

ISSN 0101 - 9236

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTÍFICO E TECNOLÓGICO - CNPq

CENTRO BRASILEIRO DE PESQUISAS FÍSICAS - CBPF

Coordenação de Documentação e Informação Científica - CDI

Divisão de Publicações

CBPF-MO-003/83

DE L'IMAGE PHYSIQUE DU MONDE:  
DE PARMÉNIDE À EINSTEIN

par

J. Leite Lopes

Conférence donnée le 19 mars 1983 à l'Institut de Physique de  
l'Université de Strasbourg I.

Rio de Janeiro

CBPF

1983

A Sergio, Sylvio et Angela

A Pedro, Francisco et Manuel

## TABLE DES MATIERES

LE PROBLEME DE LA CONNAISSANCE	2
Table I	4
Table II	5
Table III	8
L'ECOLE DE MILET	9
PYTHAGORE	11
HERACLITE ET PARMENIDE	12
Table IV	13
LA COSMOGONIE DE PLATON	16
LA PHYSIQUE D'ARISTOTE	17
LA CRITIQUE D'ARISTOTE	19
LA REVOLUTION CRISTALLISEE CHEZ GALILEE	19
Table V	21
LE SYSTEME DU MONDE NEWTONIEN	22
Table VI	24
Table VII	25
LA NOTION DE CHAMP	26
Table VIII	27
Table IX	29
Table X	30
Table XI	31
PLANCK, EINSTEIN, LORENTZ, POINCARÉ	32
EINSTEIN ET LA PHYSIQUE RELATIVISTE	33
Table XII	36
EINSTEIN ET LA THEORIE RELATIVISTE DE LA GRAVITATION	37
Table XIII	42
Table XIV	46

## RESUMÉ

On discute l'évolution des idées qui constituent la description physique du monde, depuis l'Ecole de Milet en Grèce ancienne jusqu'à l'image actuelle qui résulte des théories des champs de jauge qui essaient l'unification des forces de l'Univers. Pythagore, Heraclite, Parménide, la cosmogonie de Platon, la physique d'Aristote, le système du monde Galiléé - Newtonien, Maxwell, Lorentz, Einstein sont à l'origine de conceptions qui ont débouché dans la théorie de nos jours, les modèles d'unification des interactions tels que les modèles de Salam - Weinberg et celui de Glashow.

Mots-clefs: Philosophie de la nature; Monde newtonien; Relativité générale; Champs de jauge; Unification des interactions

Parler d'Einstein, écrire sur Einstein est certainement un défi fascinant mais redoutable : combien d'articles, combien de livres lui ont été dédiés, à lui et à son oeuvre, depuis les années 50, les dernières années de sa vie ? Combien de discours ont été prononcés, combien de congrès se sont tenus il y a exactement quatre ans, à l'occasion du centenaire de sa naissance ?

S'il est considéré par les physiciens comme une des plus grandes figures de l'histoire de leur science, l'égal de Galilée et de Newton, c'est parce que ses contributions scientifiques sont à la base de la physique contemporaine -ses travaux sur la théorie de la relativité restreinte ont donné lieu à une reformulation révolutionnaire de la physique traditionnelle, des notions fondamentales d'espace et de temps, de matière et d'énergie, ses travaux sur la théorie de la gravitation -les plus beaux peut-être de la physique théorique jusqu'à nos jours- ont conduit à l'unification de la dynamique gravitationnelle avec la géométrie de l'espace physique. Et ses mémoires sur la nature

de la lumière, sur la théorie quantique des processus d'émission et d'absorption de photons par les atomes, ont contribué à l'éclosion de la mécanique quantique, la théorie qui est, de nos jours, la théorie universelle des objets et des événements microscopiques, à l'échelle des atomes, des noyaux et des particules fondamentales de la matière.

Et surtout, le long de sa vie, au fur et à mesure que se développaient ses idées physiques, il était amené à réfléchir sur les principes et les motivations de la recherche scientifique, sur les méthodes de la physique théorique, sur sa conception du monde, sur le problème de la connaissance.

Je ne parlerai pas de ses activités tout aussi importantes d'ordre politique, économique et social, en faveur du peuple juif, mais aussi en vue de faire justice aux peuples arabe et palestinien, et ne fais que mentionner ses efforts pour la paix et contre la guerre, ses réflexions et ses innombrables interventions pour les grandes causes de l'humanité.

#### LE PROBLEME DE LA CONNAISSANCE

Si nous voulons bien comprendre l'apport d'Einstein à la description -et à la "compréhension"- d'un vaste ensemble de phénomènes physiques peut-être devrions-nous nous poser la question : quelle est l'image physique actuelle du monde, quelle a été son évolution à travers l'histoire ?

Cette question est aussi ancienne que l'homme lui-même ; elle est au coeur des grands systèmes de philosophie et de religion, je ne serais donc capable de vous présenter, qu'un aperçu qualitatif et sommaire de l'évolution de quelques aspects fondamentaux de la conception physique du monde, en raison de mon ignorance des travaux des plus grands philosophes et historiens de la science.

Le problème de montrer comment nous acquérons la connaissance, comment est faite notre connaissance des choses distinctes de nous-mêmes -et de nous-mêmes- est le noyau de la philosophie et je crois qu'il n'a pas trouvé et probablement ne trouvera jamais une solution définitive.

George Berkeley, le philosophe anglais du XVIII<sup>e</sup> siècle, a d'une certaine façon révélé l'aspect crucial de ce problème, en niant l'existence de la matière, les corps matériels n'existant pour lui que dans notre perception. Au postulat de l'existence indépendante de choses qui correspondent à nos sensations, il a préféré admettre l'existence de Dieu qui regarde toujours les choses ; de cette façon bien qu'un objet cesse d'exister pour moi quand je ne l'aperçois pas, bien qu'il recommence à exister dès que je l'aperçois à nouveau, la surveillance continuelle de Dieu qui percevrait éternellement les objets, éliminerait cette intermittence de l'existence des corps, rétablirait sa continuité. (voir Table I et Table II).

A l'immense variété de nos sensations et perceptions nous associons

T A B L E I

4. "It is indeed an opinion strangely prevailing amongst men, that houses, mountains, rivers, and in a word all sensible objects have an existence natural or real, distinct from their being perceived by the understanding. But with how great an assurance and acquiescence soever this principle may be entertained in the world ; yet whoever shall find in his heart to call it in question may, if I mistake not, perceive it to involve a manifest contradiction. For what are the forementioned objects but the things we perceive by sense , and what do we perceive besides our own ideas or sensations ; and is it not plainly repugnant that any one of these or any combination of them should exist unperceived ?"

George BERKELEY, *A Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge*, PART I.

T A B L E I I

33. " The ideas imprinted on the senses by the Author of Nature are called real things, and those excited in the imagination being less regular, vivid and constant, are more properly termed ideas, or images of things, which they copy and represent".

72. ... To me, I say, it is evident that the being of a spirit infinitely wise, good and powerful, is abundantly sufficient to explain all the appearances of Nature. But as for inert senseless matter, nothing that I perceive has any the least connexion with it, or leads to the thoughts of it.

George BERKELEY, *Loc. Cit.*, PART I.

un monde qui existe en dehors de nous, et qui est la cause de nos perceptions, une existence qui n'est pas, néanmoins, d'après la physique contemporaine, totalement indépendante de nous. A ces perceptions nous associons donc des choses et des événements -qui sont des constructions pour exprimer nos perceptions y compris celles transmises par un appareil de mesure physique- ; dans ces constructions et en correspondance aux objets nous employons des idées inventées par la pensée, des notions primitives et des notions logiquement déduites, des constructions qui s'intègrent dans une théorie. Et l'ensemble des théories, qui se proposent à décrire les régularités de certaines classes d'objets et d'événements, contribuera à la formation d'une image physique du monde.

