATEUR QUANTIQUE

De même, la physique quantique a permis de comprendre et maîtriser la supraconduction à basse température, sur laquelle repose, par exemple, la technologie des grands accélérateurs de particules mais aussi des appareils d'imagerie par résonance magnétique (IRM), très utilisés aujourd'hui en médecine.

Même les contributions à la limite de la philosophie, comme notamment celle, en 1935, du fameux paradoxe de l'intrication quantique, finissent par trouver des applications inattendues. S'il n'a pas vu le jour au XX^e siècle, l'ordinateur quantique sera peut-être celui que l'on célébrera comme la grande révolution de l'informatique lors du bicentenaire de 1905. On soulignera alors qu'il doit son développement à une remarque d'Einstein tendant à démontrer une faiblesse de la mécanique quantique. Ainsi, même lorsqu'il s'est trompé, le physicien a ouvert des champs de recherche qui se sont révélés extrêmement fertiles.

De la même façon, les travaux du physicien, pourtant très fondamentaux, sur la relativité restreinte puis générale vont permettre des réalisations industrielles impor-

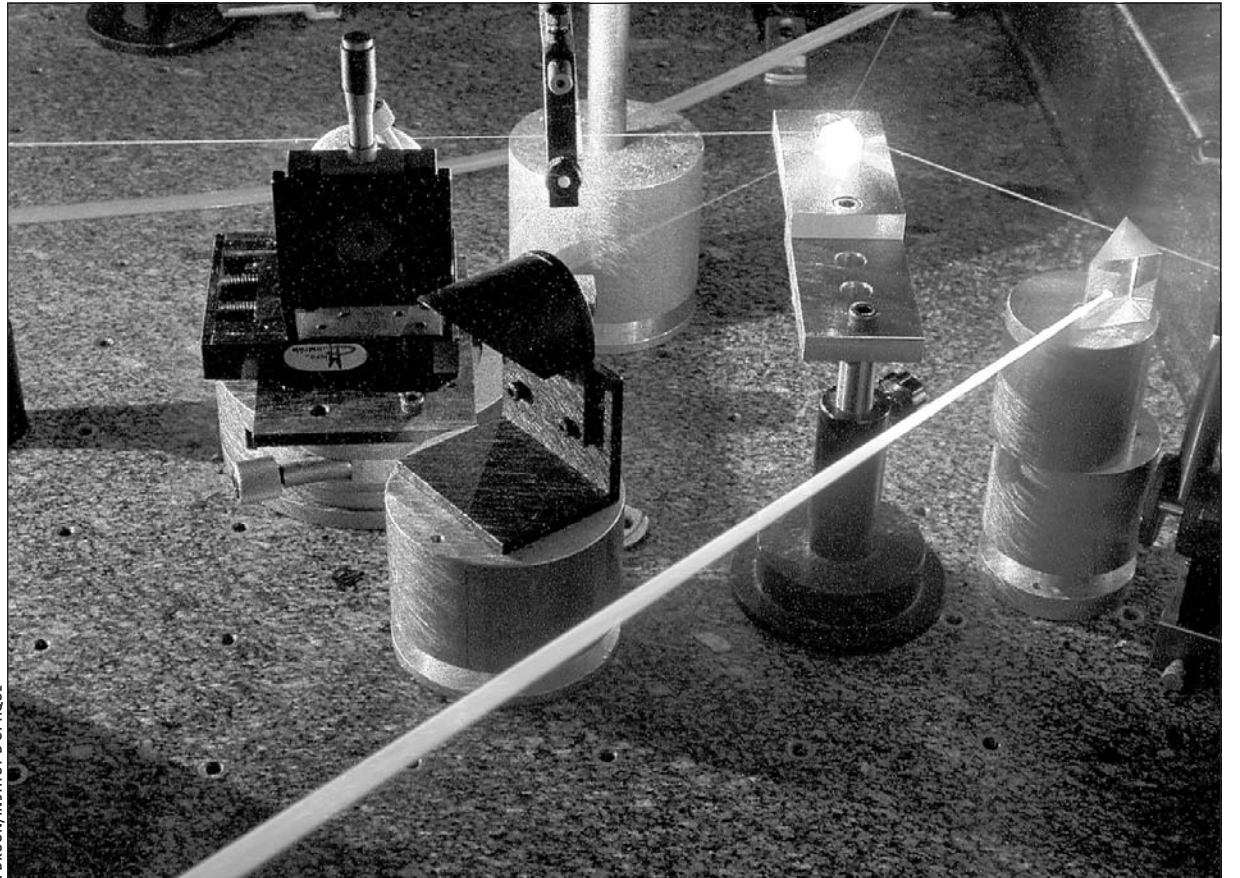
tantes. Outre la cosmologie moderne, qui s'appuie encore largement sur les idées d'Einstein, le GPS (Global Positioning System) intègre ainsi ses principes de dilatation du temps. Sans ces prévisions fondamentales et qui échappent pourtant à l'intuition et au sens commun, la précision du GPS serait si mauvaise que le système dans son ensemble n'aurait pu être mis au point. Lors de sa conception, les militaires américains n'avaient pas jugé nécessaire d'intégrer les corrections relativistes. Les physiciens ont dû leur démontrer que les

valeurs de positionnement fournies par le système devenaient rapidement fausses pour qu'ils se rendent à l'évidence.

Lorsque les chercheurs tentent, souvent avec difficultés dans une période où les résultats à court terme priment souvent parce qu'ils sont plus en phase avec les échéances politiques, de défendre les vertus de la recherche fondamentale, voire des recherches purement théoriques, ils peuvent, à tout coup, faire appel à l'exemple d'Albert Einstein. Paradoxalement, d'ailleurs, le physicien allemand était loin de la réflexion abs-

traite. Il mettait toujours la théorie au service de la résolution de problèmes concrets. C'est sans doute la profondeur de ses analyses qui explique la quantité de richesses, aussi bien en matière de connaissances que de retombées financières, que ses travaux ont engendrées. Une démonstration frappante de la vanité du débat qui tente d'opposer fondamental et appliqué. En réalité, les deux faces d'une même pensée.

Michel Alberganti
et Stéphane Foucart



Le laser, dont le principe a été imaginé par Einstein en 1917, a permis de faire bondir les connaissances de la structure fine de la matière.

