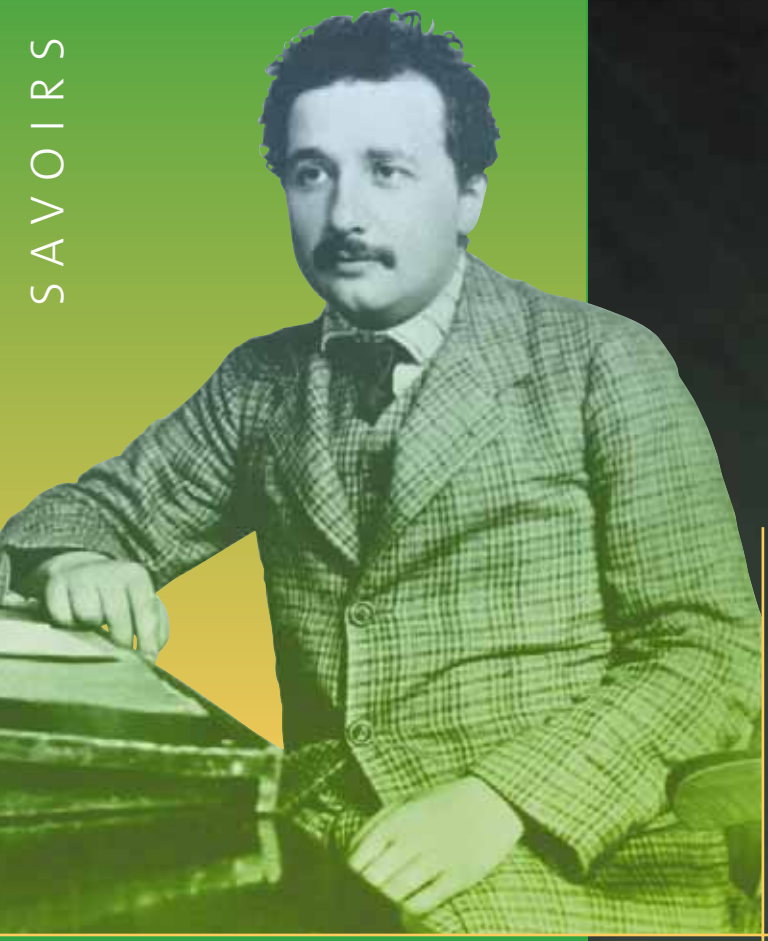
PHYSIQUE

SAVOIRS ACTUELS

Einstein aujourd'hui

Alain ASPECT
François BOUCHET
Éric BRUNET
Claude COHEN-TANNOUDJI
Jean DALIBARD
Thibault DAMOUR
Olivier DARRIGOL
Bernard DERRIDA
Philippe GRANGIER
Franck LALOË
Jean-Paul POCHOLLE



CNRS EDITIONS

EDP SCIENCES

Einstein aujourd'hui

SAVOIRS ACTUELS

EDP Sciences/CNRS Éditions

Illustration de couverture : Photographie d'A. Einstein (1905). © Hebrew University of Jerusalem. Archives, California Institute of Technology.

© **2005, EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A
et
CNRS Éditions, 15, rue Malebranche, 75005 Paris.

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 2-86883-768-9
ISBN CNRS Éditions 2-271-06311-6

Avant-propos

Par *Michèle Leduc* et *Michel Le Bellac*

En 1905, Einstein publiait une série d'articles fondateurs sur la relativité, les quanta lumineux et le mouvement brownien. Un siècle après cet « annus mirabilis », il nous a paru intéressant de demander à quelques physiciens français de renom de donner leur point de vue sur l'apport d'Einstein à la physique de ce début du XXI^{e} siècle. Nous avons choisi de ne pas nous limiter à l'année 1905, mais nous avons pris en compte l'ensemble de l'œuvre scientifique d'Einstein jusqu'au milieu des années 1930. En effet ses derniers travaux passés à la postérité sont d'une part celui sur les fondements de la mécanique quantique, effectué en collaboration avec Podolsky et Rosen et connu sous les initiales « EPR » (1935), et d'autre part celui sur les lentilles gravitationnelles (1936). Le panorama dressé dans ce livre permet de juger de la diversité impressionnante des sujets abordés par Einstein. Parmi les plus marquants, citons :

Quanta : quanta lumineux (1905) ; chaleur spécifique des solides (1907) ; émission stimulée de rayonnement (1917) ; condensation de Bose-Einstein (1923).

Relativité : relativité restreinte (1905) ; énoncé du principe d'équivalence (1907) ; relativité générale (1916).

Fluctuations : mouvement brownien (1905) ; théorie des fluctuations thermodynamiques (1910).

Fondements de la mécanique quantique : article EPR, débats avec Niels Bohr (1935).

Cosmologie : principe cosmologique et constante cosmologique (1917) ; modèle d'Univers en expansion d'Einstein et de Sitter (1932).

Ces travaux ont non seulement ouvert la voie à une bonne partie de la physique du XX^{e} siècle, mais ils continuent encore aujourd'hui à avoir un impact dans des domaines parfois inattendus : ainsi il a fallu attendre près de 50 ans, avec les travaux de John Bell et les expériences qui ont suivi, pour que soit reconnue l'importance de l'intrication des systèmes quantiques. Ce n'est qu'en 1995 qu'a été vérifiée sans ambiguïté la prédiction de la condensation

de Bose-Einstein. Et Einstein n'avait sûrement pas envisagé que la relativité serait indispensable pour notre système de navigation GPS, un outil qui fait partie maintenant de notre vie quotidienne.