D'après Eugène Wigner, le grand physicien théoricien contemporain, il existe deux espèces de réalités ou d'existences : l'existence de ma conscience et l'existence de tout le reste, à savoir le monde matériel et les sensations des autres. L'existence d'un objet, d'un livre par exemple, est une expression convenable pour décrire les sensations que j'éprouve et qui déterminent d'autres sensations. Il s'agit là d'une réalité relative tandis que pour Wigner la réalité absolue est la réalité de ma conscience. Cette conception résulte, en fait, de l'analyse de la notion de mesure en mécanique quantique. Dans une mesure physique, il y a une interaction entre l'appareil et l'objet observé, et l'état du système appareil + objet reste tel que seul un état de l'objet peut être associé avec

un état donné de l'appareil. Ainsi la mesure de l'état de l'appareil conduit à la mesure de l'objet physique et celle-ci n'est achevée que lorsque son indication entre dans ma conscience.

"This last step", affirme Wigner, "is, at the present state of our knowledge, shrouded in mystery and no explanation has been given for it so far in terms of quantum mechanics, or in terms of any other theory" (Table III).

Ainsi, avant George Berkeley, entre George Berkeley et Eugène Wigner, combien d'extraordinaires réflexions et d'analyses sur la nature de notre connaissance, sur la structure de ce que nous appelons le monde physique.

Les physiciens sont intéressés par les régularités qui se révèlent dans l'observation des choses et des événements. Leurs théories ne peuvent décrire la complexité énorme du monde physique que parce qu'il existe certaines corrélations entre phénomènes, des régularités, certaines proportions, que nous avons convenu d'appeler les lois naturelles. Le travail et l'effort des physiciens consistent à découvrir ces lois et les conditions initiales qui permettent de trouver les solutions et de faire des prédictions par ces lois.

La recherche de la connaissance à travers la contemplation de la variété des choses conduisit, déjà dans la Grèce classique, à la notion de nécessité, de proportion entre les éléments, à l'idée de

T A B L E I I I

Even though it is not strictly relevant, it may be useful to give the reason for the increased interest of the contemporary physicists in problems of epistemology and ontology. The reason is, in a nutshell, that physicists have found it impossible to give a satisfactory description of atomic phenomena without reference to the consciousness. This had little to do with the oft rehashed problem of wave and particle duality and refers, rather, to the process called "reduction of the wave packet". This takes place whenever the result of an observation enters the consciousness of the observer - or, to be even more painfully precise, my own consciousness, since I am the only observer, all other people being only subjects of my observation. Alternatively, one could say that quantum mechanics provides only probability connections between the results of my observations as I perceive them. Whichever formulation one adopts, the consciousness evidently plays an indispensable rôle.

Eugène P. WIGNER, *Two Kinds of Reality*, *The Monist*, Vol. 48, N° 2, 1964.

l'existence d'éléments constitutifs de la matière.

## L'ECOLE DE MILET

Thales a été l'un des premiers à énoncer l'idée de l'existence d'un élément fondamental, d'une substance primordiale. D'après lui, toutes les choses seraient faites d'eau. Comme l'eau contient des atomes d'hydrogène, cette conception n'est pas en contradiction avec les idées modernes d'astrophysique : de l'observation de matériel cosmique, on déduit que les éléments prédominants dans l'état initial de l'Univers étaient l'hydrogène et l'hélium, dans une proportion d'abondance d'hydrogène dix fois supérieure à celle de l'hélium. Anaximandre, un autre philosophe de l'Ecole de Milet, affirmait pour sa part, que la substance primordiale de toutes les choses n'est pas l'eau ni, en effet, aucun autre corps matériel connu. Pour lui, l'élément fondamental de toutes les choses est infini et éternel et est sous-jacent dans tous les mondes. Cette substance se transforme dans les objets matériels que nous percevons. D'après Anaximandre, il existe dans le monde matériel une proportion définie d'air, de feu, d'eau et de terre. La compétition entre ces éléments, conçus comme des dieux, leur proportion, est réglementée par une fatalité, par une certaine nécessité -et cette nécessité de proportion entre ces éléments constituerait d'après certains philosophes, l'origine de la notion de loi de la nature. Pour Anaximène, le troisième penseur de l'Ecole de Milet, la substance

primordiale est l'air. L'âme de l'homme est faite d'air, le feu est l'air raréfié, en se condensant l'air se transforme en eau qui à son tour, se condense en terre, en pierres.

D'après ces spéculations pionnières pour ainsi dire de la chimie, les forces de cohésion seraient une sorte de respiration : puisque notre âme, faite d'air, nous maintient unis et stables, ainsi l'air et la respiration universelle assurent la cohésion, la stabilité du monde - l'air serait remplacé au XIX<sup>e</sup> Siècle par l'éther qui transmettrait les actions physiques.

Les spéculations des philosophes de Milet sont d'ailleurs regardées par Bertrand Russell comme de vraies hypothèses scientifiques puisqu'on n'y trouve aucune idée de morale ni des conceptions anthropomorphiques.

A côté de cet esprit scientifique pionnier, les philosophes grecs étaient imprégnés d'un certain esprit de religiosité : ceux qui étaient influencés par la religion de Bacchus ou Dionysos, les disciples d'Orphée, cherchaient "l'enthousiasme" qui veut dire union avec le dieu ; ils étaient intéressés par l'acquisition de connaissances mystiques, non accessibles par la perception des sens. A partir des cultes de Dyonyosos et d'Orphée, la composante mystique de la philosophie grecque a été importante, chez Pythagore notamment, et ensuite, à travers Platon, elle a gagné la philosophie du Moyen Âge

## PYTHAGORE

A Pythagore on attribue l'origine du mot théorie : un mot qui voulait dire état de contemplation avec affinité et passion. D'après F.M. Cornford, le grand "Scholar" anglais, dans cet état le spectateur s'identifie avec le Dieu qui souffre, "meurt dans sa mort et renaît dans sa nouvelle naissance". D'après Pythagore, la contemplation avec affinité et passion est une activité intellectuelle qui donne origine à la connaissance mathématique. A lui nous devons l'affirmation que toutes les choses sont des nombres, une affirmation qui après Galilée et Newton s'est incorporée à la physique et qui se retrouve dans les travaux de Maxwell et Lorentz, d'Einstein, de Schrödinger et Dirac et des physiciens contemporains des théories des champs de jauge -les choses proviennent peut-être d'un grand groupe de jauge, de ses représentations, de sa brisure spontanée de symétrie.

Voici un résumé d'un compte rendu de la philosophie des Pythagoriciens donné par Alexander Polyhistor au I<sup>er</sup> Siècle avant Jésus-Christ et reproduit par Diogène de Laërte : "Le premier principe de toutes les choses est l'Un. De l'Un est provenu un Deux indéfini, en tant que Matière pour l'Un, qui est cause. De l'Un et l'indéfini Deux sont provenus les nombres ; des nombres, les points ; des points, les lignes ; des lignes, les figures planes ; des figures planes, les figures solides ; des figures solides, les corps sensibles. Les éléments de ceux-ci sont quatre : feu, eau, terre, air ;

ces éléments changent et se transforment et d'eux résulte un cosmos, animé, intelligent, sphérique, qui comprend la terre centrale laquelle est elle-même sphérique et habitée tout autour". (cité par Cornford).

Aujourd'hui que disons-nous ? Peut-être ceci : Les premiers éléments de toutes les choses sont leptons et quarks ; des quarks, proviennent les hadrons parmi lesquels les baryons ; les baryons font naître les noyaux ; les leptons et les noyaux forment les atomes des corps sensibles. De ces leptons, quarks, noyaux et atomes résulte un cosmos qui comprend la matière inanimée et la matière intelligente, qui à partir de la terre contemple l'Univers et se contemple elle-même. (Table IV).