L'avenir prometteur de l'information quantique

LA CONCEPTION D'UNE NOUVELLE INFORMATIQUE DEMEURE UN RÊVE MAIS LA CRYPTOGRAPHIE QUANTIQUE SE RAPPROCHE DE L'INDUSTRIE

Lorsque j'ai commencé mes travaux, à la fin des années 1970, jamais je n'aurais pensé qu'ils pourraient avoir un jour la moindre application. Et pour cause. La thèse que soutient le physicien français Alain Aspect en 1983 traite de la « violation des inégalités de Bell », un sujet qui relève autant de la physique que de la philosophie. Pourtant, les étrangetés de la mécanique quantique, qui alimentaient hier les discussions philosophiques, tendent aujourd'hui à se rapprocher de l'industrie. En témoignent les premiers brevets déposés par le groupe optique quantique de l'Institut d'optique d'Orsay (Essonne), aujourd'hui dirigé par Philippe Grangier, sur un protocole de cryptographie quantique qui suscite l'intérêt du groupe de défense Thales.

Au début des années 1980, l'idée d'Alain Aspect est de concevoir une expérience mettant à profit une propriété presque magique de la mécanique quantique : l'intrication des particules. Selon cette bizarrerie de la physique, dès lors que deux particules ont interagi, elles demeurent indéfectiblement liées l'une à l'autre. Perturber la première chamboule instantanément la seconde, même si la distance qui sépare les deux jumelles est importante... Réussie en 1982 par Alain Aspect, Jean Dalibard, Philippe Grangier et Gérard Roger, cette expérience de violation des inégalités de Bell ouvre la voie à un nouveau champ d'activité : l'information quantique.

Ce « traitement quantique de l'information » fait l'objet d'une compétition internationale acharnée. Avec, en ligne de mire, le rêve de concevoir un ordinateur quantique, aux capacités de calcul exponentiellement supérieures à celles d'un ordinateur classique. Cette supériorité tient à un principe simple : la quantité d'informations contenue dans un système de deux particu-

Les étrangetés de la mécanique quantique tendent aujourd'hui à se rapprocher de l'industrie

les intriquées est supérieure à la somme des informations véhiculées dans deux particules indépendantes.

L'effet est considérable. Un calcul de décomposition d'un nombre gigantesque en produit de facteurs premiers, qui prendrait quinze milliards d'années à un ordinateur classique actuel, ne prendrait qu'à peine un an à un ordinateur quantique formé de 100 000 atomes corrélés. On en est très loin. Des chercheurs américains sont parvenus, fin 2001, à factoriser le nombre 15 (15 = 3 x 5) grâce à sept bits quantiques (ou q-bits). A l'Insti-

tut d'optique d'Orsay, Philippe Grangier et son équipe travaillent à l'élaboration de pièges optiques microscopiques capables d'attraper des atomes un par un et « de les "tenir" au bout d'un faisceau laser », explique M. Grangier. « Ce que l'on essaie de faire aujourd'hui, c'est notamment de faire émettre à deux atomes ainsi isolés des photons que l'on fait interférer », poursuit M. Grangier. Le résultat est que les deux atomes se retrouveront corrélés quantiquement. Les premières briques d'un ordinateur quantique seraient ainsi posées. Cependant, prévient M. Grangier, « il est impossible de dire que dans tant de mois ou d'années, nous arriverons à tel résultat. Ce type de recherches est très exploratoire : nous suivons une direction générale, mais nous ne connaissons pas précisément la destination ».

Le traitement quantique de l'information fournit cependant, depuis peu, ses premières applications industrielles. Dans le domaine du cryptage des télécommunications, plusieurs équipes de chercheurs sont ainsi récemment parvenues à garantir l'échange sécurisé de clés cryptographiques grâce à un principe bien connu de la théorie quantique : le principe d'incertitude. Selon cette loi fondamentale, il n'est pas possible d'observer une particule (un photon, par exemple) sans la perturber. En mettant à profit ce principe, il est possible de garantir qu'une fibre optique, par exemple, n'est pas « écoutée ».

Comment ? Charles Benett et Gilles Brassard ont ima-

giné en 1984 un protocole de distribution quantique de clés de cryptage dont l'invulnérabilité est garantie par le principe d'incertitude. Dans ce protocole, l'émetteur adresse au destinataire une série de photons envoyés un par un. Chacun de ces grains de lumière est dans un état de polarisation connu par l'expéditeur. Le destinataire mesure la polarisation de chaque photon reçu et communique ensuite à son correspondant le résultat d'une partie de ses mesures, qui sont ainsi utilisées pour « tester » la ligne de transmission. Par exemple, le premier photon a été reçu dans tel état, le second dans tel autre, etc. Si ces mesures sont conformes à ce qui a été envoyé, la fibre optique est sûre. Sinon, elle est espionnée : toute mesure – ou écoute – perturbe irrémédiablement les particules et change leur état...

Cantonée aux laboratoires, la cryptographie quantique est en passe d'en sortir, grâce notamment à des travaux menés à Orsay et publiés en 2003 dans la revue *Nature*. Au lieu d'appliquer les principes de cette nouvelle cryptographie à des photons uniques, l'équipe de M. Grangier est parvenue à la mettre en œuvre sur des paquets de photons. Le résultat est que désormais, comme l'explique M. Grangier, « de tels systèmes cryptographiques peuvent être plus facilement mis en œuvre en utilisant uniquement des composants usuels utilisés par les opérateurs de télécoms ».

S. Fo.

LA « MAGIE » DE L'INTRICATION

ALAIN ASPECT, directeur de recherche (CNRS) à l'Institut d'optique, membre de l'Académie des sciences

Qu'est-ce que l'intrication ?

En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky et Nathan Rosen démontrent que la mécanique quantique autorise la situation suivante. Deux particules, après avoir interagi, s'éloignent l'une de l'autre. Lorsqu'elles sont suffisamment éloignées, on effectue une mesure sur chacune d'elles et on se rend compte que les résultats de ces mesures sont corrélés. Qu'entend-on par corrélation ? Fabriquons deux pièces de monnaie à Paris. L'une est envoyée à Lille, l'autre à Bordeaux. Avec ces deux pièces de monnaie, on joue à pile ou face. Et on réalise que, pour chaque tirage, les résultats à Lille et à Bordeaux sont toujours identiques.

Dans les deux cas, on a pourtant deux possibilités : obtenir pile ou face. Mais tout se passe comme si

le premier tirage effectué déterminait le deuxième, bien que les deux pièces de monnaie, éloignées, n'aient aucun moyen d'échanger de l'information.

Avec des particules dites intriquées, deux photons par exemple, c'est un peu la même chose. Schématiquement : si on mesure la polarisation du photon envoyé à Lille, on trouve un résultat de mesure identique à Bordeaux. Comme avec le jeu du pile ou face, il y a autant de chances que le premier et le second photon soient polarisés « pile » ou « face » (les spécialistes disent « parallèle » ou « perpendiculaire »). Mais lorsque, par exemple, la polarisation du premier est mesurée « pile », celle du second l'est aussi...

Comment Einstein a-t-il interprété ce résultat ?