Ce livre contient sept contributions. La première est une introduction historique écrite par Olivier Darrigol, qui décrit en détail la genèse des articles fondateurs de 1905, et plus succinctement celle des travaux ultérieurs. On constatera combien Einstein, loin de l'image du savant solitaire isolé dans son bureau des brevets à Zürich, était parfaitement au courant des grandes interrogations de la physique de son époque et des travaux de ses grands contemporains (Lorentz, Poincaré, Planck, Mach, ...) tout en « les dépassant par l'ampleur et la radicalité de ses points de vue », comme le souligne Olivier Darrigol.

Les trois contributions suivantes concernent la physique quantique, en suivant l'ordre historique inversé des articles fondateurs. Alain Aspect et Philippe Grangier montrent comment Einstein, Podolsky et Rosen (EPR), parallèlement à Erwin Schrödinger, avaient mis en lumière une particularité unique de la mécanique quantique, qui est largement connue aujourd'hui sous le nom d'intrication des systèmes quantiques. Einstein, très opposé à l'interprétation de Copenhague de la mécanique quantique, s'était appuyé sur l'intrication afin d'essayer de prouver que la mécanique quantique constituait une description incomplète de la réalité physique. Niels Bohr avait jusque là répondu brillamment aux objections antérieures d'Einstein, mais il ne put donner cette fois qu'une réponse alambiquée. Ce débat de géants tomba dans l'oubli pendant une trentaine d'années, et il fallut attendre les travaux de John Bell en 1964 pour que l'article EPR revienne sur le devant de la scène. En effet, John Bell put montrer que les idées contenues dans cet article étaient susceptibles de vérification expérimentale. Alain Aspect et Philippe Grangier décrivent les expériences récentes qui ont permis d'invalider la conclusion immédiate du travail EPR (il faut compléter la mécanique quantique), tout en montrant en revanche combien la notion d'intrication est fondamentale : jointe aux progrès expérimentaux qui permettent de manipuler des objets quantiques individuels, elle a donné naissance à une « nouvelle révolution quantique », dont un exemple est l'information quantique.

Dans l'article suivant, Claude Cohen-Tannoudji, Jean Dalibard et Frank Laloë examinent la postérité du travail de 1923, qui prédisait le phénomène appelé aujourd'hui « condensation de Bose-Einstein », le fait que des atomes d'un certain type (obéissant à la statistique de Bose) ont tendance à s'accumuler dans un état quantique unique à très basse température. Einstein lui-même était assez sceptique sur la possibilité de mettre cet effet en évidence. Depuis les premières vérifications expérimentales de la condensation de Bose-Einstein en 1995, on assiste à une explosion de travaux sur ce nouvel état de la matière. L'intérêt du phénomène vient de la relation fascinante et controversée entre superfluidité et condensation de Bose-Einstein, et aussi des perspectives de transposer toute l'optique aux ondes de matière, et de fabriquer des « lasers à atomes ». Enfin les condensats de Bose-Einstein atomiques gazeux (et les gaz

d'atomes fermioniques à très basse température) permettent de réaliser des systèmes modèles qui servent à tester des idées de la physique de la matière condensée dans des conditions parfaitement contrôlées.

Dans la dernière contribution à cette série « quantique », Jean-Paul Pocholle fait le point sur ce qui est sans doute l'application la plus largement connue des travaux de 1917, le laser. L'apport conceptuel d'Einstein à la théorie de l'interaction lumière-matière est essentiel. Il a en effet introduit la notion d'émission stimulée de rayonnement, qui est à l'origine du processus d'émission laser ; celle-ci a vu le jour dans les laboratoires à la fin des années 1950, lorsque les physiciens ont été capables de réaliser des inversions de population de niveaux atomiques ou moléculaires. Depuis lors, la technologie du laser a enregistré des progrès spectaculaires, allant des diodes laser à semi-conducteur de taille micrométrique jusqu'aux sources laser à verre dopé surpuissantes pour la fusion contrôlée. Les applications des lasers sont aujourd'hui trop nombreuses pour être recensées de façon exhaustive ; ils sont devenus les compagnons de notre vie quotidienne tout autant que des outils incontournables pour la recherche.

L'apport d'Einstein à la théorie du mouvement brownien et aux fluctuations statistiques est sans doute moins connu que ses contributions à la physique quantique et à la relativité. Elle n'en est pas moins essentielle, car il fut le premier à saisir le lien quantitatif entre les fluctuations d'origine microscopique et les propriétés thermodynamiques, une idée à la base de la physique statistique moderne. Comme le montre Olivier Darrigol, sa compréhension profonde des fluctuations constitue aussi le fil directeur de ses travaux sur la physique quantique. Dans leur chapitre, Bernard Derrida et Eric Brunet donnent un aperçu de la variété des problèmes de physique allant de la théorie du mouvement brownien à celle des polymères, du théorème fluctuation dissipation aux systèmes hors équilibre, qui sont dans le prolongement des travaux d'Einstein.