#### HERACLITE ET PARMENIDE

De belles divagations philosophiques nous ont aussi été léguées par Héraclite (V<sup>e</sup> Siècle av. J.C). Il considérait le feu comme la substance primordiale, puisqu'il a les propriétés de la matière la moins corporelle et la plus subtile. Comme la flamme du feu, tout naît de la mort de quelque chose ; nous dirions aujourd'hui : des photons sont émis (naissent) dans l'annihilation (mort) électron-positron ; des paires particule-antiparticule naissent de la mort d'un photon. Ainsi, affirmait Héraclite, les êtres mortels sont immortels, les immortels sont mortels, l'un vit la mort de l'autre et meurt la vie d'un autre.

Dans le monde il existe l'unité mais cette unité est le résultat

T A B L E I V

Au temps des philosophes, et même avant eux, ceux qu'on désigne sous le nom de Pythagoriciens se consacrèrent les premiers aux mathématiques et les firent progresser. Nourris dans cette discipline, ils estimèrent que les principes des mathématiques sont les principes de tous les êtres. Et comme de ces principes les nombres sont, par nature, les premiers, et que, dans les nombres les Pythagoriciens croyaient apercevoir une multitude d'analogies avec tout ce qui est et devient, plus qu'ils n'en apercevaient dans le Feu, la Terre et l'Eau (telle détermination des nombres étant la justice, telle autre l'âme et l'intelligence, telle autre le temps critique, et de même, pour ainsi dire, pour chacune des autres déterminations) ; comme ils voyaient, en outre, que des nombres exprimaient les propriétés et les proportions musicales ; comme, enfin, toutes les autres choses leur paraissaient, dans leur nature entière, être formées à la ressemblance des nombres, et que les nombres semblaient être les réalités primordiales de l'Univers : dans ces conditions, ils considérèrent que les principes des nombres sont les éléments de tous les êtres, et que le Ciel tout entier est harmonie et nombre.

de la combinaison d'opposés : l'un est fait de toutes les choses et toutes les choses résultent de l'un. C'est l'opposition des contraires qui est fondamentale, une harmonisation de tensions opposées, comme l'arc et la lyre ; l'on peut donc peut-être dire que la notion de conjugaison de charge, et celle d'annihilation matière-antimatière pour donner de l'énergie remontent à Héraclite.

Avec Parménide d'Elée, un Pythagoricien dissident, la notion de l'un, d'un être substantiel éternel et inchangeable, est introduite. Il a refusé le postulat de Pythagore selon lequel de l'un original proviennent deux et ensuite plusieurs. Voici quelques unes de ses prémisses :

- 1) Ce qui est, est, et ne peut pas ne pas être ; ce qui n'est pas, n'est pas, et ne peut pas être.
- 2) Ce qui est, peut être pensé ou connu, et exprimé ou vraiment nommé ; Ce qui n'est pas, ne le peut pas.

Ce principe me ramène à l'Université de Princeton lorsqu'en 1945 j'y faisais ma thèse de doctorat sous la direction de Wolfgang Pauli. Cette année-là au Fine-Hall, Département de Mathématiques et Physique Théorique de l'Université, Jacques Hadamard, le mathématicien français, faisait un séminaire sur la psychologie de l'invention mathématique. Pendant la discussion la question suivante fut posée par Einstein : quand vous créez, quand vous avez une idée nouvelle, est-elle associée nécessairement à un mot ? Nous voyons que Einstein, comme Parménide, se préoccupait, en posant cette question, des relations entre le réel, la pensée et le langage. D'après

Parménide, c'est la même chose que d'être et que d'être pensé.

"Thought is uttered in names that are true, i.e., names of what really is". Seulement ce qui est peut être pensé ou vraiment nommé ; et seulement ce qui peut être pensé peut être.

Le point faible du système de Parménide, c'est naturellement que ses postulats refusent le monde, la variété des choses résultante de l'Un. Cette variété, ainsi que naître, devenir, changement, mouvement sont d'après lui irréels. De sa philosophie est restée néanmoins le concept de substance fondamentale permanente, d'une réalité indestructible.

Les successeurs de Parménide devaient rétablir la question de la réalité des choses, de la pluralité, du monde qui nous est donné par nos perceptions et qui pour Parménide ne serait qu'une illusion puisqu'il ne pourrait être déduit de l'unité. Empédocle admit que l'Un est toujours plusieurs puisqu'il serait constitué de quatre parties, un mélange de quatre éléments différents qui peuvent se déplacer -les quatre éléments d'Anaximandre, le feu, l'air, l'eau et la terre. Ces éléments sont éternels, inchangeables, se meuvent les uns à travers les autres -le vide, comme pour Parménide, n'existe pas pour Empédocle. Pour Anaxagore si les éléments ne peuvent pas être créés ou périr, l'apparition d'une chose est le résultat d'une combinaison nouvelle des quatre éléments, sa disparition provient d'une dissolution d'une combinaison donnée. Ainsi Empédocle et

Anaxagore ont remplacé le monisme absolu de Parménide par une pluralité d'éléments permanents qui peuvent avoir mouvement et ainsi donner lieu à des changements.

#### LA COSMOGONIE DE PLATON

La cosmogonie de Platon est exposée dans son dialogue Timée : ce qui est permanent, inchangeable, est acquis par l'intelligence ; ce qui est en transformation est acquis par ce qu'il nomme l'opinion. Puisque le monde est appris par nos sensations il ne peut pas être éternel, il doit avoir été créé par Dieu.

Les quatre éléments, feu, air, eau, terre sont représentés respectivement par des nombres qui sont dans une certaine proportion entre eux. Le temps et le ciel ont été créés ensemble. Mais les vrais éléments primordiaux ne sont pas les quatre éléments nommés ci-dessus - ce sont plutôt deux espèces de triangle rectangle, l'un étant la moitié d'un carré, l'autre la moitié d'un triangle équilatéral ; ce sont les plus belles formes. En raison de leur beauté, Dieu les a utilisés pour construire la matière. Chaque atome de l'un des quatre éléments est un solide régulier (connexé) construit à partir de ces triangles : les atomes de la terre sont des cubes, ceux du feu sont des tétraèdres, ceux de l'air, des octaèdres, ceux de l'eau, des icosaèdres. Le cinquième, le dodécaèdre, qui ne peut pas être construit par les deux triangles de Platon - mais à partir de pentagones réguliers - Dieu l'a utilisé, d'après Platon,

pour le schéma de l'Univers -qui serait malgré cette affirmation, sphérique.

Dans le Théétète, Platon fait la critique de la conception selon laquelle la connaissance est la même chose que la perception. Seule la pensée peut nous faire connaître ce qui existe, à savoir les idées ; la connaissance consiste donc en réflexions, pas du tout en impressions et perceptions.

Chez Platon, comme chez Pythagore, nous trouvons donc les origines de la conception selon laquelle la mathématique décrit le monde, une conception qui sera incorporée en physique avec Galilée et Newton.

#### LA PHYSIQUE D'ARISTOTE

La physique et la cosmogonie d'Aristote n'ont pas, comme on le sait, contribué à la science moderne. Mais elles ont une importance historique certaine parce qu'elles ont dominé les spéculations sur le monde jusqu'à Galilée, jusqu'au XVII<sup>e</sup> Siècle. D'après Aristote, il y a deux espèces de mouvements, celui des corps terrestres et celui des corps célestes. Le ciel consiste en dix sphères concentriques, celle de la lune étant la sphère avec le rayon le plus petit. A l'intérieur de cette sphère, tout ce qui est sous la lune est soumis à la corruption et à la désintégration. Au dehors de la sphère de la lune, tout est indestructible.