En supposant que la théorie quantique était incomplète et qu'il existait des « variables cachées ». On peut reprendre l'exemple des pièces de monnaie : Einstein pensait en quelque sorte que, puisque les deux pièces avaient été fabriquées ensemble, un vice de fabrication avait pu être subrepticement introduit. Par exemple, chaque paire de pièces pourrait avoir deux côtés pile ou deux côtés face. On aurait ainsi l'impression que le tirage d'une pièce influe sur sa jumelle, mais cette impression ne serait qu'un leurre, les deux objets étant identiquement truqués !

Cette explication est a priori convaincante, mais elle oblige à considérer deux types différents de paires – les « pile-pile » et les « face-face », alors que pour le formalisme quantique, toutes les paires

sont identiques. Einstein s'appuie donc sur l'intrication pour conclure que la physique quantique ne décrit le monde que de façon incomplète.

A l'époque, cette idée fait-elle l'objet d'un consensus ?



Alain Aspect.

Non. Albert Einstein s'opposera sur ce point à Niels Bohr pendant de nombreuses années. Mais c'est un débat d'ordre philosophique, qui intéresse peu les physiciens. Ces derniers utilisent la physique quantique de manière pragmatique, avec succès puisqu'ils vont y trouver la clef de la structure de la matière, et la source d'inventions comme le transistor et le laser. Ils s'occupent peu des débats philosophiques entre Bohr et Einstein. En 1965, apparaît un nouveau personnage : John Bell. Ce chercheur irlandais démontre, de façon inattendue, l'incompatibilité quantitative entre l'interprétation d'Einstein et les corrélations prévues par la mécanique quantique.

La vision d'Einstein explique certaines corrélations, mais pas toutes... Si Einstein a raison, dit John Bell, alors les corrélations entre deux photons jumeaux ont une limite supérieure, déterminée par les inégalités de Bell.

De quand datent les premiers travaux visant à trancher entre la vision d'Einstein et celle de Bohr ?

Les premières expériences sont menées aux Etats-Unis dans la première moitié des années 1970 et donnent une première tendance en faveur de la mécanique quantique, contre la vision d'Einstein. Au début des années 1980, avec Jean Dalibard, Philippe Grangier et Gérard Roger, nous avons utilisé les progrès techniques, et notamment les lasers, pour construire une source de photons intriqués et faire des mesures très précises dans des conditions très proches de l'expérience de pensée à la base des discussions théoriques.

Les résultats de ces expériences violent clairement les inégalités de Bell, c'est-à-dire qu'elles invalident la vision d'Einstein. Cela a contribué à attirer l'attention des physiciens sur l'intrication – qui est un des concepts les plus révolutionnaires de la théorie quantique – et a, de façon inattendue, ouvert la voie à un nouveau domaine de recherche : l'information quantique.

Propos recueillis par S. Fo.

EINSTEIN

LA PHYSIQUE D'AUJOURD'HUI

La dualité onde-corpuscule pour moduler la couleur des lasers

A L'OFFICE NATIONAL D'ÉTUDES ET DE RECHERCHES AÉROSPATIALES (ONERA)



Le satellite Planck cartographie les fluctuations du rayonnement cosmologique de fond.

De la relativité aux origines de l'univers

À L'OBSERVATOIRE DE PARIS, FRANÇOIS BOUCHET SE NOURRIT TOUJOURS DES INTUITIONS D'EINSTEIN

Le bureau de François Bouchet est éclairé par de larges fenêtres qui ouvrent sur la coupole de l'Observatoire de Paris, témoin d'une astronomie d'un autre siècle. Mais le sourire du directeur de recherche au CNRS s'illumine surtout de la clarté qui baigne aujourd'hui la cosmologie. Les astronomes ont longtemps usé de leur lunette sans savoir qu'en observant le lointain, ils fouillaient aussi le passé. A l'Institut d'astrophysique de Paris (IAP), François Bouchet étudie « les propriétés globales de l'Univers » grâce à l'imbriication de ses deux piliers : la cosmogonie, qui « rend compte de l'émergence des grandes structures de l'Univers, de la sculpture progressive de l'espace » et la cosmographie, qui « précise la structure géométrique de l'espace-temps, le modèle d'ensemble », selon les définitions qu'il fixe dans sa contribution au savant ouvrage collectif *Einstein aujourd'hui* (CNRS édition/EDP sciences, 422 pages, 39 euros). Cette interaction féconde entre l'histoire et la géométrie, cette « alliance entre le théâtre et la pièce » qui lui a permis de progresser si rapidement en un siècle, la cosmologie moderne la doit à celui qui l'a mise debout en lui fournissant son principal appui : Albert Einstein et sa relativité générale.

En langage scientifique, l'enthousiasme s'énonce toutefois à mots pesés : « Nous disposons d'une théorie qui tient la route, dont rien ne laisse penser qu'elle doit être mise en doute aux échelles où elle est appliquée », constate sobrement le chercheur. « Nous ne travaillons plus dans un mode botaniste, où l'on ramasserait des spécimens sans trop savoir à quoi les rattacher, dit François Bouchet. Nous connaissons les grandes lignes d'un modèle dont il faut encore combler les trous. Et là, nous pouvons encore avoir d'énormes surprises. »

LA THÉORIE DES CORDES

De cette accélération de l'histoire de la connaissance de l'Univers, à partir du début du XX^e siècle, Einstein n'a toutefois été que le « facilitateur ». « Je le comparerais à Moïse, risque le chercheur, il a accompagné les cosmologistes jusqu'au bord de leurs découvertes, mais il ne s'est pas avancé lui-même en Terre promise. » D'autres ont coulé leurs géniales intuitions dans les cadres de la relativité générale. Ce furent, par exemple, le chanoine Georges Lemaître et Alexandre Friedmann, à l'origine de la notion de Big Bang, Edwin Hubble et son postulat d'un Univers en expansion, ou George Gamow

et sa prédiction d'un rayonnement fossile, témoin de l'état du cosmos âgé seulement de 380 000 ans.

La déflexion de la lumière par la gravitation, prévue par la relativité, a permis aux astronomes d'utiliser les corps célestes comme des lentilles. Einstein avait aussi pressenti l'existence d'ondes gravitationnelles, récemment démontrée, ou postulé, avant de la renier, une constante cosmologique, force opposée à la gravitation, récemment réintroduite en cosmologie pour expliquer l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Toutes ces idées ont été fertilisées par l'essor des techniques d'observation. Co-responsable du programme qui doit conduire au lancement, en 2007, par l'Agence spatiale européenne (ESA) du satellite Planck, chargé de cartographier les fluctuations du rayonnement cosmologique de fond (RCF), prédit par Gamow, François Bouchet demeure ébloui par la précision atteinte. « Nous mesurons aujourd'hui des fluctuations de température de l'ordre du cent milliardième de degré », cette « précision farouche » a permis de hisser la relativité aux échelles cosmologiques, sans commune mesure avec celles du système solaire. Résistera-t-elle encore longtemps à cette dilata-tion de son champ d'action ?