Les deux derniers chapitres, par Thibault Damour et François Bouchet, sont des synthèses très documentées et actualisées sur la relativité générale et la cosmologie. Après la relativité restreinte en 1905, il fallut à Einstein une dizaine d'années de travail acharné pour mettre au point sa théorie relativiste de la gravitation, ou relativité générale. Cette extraordinaire construction intellectuelle connut des débuts très médiatisés en raison de l'expédition d'Eddington confirmant la déviation des rayons lumineux par le Soleil. Elle fut cependant assez largement ignorée des physiciens jusqu'au début des années 1960, en raison de ses difficultés mathématiques et du caractère limité des tests expérimentaux envisageables à l'époque. Comme le montre Thibault Damour, la perception de la relativité générale est totalement différente aujourd'hui. Elle est vérifiée dans un grand nombre de situations, qui vont de notre environnement immédiat (système GPS) jusqu'aux confins de l'Univers, avec une précision relative qui peut atteindre 10^{-5}. Elle est devenue une théorie indispensable de l'astrophysique contemporaine : elle est à la base de notre

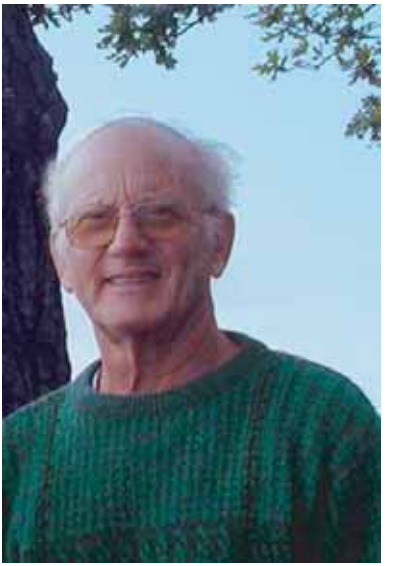
compréhension des étoiles massives, des trous noirs, des lentilles gravitationnelles et des ondes gravitationnelles.

La relativité générale est au fondement de la cosmologie moderne. C'est ce qu'Einstein avait compris dès 1917, comme en témoigne la saga de la constante cosmologique (notée Λ), qu'il introduisit dans un premier temps afin de rendre compte d'un Univers supposé statique, pour la renier quinze ans plus tard quand s'imposa l'idée de l'expansion de l'Univers. François Bouchet décrit l'évolution fulgurante de la cosmologie depuis dix ans, qui aboutit aujourd'hui au modèle standard dit ΛCDM, où figurent Λ parce que la constante cosmologique a finalement refait surface et CDM, initiales de Cold Dark Matter, la matière sombre froide. Ce modèle standard rend compte de façon remarquable d'un grand nombre d'observations d'origine très diverse, tout en nous apprenant que la matière telle que nous la connaissons ne représente qu'une fraction infime (moins de 5 %) de l'Univers : les observations concordent pour suggérer qu'il est aussi constitué de 25 % de matière sombre et de 70 % d'énergie sombre, dont la nature reste aujourd'hui complètement mystérieuse.

L'année 2005 a été choisie comme « année mondiale de la physique » par l'ONU et l'UNESCO pour commémorer l'« annus mirabilis » dont c'est le centième anniversaire, et ce livre s'inscrit dans cette perspective. Nous remercions les auteurs, qui figurent parmi les meilleurs spécialistes au monde dans leurs disciplines respectives, d'avoir pris le temps d'apporter des contributions originales tout spécialement dédiées à ce centième anniversaire.

Michèle Leduc

Michèle Leduc est directrice de recherche au CNRS. Elle poursuit des recherches en physique des atomes refroidis par laser au Laboratoire Kastler Brossel à l'École Normale Supérieure (Paris). Elle dirige la collection « Savoirs Actuels » du CNRS depuis 1986.



Michel Le Bellac

Michel Le Bellac est professeur émérite à l'Université de Nice, chercheur au laboratoire INLN à Sophia Antipolis. Auteur de nombreux livres de physique, il est le coordinateur de l'ouvrage « Einstein aujourd'hui ».

Table des matières

Avant-propos . . . . . **iii**
Michèle Leduc et Michel Le Bellac

1 1905 : un nouvel élan **1**
Olivier Darrigol

2 De l'article d'Einstein Podolsky et Rosen à l'information quantique : les stupéfiantes propriétés de l'intrication . . . **39**
Alain Aspect et Philippe Grangier

3 La condensation de Bose-Einstein dans les gaz **87**
Claude Cohen-Tannoudji, Jean Dalibard et Franck Laloë

4 De l'émission stimulée d'Einstein aux lasers aujourd'hui **129**
Jean-Paul Pocholle

5 Le mouvement brownien et le théorème de fluctuation-dissipation **203**
Bernard Derrida et Éric Brunet

6 Relativité générale **267**
Thibault Damour

7 Cosmologie **321**
François R. Bouchet

Chapitre 1

1905 : un nouvel élan

Par *Olivier Darrigol*

Sommaire

1.1 Thème de recherche 1 : l'électrodynamique des corps en mouvement 7
1.2 Thème de recherche 2 : microphysique théorique 13
1.3 Thème de recherche 3 : le rayonnement du corps noir 17
1.4 Les clefs du succès 21
1.5 Trois réceptions 23
1.6 L'esprit relativiste 24
1.7 L'énigme quantique 28
1.8 Après la mort 34
1.9 Sources et références 35

Olivier Darrigol

Olivier Darrigol est directeur de recherche au CNRS, membre du groupe d'Histoire des sciences Rehseis (Paris). Après une formation initiale en physique théorique, il s'est orienté vers l'Histoire des sciences. Il est l'auteur d'ouvrages concernant l'Histoire de la physique quantique, celle de l'électrodynamique et celle de l'hydrodynamique. Il a contribué à l'édition des œuvres choisies d'Einstein en français.