Le mouvement des corps terrestres se produit comme celui des

animaux, avec une finalité. Les corps célestes, par contre, sont caractérisés par la régularité de leurs mouvements, produits par la volonté d'un Dieu. Au delà des sphères de Mercure, de Vénus, du Soleil, de Mars, de Jupiter et de Saturne il y a celle des étoiles fixes, le Primum Mobile. Au delà du Primum Mobile il n'y a ni mouvement, ni temps, ni lieux. Dieu, le Moteur Primordial qui est lui-même immobile, produit la rotation du Primum Mobile, lequel transmet son mouvement à la sphère des étoiles fixes et ce mouvement se transmet jusqu'à la sphère de la lune: telle est la conception du monde chrétien du Moyen Âge, héritée d'Aristote et exposée dans le Paradiso de Dante. Quant à la physique d'Aristote elle était un corps théorique logiquement cohérent et construit pour décrire les mouvements de notre expérience de chaque jour : un corps pesant tombe vers le bas ; la flamme se dresse vers le haut. Surtout, d'après Aristote, chaque corps a une place déterminée dans le monde et oppose une résistance à tout effort qui tend à le retirer de cette place. D'où l'idée de mouvement comme résultat d'une violence et les corps en mouvement retournent au repos une fois cessée la violence. En termes modernes, nous pouvons dire que la dynamique d'Aristote définit la force comme étant l'impulsion. L'équation de mouvement d'Aristote est la suivante :

$$\vec{F} = \mu \frac{d\vec{x}}{dt}$$

où  $\mu$  serait la masse du corps. Si  $\vec{F} = 0$ ,  $\vec{x} = \vec{x}_0$ , le corps est au repos à la place définie par le vecteur  $\vec{x}_0$ .

Le vide n'existe pas d'après Aristote. Dans le vide, comme dans

l'espace géométrique, il n'y a pas de lieux ni de directions privilégiés. Par conséquent, les figures géométriques ne peuvent pas décrire les corps matériels : la physique ne peut pas être décrite par la mathématique. Il serait même dangereux, d'après Aristote, de mélanger physique et géométrie, d'appliquer le raisonnement mathématique à l'étude de la réalité physique.

#### LA CRITIQUE D'ARISTOTE

Les critiques et les adversaires de la dynamique d'Aristote attireraient l'attention vers le fait que le mouvement se poursuit, une fois cessée la force, l'action motrice qui lui a donné son origine. Parmi eux, citons Jean Philopon au VI<sup>è</sup> Siècle, Jean Buridan et Nicole Oresme, de l'Ecole des Nominalistes de Paris (XIV<sup>è</sup> Siècle), Léonard de Vinci, Benedetti et Galilée (XVI, XVII Siècles).

Cette critique a produit la théorie de l'impétus -au lieu de regarder l'air comme à la fois la résistance et le moteur des mouvements, pourquoi ne pas admettre que quelque chose est transmis au mobile par l'action motrice, quelque chose qui a été alors dénommé virtus motiva, virtus impressa, impétus, impétus impressus, qui fait que le mouvement se poursuive ? Pendant mille ans, cette notion d'impétus est restée ambiguë et confuse.

#### LA REVOLUTION CRISTALLISEE CHEZ GALILEE

Une révolution dans la conception physique du monde, la formulation d'un nouveau langage et d'une nouvelle philosophie, ont été nécessaires pour l'éclosion de la physique moderne. La conception aristotelicienne et médiévale du Cosmos fini, constituée d'un certain nombre de sphères hiérarchiquement ordonnées a dû être remplacée par l'idée d'un Cosmos ouvert, un Univers infini.

Si dans le monde d'Aristote il y avait place pour des lois applicables uniquement au Ciel et des lois descriptives seulement des choses de la Terre, dans le nouveau système du monde, il n'y aurait qu'un seul type de lois, les lois physiques universelles, valables partout (Table V).

Le nouveau système du monde, qui a pris sa forme plus précise à partir de Galilée, a donc établi l'identification de l'espace physique avec l'espace infini de la géométrie euclidienne dans lequel il est possible de penser un corps isolé du reste de l'Univers, l'ingrédient du principe de l'inertie. Le mouvement et le repos sont alors considérés comme des états au même niveau existentiel, ontologique.

En langage moderne, l'équivalence ontologique des états de repos et de mouvement rectiligne et uniforme peut être exprimé en disant que la mécanique classique admet le groupe de Galilée : puisque le repos n'a besoin d'aucune cause pour se maintenir, de même pour un mouvement rectiligne et uniforme qui se déduit de l'état de repos par l'application d'une transformation de ce groupe.

T A B L E V

Nous apportons sur le sujet le plus ancien une science absolument nouvelle. Il n'est peut-être rien dans la nature d'antérieur au mouvement, et les traités que lui ont consacrés les philosophes ne sont petits ni par le nombre ni par le volume ; pourtant, parmi ses propriétés, nombreuses et dignes d'être connues sont celles, qui à ma connaissance, n'ont encore été ni observées ni démontrées. Certaines, plus apparentes, ont été remarquées, tel le fait que le mouvement naturel des graves, en chute libre, est continuellement accéléré ; selon quelle proportion, toutefois se produit cette accélération, on ne l'a pas établi jusqu'ici : nul en effet, que je sache, n'a démontré que les espaces parcourus en des termes égaux par un mobile partant du repos ont entre eux même rapport que les nombres impairs successifs à partir de l'unité. On a observé que les corps lancés, ou projectiles, décrivent une courbe d'un certain type ; mais que cette courbe soit une parabole personne ne l'a mis en évidence. Ce sont ces faits, et d'autres non moins nombreux et dignes d'être connus, qui vont être démontrés, et ainsi -ce que j'estime beaucoup plus important- ouvrir l'accès à une science aussi vaste qu'éminente, dont mes propres travaux marqueront le commencement et dont des esprits plus perspicaces que le mien exploreront les parties les plus cachées.

En 1543, Copernic retira la terre de son repos au-dessous du Paradis et la jeta dans l'espace. Entre 1609 et 1619, Kepler a formulé les lois de mouvement des corps célestes ; il a donc détruit la hiérarchie des sphères du Cosmos fermé d'Aristote. Et Galilée, en observant le ciel avec les premiers télescopes, a découvert de nouveaux corps célestes qui n'étaient pas prévus dans le modèle aristotélicien préétabli par Dieu. En découvrant le principe de l'inertie ainsi que la loi de la chute libre des corps, Galilée a ouvert le chemin pour la grande synthèse de Newton -et comme Pythagore et Platon, il a déclaré que le livre de la nature est écrit en langage mathématique.

#### LE SYSTEME DU MONDE NEWTONIEN

La physique théorique moderne a donc pris sa première forme avec le système de Newton, ses Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle. Son équation du mouvement, qui établit que la force est le produit de la masse du corps par son accélération a été à la base de la physique jusqu'à la découverte de la mécanique quantique en 1925. Sa loi de gravitation universelle a été l'intuition d'un génie, qui compléta la tâche de Galilée en assimilant les mouvements des corps terrestres à ceux des corps célestes soumis à une même force, la force de gravitation. Le fait que cette force était transmise instantanément, une action à distance, était certainement un mystère qui troubla Newton lui-même. Les succès de la mécanique newtonienne, les travaux de recherche d'hommes comme Maupertuis, D'Alembert, Euler,

Lagrange, Laplace, ont fait oublier cette difficulté d'interprétation de la force de gravitation. D'après Ernest Mach, l'attraction gravitationnelle a perdu son caractère d'incompréhension extraordinaire pour n'avoir qu'une incompréhension ordinaire.

Au XVIII<sup>e</sup> Siècle, grâce à la philosophie de Locke et aux lettres philosophiques de Voltaire, le newtonianisme est devenu le dogme du système physique du monde.