« Avec nos instruments, nous cherchons sans cesse à mettre le modèle en danger, à lui trouver des failles, explique le scientifique. Et l'on sent bien que la relativité générale ne décrit pas tout. Peut-être arrivons-nous à ses limites. La cosmologie me semble, en tout cas, l'une des disciplines les mieux placées pour les dépasser. » Peut-être les chercheurs devront-ils se tourner vers d'autres conceptions de la physique, non encore validées, telles que la théorie des cordes. En attendant, François Bouchet veut prolonger l'exploration de la « voie royale » des fluctuations du RCF : « C'est fou, s'étonne-t-il, nous tenons là des traces directes qui nous permettent d'évaluer les principaux paramètres cosmologiques. » Dans ce domaine, ses rêves demeurent encore einsteiniens. Le chercheur anime déjà des réflexions pour concevoir, après Planck, un appareil d'observation capable de discerner d'éventuelles ondes gravitationnelles émises autour du Big Bang et qui auraient pu laisser leur empreinte dans le RCF. Une ultime démonstration, aux limites de l'Univers, de la justesse des intuitions du physicien.

Jérôme Fenoglio

deux pas de l'Ecole polytechnique, le centre de recherche de l'Onera à Palaiseau (Essonne) ne paye pas de mine. Pourtant, au sein de ces laboratoires plus réputés pour les essais en soufflerie que pour la recherche fondamentale, ingénieurs et scientifiques manipulent les lasers avec autant de virtuosité que d'enthousiasme. Emmanuel Rosencher, directeur de la branche physique de l'Onera, ne cache pas sa fierté devant l'une de ses dernières réalisations : un oscillateur quantique permettant de faire varier à l'infini la couleur des lasers.

« C'est un composant qui met en scène la dualité onde-corpuscule et dont on ne peut pas comprendre le fonctionnement sans recourir à cette notion », explique-t-il. L'appareil se compose d'un simple cristal de niobate de lithium sur lequel vient frapper un rayon laser. A l'intérieur, le flux de photons se sépare en deux, ce qui revient à scinder chaque photon, et au final on récupère deux ondes... En faisant simplement varier la température du cristal ou l'orientation du laser à l'entrée, on module la fréquence du laser à la sortie suivant une gamme de couleurs correspondant à celle d'une centaine de sources lasers classiques différentes. Le phénomène est engendré par l'utilisation d'un cristal très anisotrope dont les atomes ont des tailles très différentes.

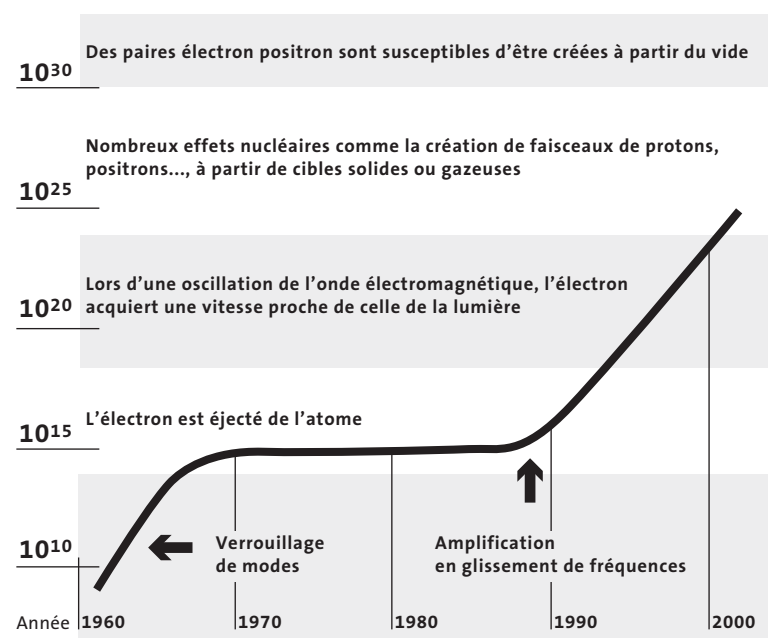
Le résultat peut se traduire sous la forme d'un appareil de petite taille, véritable variateur de lumière laser. « Nous pensons à des applications dans l'analyse des gaz polluants, qu'il s'agisse de dioxyde d'azote ou de dioxyde de soufre, par exemple, indique Emmanuel Rosencher. Mais également à la protection des avions contre les missiles guidés par infrarouge. » Dans les deux cas, les marchés potentiels sont énormes. Le coût du cristal, environ 1 000 euros pièce aujourd'hui, devrait baisser en cas de mise en production, et l'Onera envisage la création d'une entreprise pour commercialiser son invention. Car l'originalité du centre de recherche réside sans doute dans sa double nature. Ses travaux s'appuient directement sur des recherches fondamentales avec une vocation éminemment pratique. L'Onera travaille pour des secteurs (aéronautique, espace, armée), dont les préoccupations dépassent les purs progrès de la connaissance humaine.

CINQ ORDRES DE GRANDEUR

Cela n'empêche pas Emmanuel Rosencher de rêver à la réalisation d'une sorte de bombe atomique à l'envers. « La puissance des lasers a fortement augmenté depuis son invention, dans les années 1960, souligne-t-il. Si l'on considère l'éclairage du soleil sur Terre, soit 1 kW/m², les lasers délivrent aujourd'hui une puissance 1 021 fois supérieure... » Le secret de la délivrance de telles énergies réside dans la brièveté des impulsions. « Aujourd'hui, les nanosecondes sont devenues complètement ringardes, il faut parler de femtoseconde (10⁻¹⁵ secondes) et, mieux, en attoseconde (10⁻¹⁸ secondes) », explique Emmanuel Rosencher, qui note que les impulsions laser deviennent plus brèves que le temps nécessaire à un électron pour faire le tour du noyau d'un atome.

Pour parvenir à des durées d'impulsion aussi brèves, les physiciens font appel à des variations de la phase des photons. Les applications sont de deux ordres. D'abord l'exploration de phénomènes physiques très courts comme la relaxation des protéines analysée à l'Ecole polytechnique. Ensuite la puissance. « Depuis cinq ou six ans, on

LA CROISSANCE VERTIGINEUSE DE LA PUISSANCE DES LASERS

Intensité lumineuse focalisée (W/cm²)

Source : Onera/Ecole polytechnique

Puissance maximale obtenue au foyer d'un laser en fonction de l'année.

est capable de produire des sources d'électrons ultrarelativistes sur des distances de l'ordre du mm. » En effet, aux intensités maximales actuelles sont associés des champs électriques extrêmement forts de l'ordre de 1 000 milliards de volts par cm. « Avec cela, on peut enlever tous les électrons d'un atome... », déclare avec gourmandise Emmanuel Rosencher. Des applications thérapeutiques sont en ligne de mire grâce à des sources de proton construites avec des lasers. De même, on envisage de remplacer les grands accélérateurs de particules par des lasers multi-teravolts. Enfin, la fusion thermonucléaire va bénéficier de tous les travaux sur les faisceaux ultra-intenses.