1905 : un nouvel élan

C'ÉTAIT IL Y A CENT ANS. Albert Einstein publiait dans *Annalen der Physik* son fameux triptyque : quanta lumineux / mouvement brownien / relativité. Dans le présent ouvrage, quelques physiciens d'aujourd'hui témoignent de la fertilité du genre de théorie physique inauguré en ce temps. Le but de l'essai historique que voici est de montrer comment l'année 1905 marqua un tournant dans la quête intellectuelle d'Einstein, de la critique des fondements à la construction hésitante, paradoxale et inachevée d'une nouvelle physique.

Pour un adolescent de la fin du XIX^{e} siècle, témoin d'un afflux de merveilles techniques, lecteur avide d'ouvrages de vulgarisation scientifique et fils d'un chef d'entreprise d'électrotechnique, il était bien naturel de se passionner pour les sciences physiques. Dès ses années de lycée, Einstein savait qu'il voulait devenir physicien théoricien ou mathématicien. En témoigne l'essai qu'il écrivit à l'occasion d'un examen de Français[1] :

> Mes projets d'avenir.
>
> Un homme heureux est trop content de la présence [du présent] pour penser beaucoup à l'avenir. Mais de l'autre côté ce sont surtout les jeunes gens qui aiment à s'occuper de hardis projets. Du reste c'est aussi une chose naturelle pour un jeune homme sérieux, qu'il se fasse une idée aussi précise que possible du but de ses désirs.
>
> Si j'avais le bonheur de passer heureusement mes examens, j'irai à l'école polytechnique de Zürich. J'y resterais quatre ans pour étudier les mathématiques et la physique. Je m'imagine de devenir professeur dans ces branches de la science de la nature en choisissant la partie théorique de ces sciences.
>
> Voici les causes qui m'ont porté à ce projet. C'est surtout la disposition individuelle pour les pensées abstractes et mathématiques, le manque de la phantasie [imagination] et du talent pratique. Ce sont aussi mes désirs qui me conduisaient à la même résolution. C'est tout naturel ; on aime toujours faire les choses pour lesquelles on a le talent. Puis c'est aussi une certaine indépendance de la profession scientifique qui me plaît beaucoup.

[1] A. Einstein, essai extrait de la Staatsarchiv Kanton Argau, reproduit dans [2] pp. 42–43 (fac-similé avec les corrections du professeur, ignorées dans la présente transcription). Cet essai valut à Einstein la note 3-4 sur 6. Voir [1–3].

À l'âge de seize ans, Einstein imagine un modèle de l'éther électromagnétique, un peu naïf mais cohérent. « *C'est le cœur lourd* », écrit-il sur un ton qu'il allait vite abandonner, « *que je concentre ces réflexions en un essai qui apparaît plus comme un programme que comme un mémoire. . . . Fasse que l'indulgence du lecteur bien disposé soit à la mesure du sentiment d'humilité avec lequel je soumets ces lignes.* » L'année suivante, à son entrée au *Polytechnikum* de Zurich, il décide fermement de se consacrer à la physique. Durant le reste de ses études, il partage son temps entre la fréquentation du laboratoire, les recherches personnelles et une liaison amoureuse avec son condisciple serbe Mileva Marić. Il ne suit qu'une partie des cours, qu'il juge trop dogmatiques, et préfère lire les grands auteurs de l'époque : Kirchhoff, Helmholtz, Hertz, Drude, Boltzmann, Mach et Poincaré[2].

Ambitieux, à l'affût de la nouveauté, Einstein médite déjà sur les tensions de la physique contemporaine, sur les points d'achoppement signalés par les grands maîtres. Il n'en manquait pas. Dans les douze dernières années du siècle et particulièrement en Allemagne, la physique avait connu une avalanche de découvertes qui remettaient en question bien des idées reçues. En 1888, les expériences de Heinrich Hertz avaient imposé la théorie électrodynamique de James Clerk Maxwell au dépend des vieilles théories allemandes d'action directe à distance. Dans les années 1890, les découvertes des rayons X, de la radioactivité et de l'électron avaient nourri une nouvelle microphysique expérimentale. Aux yeux d'un nombre croissant de physiciens, atomes, ions et électrons n'étaient plus de simples fictions théoriques : il devenait possible d'étudier dans le laboratoire des conséquences assez directes de leur existence [5, 6].