Le système de Newton incorpora les idées atomiques. Car, comme vous l'avez déjà remarqué, je n'ai pas mentionné jusqu'ici les intuitions géniales des atomistes grecs, du IV<sup>e</sup> Siècle avant Jésus-Christ, de Leucippe et de Démocrite, influencés par le monisme de Parménide et de Zénon. Dans le souci peut-être de faire une synthèse entre les systèmes de Parménide et d'Empédocle, ils ont postulé que toutes les choses sont composées d'atomes qui se meuvent incessamment dans le vide, dans l'espace vide ; que les atomes sont indivisibles, qu'ils ont toujours été en mouvement et qu'ils seront toujours en mouvement. Les atomistes admettaient le déterminisme : rien ne peut arriver par hasard. Le système philosophique de Leucippe et de Démocrite a été repris par Gassendi au début du XVII<sup>e</sup> Siècle ; il est l'un des inspirateurs de la physique moderne.

Il est clair que cette conception s'associait harmonieusement au système du monde de Galilée et Newton, les lois du mouvement de Newton étant responsables pour le mouvement des atomes (Table VI) et (Table VII)

T A B L E V I

"All these things being consider'd, it seems probable to me that God in the beginning form'd Matter in solid, massy, hard, impenetrable, moveable Particles, of such Sizes and Figures, and with such other properties, and in such Proportion to Space, as most conduced to the End for which he formed them ; and that these primitive Particles being Solids, are incomparably harder than any porous bodies compounded of them ; even so very hard, as never to wear or break in pieces ; no ordinary Power being able to divide what God himself made one in the first creation.

Isaac NEWTON, *Opticks*

T A B L E V I I .

"In the beginning (if there was such a thing) God created Newtons laws of motion together with the necessary masses and forces. This is all ; everything beyond this follows from the development of appropriate mathematical methods by means of deduction".

EINSTEIN, in *Albert EINSTEIN, Philosopher-Scientist.*

( Robert Boyle, le physicien anglais, remarquons-le, tenta d'opposer l'atomisme au système de Galilée-Newton : au lieu d'être écrit en langage mathématique le livre de la Nature serait un roman imaginé en termes corpusculaires.).

Pour la première fois, un dualisme conceptionnel ancien qui consistait dans l'opposition entre les notions de l'un et de plusieurs prend une forme explicite et précise de l'objet matériel et de son mouvement et qui maintenant s'exprime dans le dualisme matière - force (Table VIII).

#### LA NOTION DE CHAMP

Nous arrivons ensuite à une autre notion fondamentale de la physique moderne, la notion de champ, qui s'est dégagée des travaux expérimentaux sur l'électricité et le magnétisme, et que nous devons, dans sa forme finale, à Faraday, Maxwell et Lorentz. L'unification de l'optique avec l'électricité et le magnétisme, basée sur les recherches de Galvani et Volta, de Oersted et d'Ampère, fut la grande synthèse achevée par les équations de Maxwell. A l'époque, beaucoup de physiciens imprégnés de l'image mécanique du monde selon Newton, essayeront d'interpréter ces équations d'après certains modèles mécaniques. Heinrich Hertz, un des chefs de file de ces essais affirma en 1894 : "Tous les physiciens s'accordent à considérer que la tâche de la physique est de réduire les phénomènes naturels aux lois élémentaires de la mécanique".

T A B L E V I I I

DUALISME NEWTONIEN

Matière - Force

Matière

Equation de mouvement

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = \vec{F}$$

Force

Equation de la force

$$\vec{F} = - \vec{\nabla} \phi$$

$$\vec{\nabla}^2 \phi = - 4\pi G \rho$$

La réaction à ces tentatives a été exprimée dans cette phrase de W. Kauffmann, dix ans plus tard : "Au lieu de toutes ces tentatives sans succès visant notamment à décrire mécaniquement les phénomènes électriques et magnétiques, ne pouvons-nous pas réduire la mécanique à l'étude des réactions électriques ? Si tous les atomes de la matière consistent dans un agglomérat d'électrons (selon la thèse de J.J. Thomson) alors son inertie résulte de cette structure".

Dans la Table IX, c'est Einstein qui décrit le caractère révolutionnaire de la théorie de Maxwell ; il y compare le rôle de Faraday et Maxwell à celui de Galilée et Newton. Et dans la Table X, Boltzmann caractérise la notion moderne de modèle en physique moderne.

Au début du XX<sup>e</sup> Siècle la dualité matière-force était exprimée d'une part par les équations de Lorentz des électrons et d'autre part par les équations de Maxwell du champ électromagnétique qui détermine la force qui agit sur ces électrons (Tables XI).

Ainsi arrivons-nous à la fin du XIX<sup>e</sup> Siècle, et au début du XX<sup>e</sup>, avec la découverte de l'électron par J.J. Thomson, avec la théorie

T A B L E I X

"The most fascinating subject at the time that I was a student was Maxwell's theory. What made this theory appear revolutionary was the transition from forces at a distance to field as fundamental variables. The incorporation of optics into the theory of electromagnetism, with its relation of the speed of light to the electric and magnetic absolute system of units as well as the relation of the refraction coefficient to the dielectric constant, the qualitative relation between the reflection coefficient and the metallic conductivity of the body -it was like a revelation".

EINSTEIN, *loc. Cit.*

T A B L E X

Les équations différentielles de la phénoménologie physico-mathématique ne sont évidemment autre chose que des règles pour former et combiner des nombres et concepts géométriques, ceux-ci ne sont à leur tour que des images mentales avec lesquelles sont prédites les apparences. En tout cas, il semble que d'un ensemble global de faits nous ne pouvons jamais avoir une description directe mais plutôt une description mentale. Par conséquent nous ne devons pas dire avec Ostwal " ne faites pas une image" mais plutôt "introduisez dans cette image le nombre le plus petit possible d'éléments arbitraires".

L. BOLTZMANN, *Ann. Phys. un Chemie* 60, 231 (1897).

T A B L E X I

DUALISME MATIERE-FORCE  
d'après  
la théorie de Maxwell-Lorentz

Matière

Equation des charges

$$m \frac{d^2 \vec{x}}{dt^2} = e \left\{ \vec{E} + \frac{\vec{v} \wedge \vec{B}}{c} \right\}$$

Force

Equations de champ

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{D} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} + \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{H} - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{j}$$

de Lorentz qui a cherché à décrire la matière et ses atomes à partir de leur structure électronique.

D'après plusieurs physiciens de cette époque les lois fondamentales de la Nature étaient toutes connues ; il ne resterait aux futurs physiciens qu'à les appliquer aux événements divers pour les décrire -un travail non plus de science pure, mais plutôt de science appliquée, de technologie.

PLANCK, EINSTEIN, LORENTZ, POINCARÉ

Ce fut exactement à ce moment-là que deux hommes de génie ont découvert les bases de deux nouvelles théories, révolutionnaires par rapport à la physique classique, et qui seules pourraient rendre compte de certains phénomènes nouveaux qui échappaient à l'explication des idées établies.

Planck, comme vous le savez, a attaqué le problème de la distribution spectrale de l'énergie de la radiation en équilibre thermique dans une cavité fermée et opaque -le problème de la radiation du corps noir- et la solution qu'il a trouvée, l'a conduit à établir les fondements du modèle quantique de Bohr, un modèle qui, à son tour, a trouvé ses fondements mathématiques en 1925, dans la mécanique quantique.

Si le travail de Planck, en l'année 1900, a rompu (malgré ses souhaits ...) avec la physique classique, il a été consolidé par

Einstein en 1905, avec sa théorie des photons.

Encore en 1905, comme vous le savez tous, Einstein a jeté les bases de la théorie de la relativité restreinte.