Mais la perspective la plus extraordinaire réside sans doute dans la création de matière à partir du vide. « C'est extrêmement simple ! lance Emmanuel Rosencher. Imaginez un noyau. Son énergie, c'est $E = mc^2$. Si vous arrivez à concentrer dans le vide une énergie E dans le volume occupé par ce noyau, c'est gagné ! Pour créer une paire électron-positron, il faut 2 mégaélectron-volts (MeV). Si vous réussissez à concentrer cette énergie dans un volume assez faible, vous allez créer de la matière à partir du vide ! C'est prévu par la théorie de la relativité. » D'où viendra cette matière surgie de nulle part ? De son équivalence avec de l'énergie. Alors que le XX^e siècle a été marqué par la bombe atomique, démonstration dévastatrice de $E = mc^2$, on rêve d'une expérience inverse, sorte de passage à l'envers du film d'une explosion dans lequel le monstueux champignon rentrerait dans sa matrice : le noyau de l'atome.

« On a encore cinq ordres de grandeur à gagner dans la puissance du laser. Mais on va y arriver ! assure Emmanuel Rosencher. Dès lors que l'on aura réduit la zone de focalisation et augmenté la puissance pour parvenir à ces deux MeV, le rayon laser doit créer, normalement, du moins on le pense parce que l'on n'en a pas de preuve, une paire électron-positron. » Cette perspective « extraordinaire » est aujourd'hui à portée.

Cinq ordres de grandeur... « Regardez la pente de la courbe. On a déjà fait entre la moitié du chemin depuis l'invention de la compression d'impulsion. » Mais suffira-t-il d'inverser la formule d'Einstein ? La nature de matière se prête-t-elle à un tel renversement ? Le XXI^e siècle sera-t-il celui de l'anti-bombe atomique ? Emmanuel Rosencher n'ose répondre à la question, mais ce dont il est certain, c'est que, si l'on y parvient, ce sera grâce à l'incroyable puissance des lasers.

Michel Alberganti

10 LIVRES

- *Demain, la physique*, ouvrage collectif sous la direction d'Edouard Brézin. Odile Jacob, 377 p., 24 €.
- *Si Einstein m'était conté*, de Thibault Damour. Le Cherche Midi, 248 p., 17 €.
- *Il était sept fois la révolution, Albert Einstein et les autres...*, d'Etienne Klein. Flammarion, 240 p., 19 €.
- *Comment Einstein a changé le monde*, de Jean-Claude Boudenot. EDP Sciences, 190 p., 13 €.
- *Au-delà de l'espace et du temps*, de Marc Lachièze-Rey. Le Pommier, 360 p., 24 €.
- *Einstein/Gödel, quand deux génies refont le monde*, de Palle Yourgrau. Ed. Dunod, 292 p., 25 €.
- *Einstein et le conflit des générations*, de Lexis S. Feuer. Ed. Complexe, 380 p., 24,90 €.
- *Einstein aujourd'hui, coordonné par Michel Le Bellac*. CNRS Editions, 422 p., 39 €.
- *Einstein, le père des temps modernes*, de Silvio Bergia. Belin, « Pour la science », 160 p., 14,95 €.
- *La Théorie de la relativité restreinte et générale*, d'Albert Einstein. Ed. Dunod, 180 p., 15 €.

LES FLUCTUATIONS DE LA CONSTANTE COSMOLOGIQUE

MARC LACHIÈZE-REY, astrophysicien, directeur de recherche au CNRS

Qu'est-ce qui a conduit Einstein à introduire la constante cosmologique dans sa relativité générale ?

En 1917, Einstein réalise que la relativité générale est l'outil idéal pour faire de la cosmologie. Il va donc essayer de construire le premier modèle cosmologique conçu comme un espace-temps. La difficulté, c'est que sa première version débouchait sur un univers qui ne pouvait pas être statique. Or à l'époque, personne ne savait que l'Univers était en expansion. Einstein a donc modifié sa théorie en ajoutant une seconde constante fondamentale à celle de la gravitation : la constante cosmologique. Celle-ci induit un effet répulsif qui contrebalance l'attraction de la matière et permet donc d'obtenir un univers statique.

Pourquoi y a-t-il renoncé ?

Dans les années 1930, la découverte de l'expansion de l'Univers a conduit Einstein à revenir à sa théorie initiale puisque les raisons qui avaient justifié l'introduction de la constante cosmologique avaient disparu. L'Univers n'était de toute manière pas statique. Il a donc renié cette constante.

Mais d'autres ont pensé qu'il fallait la conserver. Il faut bien comprendre qu'après son premier modèle, Einstein n'était pas en pointe en cosmologie. A cette époque, la discipline était dominée par George Lemaître. C'est lui qui a démontré la loi de l'expansion et sa conformité à la théorie. Et il a vu qu'il y avait de bonnes raisons de continuer à soutenir la constante cosmologique.

Cette conviction s'est-elle imposée ?

Elle est restée minoritaire. Le dogme a longtemps été que la constante cosmologique était nulle. Jusqu'à il y a une dizaine d'années, beaucoup d'Anglo-Saxons croyaient dur comme fer au scénario de la « matière noire froide » : ils pensaient qu'il y avait suffisamment de matière dans l'Univers pour que cela lui permette d'atteindre la densité critique. Mais cette version se heurtait déjà à une première difficulté : elle débouchait sur un âge de l'Univers nettement inférieur à celui que l'on observait.

Comment la constante cosmologique revient-elle dans le débat ?

A partir de 1998, les observations des supernovae ont montré qu'apparemment l'expansion de l'Uni-

vers accélère. Si l'on a confiance dans ces mesures, on ne peut l'expliquer avec seulement de la matière et sans constante cosmologique.

Quel est l'état actuel du débat ?



Marc Lachièze-Rey.

elle oppose deux écoles. Ceux, dont je suis, qui considèrent qu'il faut bien introduire cette constante dans les équations de la relativité, que cela donne une théorie plus naturelle, plus générale. D'autres pensent que cela rendrait la relativité trop compliquée et qu'il vaut mieux continuer à s'en passer. Mais ce qu'ils proposent à la place, pour justifier l'accélération est, à mes yeux, plus complexe que la constante elle-même.