En raison de ces développements, les jugements sur les théories existantes évoluèrent, de nouvelles théories apparurent, on débattit de leurs mérites et l'on s'interrogea sur les fondements de la théorie physique en général. Dans le domaine de l'électromagnétisme, Hertz proposa une version plus abstraite de la théorie de Maxwell, où les équations fondamentales étaient posées comme axiomes, sans aucun fondement mécanique. À l'instar de Maxwell, Hertz admettait toutefois l'existence d'un milieu de propagation, l'éther, éventuellement modifié par la présence de matière. Par souci de simplicité, il supposait que ce milieu était complètement entraîné par la matière dans ses mouvements. Mais comme il le soulignait lui-même, cette hypothèse était contredite par des expériences d'optique des corps en mouvement (par exemple, l'expérience de Hippolyte Fizeau de 1851, selon laquelle la lumière se propageant à travers un courant d'eau n'est que partiellement entraînée par ce courant). Einstein fut frappé par cette remarque de Hertz et esquissa à ce moment une approche de l'électromagnétisme semblable à celle du théoricien néerlandais Hendrik Lorentz, dont il prit connaissance un peu plus tard[3].

[2] Einstein, « Über die Untersuchung des Aetherzustandes in magnetischem Felde », manuscrit de 1895 [4] (vol. 1 : pp. 6–9).

[3] Voir [6] et la lettre d'Einstein à Marić d'août 1899, [4] (vol. 1, traduit dans [10] vol. 2 : pp. 28–29).

Le but général de Lorentz était de résoudre les difficultés de la théorie électromagnétique de la lumière. Pour rendre compte de la dispersion optique et des effets du mouvement des corps transparents, il admettait, contrairement à Maxwell, que toutes les interactions entre l'éther et la matière s'effectuaient via des particules chargées (ions ou électrons) et que l'éther se laissait traverser par les particules de matière sans être aucunement entraîné. L'autorité de cette conception crut considérablement vers la fin du siècle, quand l'effet magnéto-optique de Pieter Zeeman, la découverte de l'électron et de nouvelles expériences d'optiques des corps en mouvement vinrent la confirmer. Les lettres d'Einstein de cette époque montrent qu'il la partageait [7].

Un peu plus tard, en 1901, Einstein lut les *Leçons sur la théorie des gaz* de Ludwig Boltzmann, avec un enthousiasme qui le poussa à s'exclamer : « *Der Boltzmann ist ganz grossartig !* » Comme Einstein le savait, la théorie de Boltzmann, développée de 1868 à 1895 à partir de la théorie cinétique des gaz de Maxwell, avait longtemps été négligée en Allemagne au profit de la thermodynamique macroscopique. Mais à la fin du siècle, la nouvelle microphysique expérimentale renforça les conceptions atomistes et permit de nouvelles applications ou transpositions de la théorie cinétique des gaz, par exemple les théories de l'ionisation par les rayons X ou la théorie électronique des métaux de Paul Drude. C'est à propos de cette dernière qu'Einstein s'exclama : « *Der Drude ist ein genialer Kerl.* » Sans doute était-il frappé par le succès d'une combinaison de deux innovations majeures, la théorie des électrons et la théorie cinétique des gaz, à l'intersection de deux domaines de la physique[4].

Einstein suivit aussi, d'un œil critique, les travaux de Max Planck sur le rayonnement du corps noir, qui comme ceux de Drude mêlaient électromagnétisme et phénomènes thermiques. Stimulé par les recherches de Boltzmann, Planck cherchait à comprendre l'irréversibilité thermodynamique à partir de la micro-dynamique sous-jacente. Mais il ne tolérait pas l'interprétation statistique de la loi de croissance de l'entropie, et rejetait par conséquent la théorie cinétique moléculaire qui y conduisait. La véritable cause de l'irréversibilité, selon lui, était à chercher dans les interactions entre matière et rayonnement électromagnétique. Après maints efforts et diverses péripéties, il en vint à adopter une version formelle de la relation de Boltzmann entre entropie et probabilité et obtint ainsi la formule du rayonnement noir qui porte son nom. Nous y reviendrons plus loin. Mais notons déjà que pour Planck l'intérêt principal de cette dérivation était d'établir un pont entre théorie des gaz et théorie du rayonnement, et de permettre une nouvelle estimation du nombre d'Avogadro, en fait la plus précise de l'époque [4 ; vol. 1, 8].

De ses lectures au front des théories de l'époque, Einstein tira trois thèmes de recherche :

(1) Clarifier les relations entre l'éther et la matière, en rapport avec les difficultés de l'optique des corps en mouvement.

[4] Einstein à Marić, 13 septembre 1900 [4] (vol. 1 : pp. 259–261) ; 4 avril 1901 [4] (vol. 1 : pp. 284–286).

(2) Donner des moyens plus directs et plus précis d'accéder aux grandeurs moléculaires et affermir les fondements de la théorie de Boltzmann.

(3) Élucider les mécanismes responsables du rayonnement noir.

Einstein fut aussi sensible aux commentaires méthodologiques dont les grands physiciens de l'époque accompagnaient leurs travaux théoriques. Hertz insistait sur le caractère symbolique de la théorie physique, sur la nécessité de définitions opérationnelles des grandeurs fondamentales, et sur l'élimination des redondances dans la représentation des phénomènes. Boltzmann défendait la liberté de construction des théories physiques, et critiquait ceux qui croyaient ne point faire d'hypothèses en se confinant à la phénoménologie mathématique. Helmholtz et Planck promouvaient un genre de physique dans lequel des principes généraux tels que la conservation de l'énergie ou le principe de moindre action devaient guider et contraindre la construction des théories. Ils étaient convaincus d'une unité profonde de la physique et tentaient d'établir de nouveaux ponts entre des domaines jusque là séparés. Les adeptes d'une telle physique des principes, particulièrement Wilhelm Wien et Henri Poincaré, se servaient volontiers d'expériences de pensée pour explorer le jeu combiné des principes [1, 6].