On a appris à cette époque que les équations de Maxwell et les équations de Lorentz n'étaient pas invariantes par rapport au groupe de Galilée, ces équations n'admettant pas le groupe de la mécanique classique. Tandis que ce groupe implique une vitesse de la lumière qui dépend de l'état du mouvement de la source, les équations de Maxwell impliquent que la vitesse de la lumière dans le vide n'a pas cette dépendance. Tandis que Lorentz a cherché des formules de transformation de coordonnées qui impliqueraient une contraction des longueurs nécessaire pour rendre compte de certaines expériences (comme celle de Michelson-Morley), Poincaré en bon mathématicien qu'il était, a établi les transformations linéaires et inhomogènes des coordonnées spatiales et du temps qui laissent invariantes les équations de Maxwell.

#### EINSTEIN ET LA PHYSIQUE RELATIVISTE

Ce fut le mérite d'Einstein de résoudre ces questions en tant que physicien. Il a montré que l'invariance de la simultanéité d'événements distants dans l'espace ordinaire, entraîne l'existence de signaux avec une vitesse infinie, une hypothèse d'ailleurs de la mécanique classique. Si l'on abandonne cette hypothèse, inspiré

par la théorie des champs de Maxwell, et si l'on postule l'existence d'une vitesse de signal lumineux finie, maximale, alors le temps doit se transformer, tout comme les coordonnées, quand on change de système de référence. Il arriva ainsi aux mêmes formules du groupe de Lorentz inhomogènes, établies mathématiquement par Poincaré, et essentiellement devinées par Lorentz -le groupe de transformation que nous appelons aujourd'hui le groupe de Lorentz inhomogène ou groupe de Poincaré. Ce fut le grand mérite d'Einstein de discuter à fond, et avec une extraordinaire éloquence, la signification physique profonde du groupe de Poincaré et de ses conséquences. Nous lui devons encore l'idée de poser la question des symétries comme un élément fondamental d'une théorie au lieu de chercher à les déduire des équations du mouvement, si celles-ci sont connues. Il jeta ainsi les bases physiques de la théorie de la relativité restreinte et en particulier établit la fameuse relation d'équivalence entre la masse et l'énergie -une proposition avec de profondes implications philosophiques et qui a trouvé sa démonstration spectaculaire en physique nucléaire et en physique des particules.

Le principe de relativité restreinte affirme qu'il est impossible, au moyen d'expériences physiques réalisées à l'intérieur d'un laboratoire fermé, de dire où ce laboratoire est situé dans l'espace à trois dimensions, quelle est l'orientation de sens des trois axes dans cette espace, il est encore impossible de distinguer une origine absolue du temps initial des expériences réalisées à

l'intérieur du laboratoire et on ne peut pas détecter une vitesse constante du laboratoire -on ne sait pas s'il est au repos ou en mouvement par rapport à un autre laboratoire. Ce principe présuppose évidemment que nous sommes plongés dans une partie de l'Univers où ces conditions se réalisent. Un laboratoire fermé situé à la frontière de l'Univers si celui-ci était fermé, devrait être capable de détecter sa situation.

Ce fut le grand mérite de H. Minkowski d'introduire un formalisme basé sur un calcul tensoriel quadridimensionnel, qui s'est révélé la forme naturelle de la théorie de la relativité et d'après lequel les transformations de Poincaré traduisent une espèce de rotation suivie d'une translation dans l'espace-temps : l'espace constitué du temps et des trois coordonnées spatiales. Dans ce formalisme les équations relativistes revêtent une forme concise et élégante (Table XII).

De la théorie de la relativité restreinte nous avons donc hérité l'établissement avec force de la notion de symétrie des lois physiques. Si les lois physiques établissent des rapports entre variables associées à des objets et à des événements, le principe de la relativité établit des contraintes sur les lois physiques, il a le caractère d'une super-loi. Et de cette théorie résulte la notion de relativité de la simultanéité et des longueurs, d'énergie et d'impulsion, des champs électriques et magnétiques.

T A B L E X I I

DUALITE MATIERE FORCE  
 en théorie de Maxwell-Lorentz  
 d'après  
 la relativité restreinte

Matière

Force

Equation des charges

Equation du champ

$$m_0 c^2 \frac{d^2 z^\mu}{ds^2} = - e F^{\mu\nu}(z) \frac{dz_\nu}{ds}$$

$$\partial_\nu F^{\mu\nu}(x) = e j^\mu(x)$$

$$z^\mu = z^\mu(s)$$

$$j^\mu(x) = \int \frac{dz^\mu}{ds} \delta^{(4)}(x - z(s)) ds$$

$$ds^2 = dz^\mu dz_\mu$$

$$F^{\mu\nu} = \partial^\nu A^\mu - \partial^\mu A^\nu$$

Ces équations sont invariantes par rapport au groupe de Poincaré

$$x'^\mu = a^\mu + \ell^\mu_\nu x^\nu$$

ou

$$\ell^\mu_\alpha g_{\mu\nu} \ell^\nu_\beta = g_{\alpha\beta}$$

$g_{\alpha\beta}$  est la métrique de l'espace :

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

L'espace se transforme dans le temps et vice versa comme on le voit dans la formule du "boost" de Lorentz :

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad y' = y, \quad z' = z$$

$$t' = \frac{t - v/c^2 x}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

une affirmation qui s'étend aux duos énergie-impulsion, densité de courant-vecteur courant, qui constituent des quadri-vecteurs. Le caractère relatif de la valeur des grandeurs physiques, qui n'ont un sens que si l'on spécifie l'état du mouvement du laboratoire et du système objet-appareil, ce caractère relatif est accompagné de propositions qui ont un caractère absolu - les lois physiques qui établissent la corrélation entre ces mesures sont, elles, invariantes par rapport au groupe de Poincaré, valables donc dans tous les systèmes inertiels - absolues, dans ce sens.

## EINSTEIN ET LA THEORIE RELATIVISTE DE LA GRAVITATION

Après l'achèvement de la théorie de la relativité, Einstein a concentré ses efforts à la généraliser, c'est-à-dire, à répondre à la question posée par Ernest Mach : pourquoi les systèmes inertiels se distinguent-ils physiquement de tous les autres systèmes de coordonnées ? Est-ce que l'indépendance des lois de la physique par rapport à l'état de mouvement du laboratoire doit être restreinte

aux mouvements rectilignes et uniformes ? En même temps Einstein essayait de traiter le champ de gravitation d'après la théorie de la relativité restreinte. Tandis que la théorie de Newton était naturellement non relativiste (Table VII) les équations du champ électromagnétique et les équations des électrons classiques étaient incorporées d'une façon naturelle dans le cadre de la relativité restreinte (Table XII). La tentative de généraliser l'équation de Poisson dans une équation de D'Alembert, le champ et sa source étant scalaires, des invariants relativistes, n'a pas eu de succès, y compris parce que l'égalité, masse d'inertie-masse de gravitation, ne pouvait y être établie de façon simple et naturelle et parce que la densité de masse n'est pas une composante d'un quadrivecteur ni un scalaire.

Ce fut la comparaison des forces soi-disant fictives -Coriolis et centrifuges- dans un système en rotation d'une part avec une force de gravitation homogène- et leur possible élimination par un choix approprié de système de référence, dans les deux cas, a conduit Einstein à la découverte du principe d'équivalence. Voilà l'énoncé de ce principe : il est impossible, au moyen d'expériences physiques réalisées à l'intérieur d'un laboratoire fermé, de dire si ce système est en mouvement uniformément accéléré avec une accélération  $-\vec{\gamma}$ , vers le haut, sous aucun champ de gravitation, ou si au contraire, le laboratoire est un système d'inertie sur lequel agit un champ de gravitation homogène, vers le bas, les corps tombant avec l'accélération  $\vec{g}$ , où  $|\vec{\gamma}| = |\vec{g}|$ . Ce principe n'est possible que s'il y a une égalité exacte entre la masse d'inertie et la masse gravitationnelle.