Ils postulent l'existence d'une substance, noire ou exotique – il y a des tas de noms –, qui, en gros, correspond à l'énergie du vide telle qu'elle est imaginée par la physique quantique qui, en l'état, ne la démontre absolument pas. Ce postulat impose l'invention d'une nouvelle physique qui définirait exactement ce que pourrait être cette énergie du vide.

C'est une sorte de pari sur l'avenir auquel s'oppose dès maintenant une difficulté : les premiers calculs d'une éventuelle valeur de

cette énergie du vide dépassent d'un facteur 10¹²⁰ celle qui conviendrait en cosmologie. C'est inenvisageable. Le plus étonnant, c'est que ce problème est désigné, par un renversement de langage, comme celui de la constante cosmologique. Alors que c'est précisément celui des théories qui cherchent à lui substituer autre chose.

On peut résumer l'opposition en termes de contenu et de contenant. La constante cosmologique, de nature purement géométrique, contribue à la description de l'espace-temps, le contenant de l'Univers. L'énergie du vide ferait partie de la substance. Ni matière ni rayonnement, elle participerait au contenu de l'Univers. Avec un peu d'optimisme, on peut penser que la bonne théorie de l'avenir viendra à faire disparaître la distinction entre géométrie et substance, et donc à réconcilier constante cosmologique et énergie du vide.

Propos recueillis par J. Fe.

EINSTEIN

LA PHYSIQUE DE DEMAIN

CLAUDE COHEN-TANNOUJJI, professeur honoraire au Collège de France, Prix Nobel de physique en 1997

« Il ne faut pas oublier la recherche fondamentale »

Vous avez passé cinquante ans en recherche de pointe dans le domaine de l'interaction entre la lumière et la matière. Quels sont, de votre point de vue, les grands progrès accomplis par la physique depuis les articles publiés par Albert Einstein en 1905 ?

Je me limiterai ici à mon domaine de recherche qui est celui des atomes et de la lumière. Sur le plan théorique, je pense que nous avons une meilleure compréhension des phénomènes quantiques qui caractérisent les atomes, les « quanta de lumière » introduits par Einstein en 1905, appelés aujourd'hui photons, et leurs interactions. Sur le plan expérimental, notre maîtrise des atomes et de la lumière a considérablement augmenté. De nouvelles sources de lumière, comme les lasers, sont apparues. Nous savons maintenant contrôler les divers degrés de liberté d'un atome : énergie, polarisation, vitesse, position. Ces progrès théoriques et expérimentaux ont permis d'aborder des situations complètement nouvelles, de poser de nouvelles questions, d'ouvrir de nouvelles voies de recherche.

Où en est la mécanique quantique aujourd'hui ?

La mécanique quantique est un outil essentiel pour décrire le comportement des atomes et des photons. Cet outil, qui a vu le jour au début du siècle dernier, notamment à la suite des contributions décisives d'Einstein, fournit un cadre conceptuel remarquable pour interpréter toute une série de phénomènes dans la physique des basses énergies.

Ce qui est extraordinaire, c'est que les fondements de la mécanique quantique sont restés pratiquement inchangés depuis maintenant près de quatre-vingts ans. Il est rare d'observer une telle résistance à toutes les tentatives de modification.

Einstein lui-même s'y est attelé...

En effet, Einstein a repéré, avec une lucidité remarquable, un certain nombre de difficultés conceptuelles au sein de la mécanique quantique. Dans les années 1930, avec Boris Podolsky et Nathan Rosen, il a présenté des arguments sérieux suggérant que la description quantique des phénomènes physiques était incomplète, en désaccord avec Niels Bohr, qui défendait l'interprétation traditionnelle de la mécanique quantique. Le débat a été finalement tranché par la contribution décisive de John Bell, qui a montré que, si des « variables supplémentaires locales » étaient introduites pour décrire plus complètement un système quantique, il existait des situations physiques où les prédictions des

résultats de mesure de cette nouvelle description diffèrent de celles de la mécanique quantique. Une réponse expérimentale pouvait donc être donnée aux objections soulevées par Einstein et les résultats obtenus par divers groupes, dont celui d'Alain Aspect en France, ont confirmé les prédictions de la mécanique quantique.

Il est ainsi apparu qu'Einstein n'avait pas raison et que la description quantique est complète. Néanmoins, son objection a eu l'immense mérite d'attirer l'attention sur le caractère tout à fait étrange de ce que l'on appelle maintenant, en physique, des états intriqués. Ces états contiennent des corrélations quantiques tout à fait surprenantes et contrairement à notre intuition classique. La vision que l'on a d'eux aujourd'hui est qu'ils décrivent des systèmes inséparables. Autrement dit, quand deux systèmes physiques sont dans un état intriqué, même s'ils sont très éloignés l'un de l'autre, on ne peut plus les considérer comme des entités séparées. Ils forment un tout. Ce qui est remarquable, c'est que nos progrès dans la manipulation des systèmes atomiques et de la lumière font que ces corrélations quantiques tout à fait étranges ouvrent maintenant la voie à de nombreuses applications. De nombreux chercheurs les utilisent dans un nouveau domaine de recherche que l'on appelle « information quantique ».

Des paires de photons corrélés dans un état intriqué permettent de transmettre un message sans risquer d'être interceptés par un espion. C'est ce que l'on appelle la cryptographie quantique. Ces états intriqués sont également utilisés pour réaliser des portes logiques qui pourraient servir à concevoir des ordinateurs quantiques, même si ces derniers semblent encore lointains. Ainsi, en éclaircissant une difficulté conceptuelle, les physiciens ont élargi notre compréhension des corrélations quantiques et ouvert la voie pour des nouvelles applications qui étaient jusqu'ici tout à fait insoupçonnées.

Le développement du laser a-t-il joué un rôle important dans vos travaux ?

Nous abordons maintenant le second volet que je mentionnais plus haut pour les progrès réalisés dans les études sur les atomes et la lumière, celui des progrès expérimentaux. Il est clair que l'arrivée des lasers dans les laboratoires, au début des années 1970, a complètement transformé le paysage de ces laboratoires. Les chercheurs ont pu soumettre les atomes à des rayonnements et radicalement différentes de celles des autres

sources conventionnelles. De nouveaux domaines de recherche sont apparus, comme la spectroscopie et l'optique non linéaire, les interactions atome-laser aux intensités très élevées ou aux temps très courts, la manipulation des atomes au moyen de faisceaux laser.