Einstein prit ainsi conscience de diverses stratégies dont il pouvait s'inspirer au gré des circonstances. Et il s'imprégna d'une conception de la physique théorique qui intégrait la critique des fondements dans l'élaboration des théories. Sa lecture des écrits philosophiques de David Hume, Ernst Mach et Henri Poincaré renforça cette dimension de sa pensée. Pour ces auteurs comme pour les grands théoriciens de l'époque, il n'était plus question de concevoir une genèse purement inductive de la théorie physique. Certes, l'expérience restait le point de départ et le point d'arrivée de toute théorie. Mais l'activité intellectuelle du théoricien avait sa propre dynamique, ses propres outils critiques et constructifs. C'est à ce moment que la physique théorique devint une discipline autonome, surtout en Allemagne [5, 9].

Porté par cet élan de la physique théorique, Einstein mûrit ses réflexions sur les trois thèmes du rapport éther/matière, des grandeurs moléculaires et du rayonnement. Au printemps 1905, il annonce à son ami Conrad Habicht une série de progrès sur ces trois fronts, d'un ton jovial et badin[5] :

> Cher Habicht,
> Il règne entre nous un silence sacré, au point que j'ai un peu le sentiment de commettre une profanation en le brisant aujourd'hui par un bavardage sans grand intérêt. Mais toutes les choses élevées ne finissent-elles pas ainsi en ce monde ?
> Que faites-vous donc, espèce de baleine congelée, espèce de quartier d'âme fumée en conserve, ou que sais-je encore que j'aimerais vous jeter à la figure, emporté que je suis par 70 % de colère et 30 % de pitié ! Vous pouvez remercier ces 30 % qui m'ont empêché que je ne vous expédie l'autre jour — alors que, plus silencieux qu'une tombe, vous n'étiez pas apparu à Pâques — une boîte de conserve remplie d'oignons et d'ail coupés en rondelles.

[5] Einstein à Habicht, printemps 1905, [4] vol. 3, traduit dans [10] vol. 1 : p. 36.

Mais pourquoi donc ne m'avez-vous toujours pas envoyé votre thèse ? Ne savez-vous point, affreux personnage, que je fais partie des une personne et demie qui la parcourraient avec plaisir et intérêt ? Je vous promets en échange quatre travaux, dont je pourrai prochainement vous envoyer le premier, car je dois recevoir très bientôt les exemplaires d'auteur. Il y est question de rayonnement et des propriétés énergétiques de la lumière, d'une façon tout à fait révolutionnaire, ainsi que vous le verrez si vous m'envoyez *auparavant* votre thèse.
Mon deuxième travail est une détermination de la taille véritable des atomes à partir de la diffusion et de la viscosité des solutions liquides diluées de substances neutres. Dans le troisième, je démontre que, d'après la théorie moléculaire de la chaleur, des corps d'un ordre de grandeur de 1/1000 mm en suspension dans un fluide doivent déjà effectuer un mouvement désordonné perceptible, lui-même provoqué par l'agitation thermique ; et, de fait, les physiologistes ont observé des mouvements affectant de petits corps inanimés en suspension, mouvements auxquels ils donnent le nom de « mouvement moléculaire brownien. »
Le quatrième travail est encore à l'état d'ébauche ; il s'agit d'une électrodynamique des corps en mouvement qui repose sur des modifications de la théorie de l'espace et du temps. La partie purement cinématique de ce travail vous intéressera sûrement.
Solo[vine] continue à donner des cours particuliers et ne se décide pas à passer l'examen ; je le plains beaucoup, car il mène une bien triste existence. Il a d'ailleurs l'air bien éprouvé. Mais je ne crois pas qu'il soit possible de l'amener à avoir des conditions de vie plus supportables. Vous savez comment il est !
Bien cordialement,

Votre A.E.

Vous avez également toutes les amitiés de ma femme et du petit diable, qui a maintenant un an.
Envoyez vite votre travail !

Dans ce qui suit, nous allons voir comment Einstein aboutit aux quatre travaux auquel il fait allusion dans cette lettre, en suivant l'ordre historique d'apparition de ses thèmes de recherche plutôt que l'ordre des publications de 1905. Puis nous examinerons les clefs de son succès, la réception immédiate de ses travaux et les prolongements qu'il leur donna lui-même. Nous conclurons par quelques indications de l'efflorescence actuelle de la physique einsteinienne.

1.1 Thème de recherche 1 : l'électrodynamique des corps en mouvement

La correspondance d'Einstein des années 1899–1901 porte plusieurs traces de son intérêt pour l'électrodynamique des corps en mouvement et pour les phénomènes optiques apparentés. Une lettre à Marić d'août 1899 témoigne de l'avancement de ses réflexions[6] :

[6] Voir note 3.