A partir de ces expériences de pensée sur l'ascenseur qui tombe en chute libre, Einstein a eu recours au formalisme de Minkowski pour dire que, en général, lorsqu'on réfère la distance infinitésimale entre deux points à un système arbitraire, cette distance s'exprime d'après l'équation (1) ci-dessous où les fonctions  $g_{\mu\nu}(x)$ , de point et du temps, sont les composantes d'un tenseur symétrique. Grâce à Marcel Grossmann, Einstein a appris la géométrie de Riemann et le calcul différentiel absolu de Ricci et Levi Civita. Et sa grande intuition créatrice l'a fait ériger comme postulat que le champ de gravitation est le tenseur  $g_{\mu\nu}(x)$ . Il a en même temps cherché les variables et les équations de l'espace physique. Dans ses propres mots : "Nous savons avec certitude un cas spécial, celui d'un "espace libre de champ" tel qu'il est considéré dans la théorie de la relativité restreinte". Un espace est caractérisé par la distance élémentaire  $ds^2 = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2$ . Répéré à un système arbitraire cette quantité s'écrit :

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^\mu dx^\nu . \quad (1)$$

"Si, après cette transformation, les dérivées premières de  $g_{\mu\nu}(x)$  ne s'annulent pas, il existe un champ gravitationnel par rapport à ce système..."

Puisque la densité de masse, source du champ de Poisson, est équivalente à une densité d'énergie d'après la relativité restreinte et comme celle-ci la caractérise comme une des composantes d'un tenseur, le tenseur énergie-impulsion,  $T_{\mu\nu}$ , il est clair que la nouvelle équation doit contenir  $T_{\mu\nu}$  comme source. La partie différentielle qui remplacerait le laplacien du postulat newtonien devrait donc être un tenseur du second ordre, contenant des dérivées secondes du potentiel gravitationnel,  $g_{\mu\nu}$ , ainsi que de ses dérivées premières, une équation du type :

$$B_{\mu\nu}(g_{\alpha\beta}, \partial_\lambda g_{\alpha\beta}, \partial_\lambda \partial_\nu g_{\alpha\beta}) = K T_{\mu\nu}$$

Après plusieurs années de recherches, de tentatives et d'erreurs, Einstein a découvert finalement sa fameuse équation en 1915. Il a identifié  $g_{\mu\nu}$  avec le champ de gravitation, et dans la géométrie de Riemann il a trouvé les outils pour découvrir la forme de  $B_{\mu\nu}$ . En réalisant un travail pratiquement seul, conduit par son imagination exceptionnelle, il a été conduit à appliquer le calcul différentiel absolu à son monde physique à quatre dimensions ; et ce calcul avec la géométrie de Riemann lui ont fourni les éléments géométriques pour son équation du champ gravitationnel.

Une intuition prenait, le long de ses recherches, corps en son esprit, selon laquelle l'espace physique est dynamiquement associé à la gravitation, la dynamique gravitationnelle est décrite par la géométrie de l'espace. Comment trouver ces variables et les équations

qui traduisent mathématiquement cette intuition ? La table XIII nous présente une synthèse sur les équations de la théorie. La condition que dans un voisinage suffisamment petit, on puisse établir un système de référence (tangential) localement inertiel, c'est-à-dire dans lequel disparaissent localement les effets de la gravitation, est d'une importance fondamentale. C'est la forme générale du principe d'équivalence. De ce système on peut alors passer à un autre également inertiel au moyen d'une transformation de Lorentz locale. C'est ainsi qu'on introduit la notion de spineur  $\psi(x)$  en relativité générale : invariant par rapport à une transformation générale de coordonnées, mais se transformant comme un spineur de Dirac sous ces transformations locales de Lorentz.

La théorie relativiste de la gravitation a prédit des effets qui ont été observés en accord avec la prédiction, parmi lesquels le déplacement du périhélie de Mercure, la dépendance de la marche des horloges et des longueurs par rapport à la gravitation. Et c'est elle qui est à la base de la cosmologie moderne. D'autres effets tels que l'existence des singularités, les trous noirs, les ondes gravitationnelles sont l'objet de recherche et d'étude.

La relativité générale a imprimé en Einstein une conception mathématicienne de la connaissance physique, évoquant d'une certaine façon les conceptions de Pythagore et de Platon.

T A B L E X I I I

L'EQUATION DU CHAMP GRAVITATIONNEL D'EINSTEIN

Transformations générales des coordonnées

$$x'^{\mu} = f^{\mu}(x^0, x^1, x^2, x^3) \quad \mu = 0, 1, 2, 3$$

de jacobien  $j = \left| \frac{\partial f^{\mu}}{\partial x^{\nu}} \right| \neq 0$

A partir de la relation différentielle

$$dx'^{\mu} = \frac{\partial f^{\mu}}{\partial x^{\nu}} dx^{\nu}$$

on postule la notion de vecteur

$$A' (x') = \frac{\partial f^{\mu}}{\partial x^{\nu}} A^{\nu}(x)$$

La distance élémentaires est

$$ds^2 = g_{\mu\nu}(x) dx^{\mu} dx^{\nu}$$

à chaque point on associe  $g^{\alpha\beta}(x)$

$$g^{\alpha\beta}(x) g_{\beta\lambda}(x) = \delta^{\alpha}_{\lambda}$$

ces tenseurs font monter et descendre les indices :

$$B_{\mu}(x) = g_{\mu\nu}(x) B^{\nu}(x)$$

où

$$B'_{\mu}(x') A'^{\mu}(x') = B_{\alpha}(x) A^{\alpha}(x)$$

conduit à

$$B'_{\mu}(x') = \frac{\partial x^{\nu}}{\partial x'^{\mu}} B_{\nu}(x)$$

Tenseur en général :

$$T' \begin{matrix} \mu_1 & \dots & \mu_m \\ \nu_1 & \dots & \nu_n \end{matrix} (x') = \frac{\partial x^{\mu_1}}{\partial x'^{\alpha_1}} \dots \frac{\partial x^{\mu_m}}{\partial x'^{\alpha_m}} T \begin{matrix} \alpha_1 & \dots & \alpha_m \\ \beta_1 & \dots & \beta_n \end{matrix} (x) \frac{\partial x^{\beta_1}}{\partial x'^{\nu_1}} \dots \frac{\partial x^{\beta_n}}{\partial x'^{\nu_n}}$$

La dérivée d'un vecteur ne conduisant pas à un tenseur il faut la remplacer par une dérivée covariante telle que :

$$\nabla_{\mu}' F'^{\alpha}(x') = \frac{\partial x^{\nu}}{\partial x'^{\mu}} \frac{\partial x'^{\alpha}}{\partial x^{\beta}} \nabla_{\nu} F^{\beta}(x)$$

et on exprime en termes de l'affinité  $\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}(x)$

$$\nabla_{\mu} F^{\alpha} = \partial_{\mu} F^{\alpha} + \Gamma^{\alpha}_{\mu\nu} F^{\nu}$$

$$\nabla_{\mu} F_{\alpha} = \partial_{\mu} F_{\alpha} - \Gamma^{\nu}_{\mu\alpha} F_{\nu}$$

L'affinité joue le rôle d'un champ de jauge et s'exprime en fonction du potentiel gravitationnel  $g_{\mu\nu}$  :

$$\Gamma^{\alpha}_{\mu\nu}(x) = \frac{1}{2} g^{\alpha\lambda} (\partial_{\mu} g_{\lambda\nu} + \partial_{\nu} g_{\lambda\mu} - \partial_{\lambda} g_{\mu\nu})$$

L'algèbre des dérivées covariantes conduit au tenseur de Riemann, le tenseur de courbure :

$$[\nabla_{\mu}, \nabla_{\nu}] F_{\alpha}(x) \equiv R^{\lambda}_{\alpha\nu\mu} F_{\lambda}(x)$$

où

$$R^{\lambda}_{\alpha\nu\mu} = \partial_{\nu} \Gamma^{\lambda}_{\alpha\mu} - \partial_{\mu} \Gamma^{\lambda}_{\alpha\nu} + \Gamma^{\eta}_{\alpha\mu} \Gamma^{\lambda}_{\eta\nu} - \Gamma^{\eta}_{\alpha\nu} \Gamma^{\lambda}_{\eta\mu}$$

c'est la contraction de ce tenseur

$$R_{\mu\nu} = R^{\lambda}_{\mu\alpha\nu} \delta^{\alpha}_{\lambda}$$

qui est unique, qui donne lieu au tenseur  $R_{\mu\nu}$ .