C'est dans ce dernier domaine que mon équipe a travaillé au cours des vingt dernières années. Notons d'ailleurs que le premier exemple de manipulation des atomes par la lumière est antérieur à l'apparition des lasers. C'est celui du pompage optique, imaginé et développé en France par Alfred Kastler et Jean Brossel, et permettant de polariser un ensemble d'atomes, c'est-à-dire d'orienter tous leurs moments magnétiques le long d'une direction donnée, en faisant interagir ces atomes avec une lumière résonnante convenablement polarisée. Il est clair d'ailleurs que l'expertise acquise par notre laboratoire dans ce domaine au cours des cinquante dernières années s'est révélée précieuse pour élucider les divers mécanismes de refroidissement laser découverts depuis vingt ans, ce qui montre l'importance d'une continuité suffisante dans toute activité de recherche.

Nous savons maintenant, de même que plusieurs autres groupes dans le monde, piéger des atomes dans une petite région de l'espace et les refroidir au moyen de faisceaux laser à des températures extrêmement basses – de l'ordre du microkelvin, voire même du nanokelvin, qui sont des températures 300 millions ou 300 milliards de fois plus basses que la température ambiante. Ces nouvelles situations permettent d'aborder toute une série de nouveaux problèmes et de nouvelles applications.

Un premier exemple est celui de la spectroscopie à très haute résolution et des horloges atomiques. Les atomes ultrafroids se déplacent extrêmement lentement, à des vitesses très faibles, de l'ordre du centimètre par seconde, alors qu'à température ambiante cette vitesse est de l'ordre du kilomètre par seconde. On peut donc les observer et faire des mesures sur eux pendant un temps très long. Or, en physique, une mesure est d'autant plus précise que le temps d'observation est plus long. Le gain de précision offert par les atomes ultrafroids a permis de réaliser des nouvelles horloges atomiques possédant une stabilité relative et une exactitude cent à mille fois meilleure que celles de toutes les horloges antérieures. Ainsi, les horloges à atomes ultrafroids réalisées à Paris au BNM-Syrté dans l'équipe de Christophe Salo-



Claude Cohen-Tannoudji.

- 1933** : naissance à Constantine (Algérie).
- 1953** : après quatre années d'études à l'Ecole normale supérieure à Paris, il passe en 1957 l'agrégation de sciences physiques.
- 1960** : attaché de recherches au CNRS.
- 1962** : il devient docteur d'Etat, avec une thèse portant sur la théorie du pompage optique.
- 1964** : maître de conférence à la faculté des sciences de Paris.
- 1973** : élu au Collège de France (chaire de physique atomique et moléculaire). Il devient membre de l'Académie des sciences en 1981, puis de nombreuses académies étrangères et reçoit de très nombreux prix tout au long de sa carrière, en particulier la médaille d'or du CNRS en 1996. Il est l'auteur, avec Bernard Diu et Francis Laloe, de *Mécanique quantique*.
- 1997** : il reçoit le prix Nobel de physique.

mon et André Clairon sont actuellement les horloges les plus précises au monde, avec des erreurs de moins d'une seconde sur trois cent millions d'années. Il est envisagé de les placer dans l'espace, sur la station internationale. Elles permettront d'améliorer le système GPS et de faire de nouveaux tests de physique fondamentale.

Un second exemple de nouveau domaine de recherche concerne l'aspect ondulatoire des atomes. On sait, depuis les travaux de Louis de Broglie en 1924, qu'à toute particule matérielle est associée une onde, appelée maintenant onde de de Broglie, dont la longueur d'onde est inversement proportionnelle à la vitesse de la particule. Plus les atomes sont froids, plus leur vitesse est faible et plus leur longueur d'onde est importante, ce qui rend plus facile l'observation de leur aspect ondulatoire. On refait maintenant avec les ondes de de Broglie toutes les expériences d'interférence et de diffraction qui étaient réalisées auparavant avec des ondes lumineuses, avec des performances ultimes potentiellement beaucoup plus élevées, par exemple pour les interféromètres sensibles à la rotation (gyromètres).

Une autre manifestation du caractère ondulatoire des atomes (obéissant à la statistique de Bose) est la condensation de Bose-Einstein, phénomène également prévu par Einstein en 1924. Ce phénomène apparaît lorsque la distance moyenne entre deux atomes est inférieure à la longueur d'onde de de Broglie. Il a pu être observé en 1995 par deux groupes américains à Boulder et au MIT sur des gaz d'alcalins ultrafroids. De nombreux groupes, en particulier en France, travaillent actuellement sur les condensats gazeux, qui sont des systèmes quantiques macroscopiques, avec un nombre macroscopique d'atomes décrits tous par la même fonction d'onde, et qui possèdent des propriétés remarquables de cohérence et de superfluidité.

Quelles sont aujourd'hui les grandes tendances d'évolution de votre domaine de recherche ?

Je vois deux grandes tendances. D'abord l'étude de systèmes de plus en plus purs, de plus en plus isolés – par exemple, il est aujourd'hui possible de détecter un seul électron, il est possible d'observer la lumière émise par un seul atome, il est possible de travailler avec des systèmes faisant intervenir un seul photon, etc. L'expérimentateur peut donc étudier des systèmes extrêmement bien définis où il est possible d'analyser en profondeur des phénomènes quantiques élémentaires. L'autre tendance consiste à étudier des systèmes comprenant des grands nombres d'atomes et de molécules, comme les condensats gazeux, où les interactions sont beaucoup plus faibles que dans un système liquide ou solide. De plus, on sait maintenant contrôler en grandeur et en signe les interactions entre atomes d'un condensat gazeux. Par conséquent, ces condensats peuvent servir de modèles simples pour étudier des systèmes beaucoup plus complexes comme l'hélium superfluide ou les supraconducteurs. Ce sont deux grandes lignes de recherche qui se développent parallèlement et qui, à mon avis, pourraient nous faire accomplir des progrès importants dans les prochaines années.

En cent ans, les progrès considérables des capacités d'expérimentation des physiciens ont-ils modifié leur démarche de chercheurs ?

Je ne pense pas. Le point de départ, dans toute démarche de recherche fondamentale, c'est la curiosité et le désir de comprendre. A partir de la meilleure compréhension physique obtenue, apparaissent des nouvelles méthodes d'investigation, de nouveaux outils qui permettent d'étudier de nouveaux systèmes... D'où de nouvelles questions, et ainsi de suite. C'est à mon sens une série de spirales qui s'enchaînent les unes à la suite des autres. Au cours de ces spirales apparaissent de nouvelles applications. Toutes les applications importantes que j'ai à l'esprit proviennent de cette démarche de recherche fondamentale et n'ont pas été planifiées à l'avance : le laser, les transistors, l'imagerie par résonance magnétique. Je suis persuadé que les technologies qui seront utilisées dans dix ou vingt ans seront basées sur des résultats de travaux poursuivis aujourd'hui dans les laboratoires de recherche fondamentale.

Pour autant, la recherche fondamentale ne semble plus révolutionner ses modèles théoriques de manière aussi radicale qu'au début du XX^e siècle...