J'étudie une nouvelle fois avec la plus grande attention *La propagation de la force électrique* de Hertz... Je suis de plus en plus convaincu que l'électrodynamique des corps en mouvement, telle qu'elle se présente actuellement, ne correspond pas à la réalité, et qu'il doit être possible de la présenter de façon plus simple. L'introduction du mot « éther » dans les théories de l'électricité a conduit à l'idée d'un milieu du mouvement duquel il est possible de parler, sans que l'on soit capable, à mon avis, d'associer une signification physique à ce que l'on dit... Il faudra considérer les courants électriques non comme « une polarisation électrique s'annulant dans le temps » [point de vue de Maxwell] mais comme un mouvement de masses électriques vraies, dont les équivalents chimiques semblent prouver l'existence [allusion à la loi de Faraday]... L'électrodynamique serait alors la théorie des déplacements de [masses] électriques et magnétiques en mouvement.

Comme Lorentz et avant de l'avoir lu, Einstein pensait que tous les phénomènes électromagnétiques impliquant la matière devaient pouvoir se ramener aux interactions entre des particules chargées (les ions) et un éther stationnaire, dépourvu de toute matérialité. Ainsi un courant de conduction devait-il être compris comme une circulation d'ions ; une polarisation comme un déplacement d'ions élastiquement liés. La stationnarité rigoureuse de l'éther suggérait un effet du mouvement des dispositifs optiques terrestres par rapport à l'éther, qu'Einstein pensait pouvoir démontrer en comparant les intensités de la lumière émise par une source terrestre dans deux directions opposées [11].

Einstein pensait aussi que le mouvement d'un corps transparent par rapport à l'éther devait affecter la propagation de la lumière. En effet, en se propageant dans un corps transparent, une onde électromagnétique engendrait une vibration sympathique des ions et un rayonnement secondaire de ces ions. L'interférence des rayonnements primaire et secondaire permettait de prévoir, en sus de l'effet d'indice optique, un effet du mouvement de ce corps sur la vitesse de la lumière. Einstein proposa à son professeur de physique, Heinrich Weber, une expérience qui permît de tester cette conséquence de la stationnarité de l'éther[7].

Sans qu'Einstein en fût encore conscient, Lorentz avait déjà calculé ce dernier effet, et Hippolyte Fizeau l'avait expérimentalement mesuré. Le coefficient théorique d'entraînement de la lumière, $1 - 1/n^2$ si n est l'indice optique, était celui qu'Augustin Fresnel avait jadis introduit afin que les lois de la réfraction dans un prisme terrestre fussent insensibles au vent d'éther. L'expérience en confirmait la valeur. Weber, qui était conscient de ces développements, traita Einstein de haut (*stiefmütterlich*, selon l'intéressé) et le renvoya à la lecture d'un mémoire de Wien de 1898 récapitulant les progrès récents des physiciens sur la question du mouvement de l'éther. Wien discutait l'expérience de Fizeau, la théorie de Lorentz et maintes tentatives, toutes vaines, de détecter des effets du vent d'éther créé par le mouvement de la terre. Parmi celles-ci se trouvait l'expérience de 1887 par laquelle Albert Michelson et Edward Morley comparaient interférométriquement les vitesses de la lumière dans deux directions orthogonales. Le résultat positif de l'expérience

[7]Voir Einstein à Marić, 28 (?) septembre 1899, [4] vol. 1 : pp. 233–235.

[78] K.G. Begeman, A.H. Broeils, R.H. Sanders, *Extended rotation curves of spiral galaxies – Dark haloes and modified dynamics*, MNRAS **249**, 523–537 (1991).
[79] M. Milgrom, *A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis*, Ap. J. **270**, 365–370 (1983).
[80] M. Milgrom, *MOND-theoretical aspects*, New Astron. Rev. **46**, 741–753 (2002).
[81] J.F. Navarro, C.S. Frenk, S.D.M. White, *The Structure of Cold Dark Matter Halos*, Ap. J. **462**, 563 (1996).
[82] W.J.G. De Blok, S.S. McGaugh, A. Bosma, V.C. Rubin, *Mass Density Profiles of Low Surface Brightness Galaxies*, Ap. J. Lett. **552**, L23–L26 (2001).
[83] A.D. Lewis, D.A. Buote, J.T. Stocke, *Chandra Observations of A2029: The Dark Matter Profile Down to below* $0.01r_{vir}$ *in an Unusually Relaxed Cluster*, Ap. J. **586**, 135–142 (2003).
[84] S.W. Allen, S. Ettori, A.C. Fabian, *Chandra measurements of the distribution of mass in the luminous lensing cluster Abell 2390*, MNRAS **324**, 877–890 (2001).
[85] S.W. Allen, R.W. Schmidt, A.C. Fabian, *Chandra observations of RX J1347.5-1145: the distribution of mass in the most X-ray-luminous galaxy cluster known*, MNRAS **335**, 256–266 (2002).
[86] Y.B. Zeldovich, R.A. Sunyaev, *The Interaction of Matter and Radiation in a Hot-Model Universe*, Astrophys. Space Sci. **4**, 301 (1969).
[87] S.D.M. White, J.F. Navarro, A.E. Evrard, C.S. Frenk, *The Baryon Content of Galaxy Clusters – a Challenge to Cosmological Orthodoxy*, Nature **366**, 429 (1993).
[88] F. Zwicky, *Nebulae as Gravitational Lenses*, Phys. Rev. **51**, 290–290 (1937).
[89] A. Einstein, *Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field*, Science **84**, 506–507 (1936).
[90] J.-P. Kneib, R.S. Ellis, I. Smail, W.J. Couch, R.M. Sharples, *Hubble Space Telescope Observations of the Lensing Cluster Abell 2218*, Ap. J. **471**, 643 (1996).
[91] D. Walsh, R.F. Carswell, R.J. Weymann, $0957 + 561$ *A, B – Twin quasistellar objects or gravitational lens*, Nature **279**, 381–384 (1979).
[92] R. Lynds, V. Petrosian, *Giant Luminous Arcs in Galaxy Clusters*, BAAS **18**, 1014 (1986).
[93] G. Soucail, Y. Mellier, B. Fort, G. Mathez, F. Hammer, *Further data on the blue ring-like structure in A 370*, A&A **184**, L7–L9 (1987).
[94] J.N. Hewitt, E.L. Turner, D.P. Schneider, B.F. Burke, G.I. Langston, *Unusual radio source MG1131+0456 – A possible Einstein ring*, Nature **333**, 537–540 (1988).
[95] J.A. Tyson, G.P. Kochanski, I.P. dell'Antonio, *Detailed Mass Map of CL 0024+1654 from Strong Lensing*, Ap. J. Lett. **498**, L107 (1998).