Il y a pourtant eu récemment des ruptures très importantes, même si elles ne sont pas aussi spectaculaires que celles apparues dans le foisonnement du début du siècle précédent. La recherche avance aujourd'hui sur un front beaucoup plus large. Il reste de nombreuses questions encore ouvertes et de vastes domaines à défricher : inclusion de la gravité dans un schéma quantique – c'est l'objectif de la théorie des cordes –, systèmes fortement corrélés ou désordonnés, superfluides, tout le domaine de la matière molle... Tous ces systèmes ont une physique très riche et il faut encore trouver des modèles simples pour les décrire. Il y a aussi le passionnant problème de la frontière avec la biologie : la physique pourrait non seulement continuer à fournir des outils d'étude comme l'IRM mais aussi contribuer par ses concepts à élaborer des modèles pour la mémoire, le fonctionnement du système nerveux.

Quels conseils donneriez-vous pour une nouvelle politique de la recherche ?

Il ne faut pas oublier la recherche fondamentale. On ne cesse de le répéter, mais le message ne passe pas. La situation actuelle est très triste et la recherche fondamentale survit avec des crédits misérables. Par exemple, les crédits récurrents de fonctionnement et d'équipement de mon équipe de recherche comprenant une trentaine de membres ont plafonné à 120 000 euros par an juste avant mon départ à la retraite. C'est tout à fait insuffisant pour mener une activité de recherche digne de ce nom dans un domaine très compétitif. Il faut trouver d'autres sources de financement sur des contrats. Mais ces derniers deviennent de plus en plus orientés sur des objectifs très précis qualifiés de prioritaires et il devient impossible de faire appel à eux pour explorer une nouvelle idée. En plus de ces programmes prioritaires qui sont affichés, il faudrait une série de lignes budgétaires consacrées à des projets « blancs », intéressants sur le strict plan scientifique, indépendamment de toute application.

C'est un peu ce qui se passe aux Etats-Unis avec la National Science Foundation (NSF). On peut espérer que la création de l'Agence nationale de la recherche en France permettra de remédier à la situation actuelle. Il faudrait aussi que cet argent ne soit pas éparpillé, partagé « équitablement » entre de très nombreuses équipes, mais que des choix soient faits en faveur des équipes les plus performantes, après un examen scientifique rigoureux par des experts internationaux de la qualité des projets présentés. Cela va à l'encontre de certaines opinions, notamment syndicales, mais la recherche est affaire d'excellence. Beaucoup ont peur du mot « excellence ». Je ne suis pas favorable au système américain, qui est trop impitoyable et qui pénalise des recherches de longue haleine. Mais le système français exagère, parfois, dans l'autre sens.

Propos recueillis par Michel Alberganti et Stéphane Foucart

Tout savoir sur la physique

L'Université de tous les savoirs (UTLS) propose vingt-six conférences sur le thème : « La physique : des fondamentaux aux applications », du 16 au 25 juin et du 5 au 20 juillet.

DU 16 AU 25 JUIN

- Dix conférences sur « la physique fondamentale » :
- Jeudi 16 : Physique et mathématiques, avec Edouard Brézin, président de l'Académie des sciences, Ecole normale supérieure.
- Vendredi 17 : La physique quantique, avec Philippe Grangier, Institut d'optique, CNRS.
- Samedi 18 : La mécanique des fluides, avec Henri Keith Moffatt, université de Cambridge (Angleterre).
- Dimanche 19 : Physique et cosmologie, avec François Bouchet, Institut d'astrophysique de Paris.
- Lundi 20 : Einstein aujourd'hui avec Françoise Balibar, université Paris-VII.

- Mardi 21 : La gravitation, avec Nathalie Deruelle, Institut des hautes études scientifiques.
- Mercredi 22 : Les condensats de Bose-Einstein, avec Jean Dalibard, Ecole normale supérieure.
- Jeudi 23 : De l'atome au cristal : les propriétés électroniques des matériaux, avec Antoine Georges, Ecole polytechnique.
- Vendredi 24 : Les neutrinos dans l'Univers, avec Daniel Vignaud, CNRS, Collège de France.
- Samedi 25 : La théorie des cordes, avec Costas Bachas, Ecole normale supérieure.

DU 5 AU 20 JUILLET

- Seize conférences sur « la physique et ses applications » :
- Mardi 5 : Physique et climat, avec Jean Jouzel, Commissariat à l'énergie atomique, Saclay.
- Mercredi 6 : Physique et mécanique, avec Stéphane Roux, CNRS, Saint-Gobain.

- Jeudi 7 : Physique et médecine : l'imagerie médicale, avec André Syrota, Commissariat à l'énergie atomique, Saclay, service hospitalier Frédéric-Joliot.
- Vendredi 8 : Les nanostructures semi-conductrices, avec Jean-Michel Gérard, Commissariat à l'énergie atomique, Grenoble.
- Samedi 9 : L'adhésion, avec Liliane Léger, Collège de France.
- Dimanche 10 : La physique à l'échelle de la cellule, avec Cécile Sykes, Institut Curie.
- Lundi 11 : La spintronique : des spins dans nos ordinateurs, avec Albert Fert, CNRS, Thales.
- Mardi 12 : Le monde quantique au travail : l'optoélectronique, avec Emmanuel Rosencher, Office national d'études et de recherches aérospatiales.
- Mercredi 13 : La physique des ondes dans la Terre, avec Michel Campillo, université Joseph-Fourier, Grenoble.
- Jeudi 14 : La physique des pâtes, avec Philippe Coussot, Ecole nationale des ponts et chaussées.
- Vendredi 15 : L'eau, un liquide ordinaire ou extraordinaire, avec Bernard Cabane, Ecole supérieure de physique et chimie industrielles.
- Samedi 16 : Quelles sources d'énergie d'ici à 2050 ?, avec Sylvain David, Institut de physique nucléaire, Orsay.
- Dimanche 17 : Le mécanisme de repliement des molécules, avec Didier Chateau, Ecole normale supérieure.
- Lundi 18 : Physique en champs magnétique intense, avec Geert Rikken, Laboratoire national des champs magnétiques pulsés, Toulouse.
- Mardi 19 : La tribologie, avec Lydéric Bocquet, université Lyon-1.
- Mercredi 20 : Voyage au centre des protéines, avec Eva Pébay-Peyroula, Institut de biologie structurale de Grenoble.

- Toutes les conférences ont lieu au Centre des Saints-Pères, université René-Descartes-Paris-V, amphithéâtre Binet, 45, rue des Saints-Pères, 75006 Paris. Tous les jours à 18 h 30. Entrée libre, sans réservation. Rens. au 01-42-86-20-62.
- Toutes les conférences sont mises en ligne sur : www.lemonde.fr/utls