[96] F. Valdes, J.F. Jarvis, J.A. Tyson, *Alignment of faint galaxy images – Cosmological distortion and rotation*, Ap. J. **271**, 431–441 (1983).
[97] J.A. Tyson, F. Valdes, J.F. Jarvis, A.P. Mills, *Galaxy mass distribution from gravitational light deflection*, Ap. J. Lett. **281**, L59–L62 (1984).
[98] J.A. Tyson, R.A. Wenk, F. Valdes, *Detection of systematic gravitational lens galaxy image alignments – Mapping dark matter in galaxy clusters*, Ap. J. Lett. **349**, L1–L4 (1990).
[99] H. Bonnet, Y. Mellier, B. Fort, *First detection of a gravitational weak shear at the periphery of CL 0024+1654*, Ap. J. Lett. **427**, L83–L86 (1994).
[100] N. Kaiser, G. Squires, *Mapping the dark matter with weak gravitational lensing*, Ap. J. **404**, 441–450 (1993).
[101] G. Squires, N. Kaiser, G. Fahlman, A. Babul, D. Woods, *A Weak Gravitational Lensing Analysis of Abell 2390*, Ap. J. **469**, 73 (1996).
[102] M. Pierre, J.F. Le Borgne, G. Soucail, J.P. Kneib, *X-ray analysis and matter distribution in the lens-cluster Abell 2390*, A&A **311**, 413–424 (1996).
[103] R.H. Sanders, *Observational Cosmology*, Second Aegean Summer School on the Early Universe (2004).
[104] C.T. Kowal, *Absolute magnitudes of supernovae*, Astron. J. **73**, 1021–1024 (1968).
[105] D. Branch, G.A. Tammann, *Type IA supernovae as standard candles*, Ann. Rev. Astr. Astrophys. **30**, 359–389 (1992).
[106] B. Leibundgut, *Cosmological Implications from Observations of Type Ia Supernovae*, Ann. Rev. Astr. Astrophys. **39**, 67–98 (2001).
[107] S.J. Maddox, G. Efstathiou, W.J. Sutherland, J. Loveday, *Galaxy correlations on large scales*, MNRAS **242**, 43P–47P (1990).
[108] F.R. Bouchet, L. Hernquist, *Gravity and count probabilities in an expanding universe*, Ap. J. **400**, 25–40 (1992).
[109] C. Lineweaver, *Inflation and the Cosmic Microwave Background*, Proceedings of the New Cosmology Summer School, Colless M. ed., World Scientific & astroph/0302213 (2003).
[110] W. Hu, *CMB temperature and polarization anisotropy fundamentals*, Annals of Physics **303**, 203–225 (2003).
[111] M. Tegmark, M.A. Strauss, M.R. Blanton, K. Abazajian, S. Dodelson, H. Sandvik, X. Wang, D.H. Weinberg, I. Zehavi, N.A. Bahcall, F. Hoyle, D. Schlegel, R. Scoccimarro, M.S. Vogeley, A. Berlind, T. Budavari, A. Connolly, D.J. Eisenstein, D. Finkbeiner, J.A. Frieman, J.E. Gunn, L. Hui, B. Jain, D. Johnston, S. Kent, H. Lin, R. Nakajima, R.C. Nichol, J.P. Ostriker, A. Pope, R. Scranton, U. Seljak, R.K. Sheth, A. Stebbins, A.S. Szalay, I. Szapudi, Y. Xu, J. Annis, J. Brinkmann, S. Burles, F.J. Castander, I. Csabai, J. Loveday, M. Doi, M. Fukugita, B. Gillespie, G. Hennessy, D.W. Hogg, Ž. Ivezić, G.R. Knapp, D.Q. Lamb, B.C. Lee, R.H. Lupton, T.A. McKay, P. Kunszt, J.A. Munn, L. O'Connell, J. Peoples, J.R. Pier, M. Richmond, C. Rockosi, D.P.