La combinaison

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R$$

a alors l'importante propriété d'avoir une divergence covariante nulle, propriété que nous imposons au tenseur énergie impulsion (qui se conserve en l'absence d'un champ de gravitation). D'où l'équation postulée par Einstein en 1915

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -K T_{\mu\nu}$$

où  $T_{\mu\nu}$  est la densité d'énergie impulsion de la matière, qui y entre comme la source du champ de gravitation. Ces équations, non-linéaires, ont été l'objet de recherche pendant des décennies, par Einstein lui-même et ses collaborateurs.

En particulier, Einstein et Léopold Infeld ont montré que l'équation de mouvement d'une particule classique dans un champ de gravitation, à savoir l'équation de la géodésique :

$$\frac{d^2 z^\mu}{ds^2} + \Gamma^\mu_{\alpha\beta} \frac{dz^\alpha}{ds} \frac{dz^\beta}{ds} = 0$$

sont contenues dans les équations du champ : une synthèse matière-force achevée pour la première fois en physique.

Une synthèse similaire est achevée dans les théories des champs de jauge. Le postulat selon lequel toutes les interactions sont décrites par de tels champs conduit à une synthèse matière-force puisque les champs de jauge sont exigés par le principe selon lequel l'équation de la matière est invariante par rapport à des transformations de phase locale appartenant à un certain groupe.

Voici ce qu'il écrit dans un essai sur la méthode de la physique théorique "Les physiciens (du temps de Newton) étaient plutôt, pour la plupart, pénétrés de l'idée que les concepts fondamentaux et les lois fondamentales de la physique ne sont pas, dans le sens logique, des inventions libres de l'esprit humain, mais qu'on peut les déduire des expériences par "abstraction", c'est-à-dire par une voie logique. A vrai dire, c'est seulement la théorie de la relativité générale qui a clairement reconnu l'inexactitude de cette conception, car elle montra qu'on pouvait, avec un fondement, s'écartant beaucoup de celui de Newton, expliquer le domaine respectif des faits expérimentaux d'une manière même plus satisfaisante et plus complète que ne le permettait le fondement de Newton". Et plus bas : "D'après notre expérience jusqu'à ce jour, nous avons le droit d'être convaincus que la nature est la réalisation de ce qu'on peut imaginer de plus simple mathématiquement. Je suis persuadé que la construction purement mathématique nous permet de trouver ces concepts et les principes les reliant entre eux, qui nous livrent la clef de la compréhension des phénomènes naturels. Les concepts mathématiques utilisables peuvent être suggérés par l'expérience, mais ils ne peuvent, en aucun cas, en être déduits".

Voilà les lignes générales du grand achèvement d'Einstein en physique, voilà ses préoccupations épistémologiques (Table XIII), la Table XIV vous récapitulera cette grande aventure épistémologique.

Je passe sous silence son oeuvre substantielle dans le domaine

T A B L E X I V

LES GRANDES UNIFICATIONS EN PHYSIQUE

GALILÉE : symbolise l'unification Terre-Ciel, introduit définitivement la notion de Cosmos ouvert anti-aristotélicien, les notions d'inertie, l'égalité entre la masse d'inertie et la masse de gravitation. Le livre de la nature est écrit en langage mathématique et donc ses lois sont universelles.

NEWTON : découvre l'équation de mouvement des corps terrestres et la généralise à tous les corps dans l'univers soumis à une force universelle d'action à distance, la force de gravitation . Une constante universelle qui caractérise ces forces est établie G.

MAXWELL : unifie l'optique, l'électricité et le magnétisme et introduit la notion de champ (avec Faraday) et une constante universelle c.

J.J. THOMSON : découvre l'électron et donc la charge e.

LORENTZ : unification de l'optique avec l'électromagnétisme et la chimie, avec sa théorie classique de l'électron : absorption, diffusion et réfraction de la lumière, propriétés optiques des métaux, effet Zeeman. Nous devons à Lorentz la notion de renormalisation de masse. L'énergie totale du champ électrostatique d'un électron placé à l'origine du laboratoire est

$$U = \frac{1}{8\pi} \int \vec{E}^2 d^3x$$

$$\text{où } \vec{E} = \frac{e}{r^3} \vec{r}$$

est le champ coulombien valable à l'extérieur d'une sphère de rayon  $a$  ayant l'électron comme centre et dont la charge est à la surface de cette sphère. Le calcul donne

$$U = \frac{e^2}{2} \int_a^\infty \frac{dr}{r^2} = \frac{e^2}{2a}$$

D'après Lorentz la masse de l'électron serait donnée par l'énergie de son champ,  $\frac{U}{c^2}$  ; cette expression étant infinie pour  $a = 0$ , on doit lui ajouter une composante mécanique  $m_0$  :

$$m = m_0 + \frac{e^2}{2c^2 a}$$

L'idéal de Lorentz était d'attribuer la masse au seul champ et donc de poser

$$m_0 = 0$$

d'où pour le rayon de la sphère de l'électron

$$a \geq \frac{e^2}{2mc^2} = r_0$$

On introduisit ainsi une constante  $r_0$  pour donner une idée de la dimension linéaire de l'électron.

PLANCK : découvre la quantification de l'énergie et introduit  
1900 la constante du quantum d'action,  $\hbar$ .

EINSTEIN : la lumière est aussi constituée de photons avec énergie  
1905 et impulsion  $E = \hbar \omega$   $\vec{p} = \hbar \vec{k}$ ,  $\omega$  et  $\vec{k}$  étant les variables fréquence et nombre d'ondes définies par l'onde associée au photon.

EINSTEIN  
POINCARÉ

LORENTZ : découvrent la théorie de la relativité restreinte, basée  
1905

sur un groupe fondamental que doivent posséder les équations de la physique (en absence de gravitation) le groupe de Lorentz inhomogène ou groupe de Poincaré.

**EINSTEIN** : établit la signification physique de la relativité, 1905  
découvre l'équivalence masse énergie  $E = mc^2$ .

**BOHR** : remplace le modèle classique de l'atome de Thomson- 1913  
Lorentz par un modèle quantique qui tient compte des contributions de Planck et Einstein dans ce domaine ; explique l'origine du spectre des éléments, affirme l'existence d'états stationnaires discrets des atomes.

**EINSTEIN** : découvre la théorie relativiste de la gravitation. 1915  
Identifie la dynamique gravitationnelle avec la géométrie de l'espace physique. Introduit le projet et l'idéal de la géométrisation de la physique.

Après les pythagoriciens 2000 ans auparavant, après Platon, Galilée et Newton, Einstein propose l'explication de l'Univers en termes de géométrie. Et c'est lui qui en 1917 fait naître la cosmologie moderne.

**PAULI** : découverte du principe d'exclusion. 1925

**DE BROGLIE** : unification des notions opposées corpuscule-onde. 1924  
En niant Parménide et Aristote selon lesquels un objet ne peut pas à la fois, être et ne pas être, le corpuscule est concentré, mais sa probabilité de présence peut être partout dans l'espace.

SCHRÖDINGER

HEISENBERG

BORN

DIRAC

1925 -

1926

: la construction de la mécanique quantique, la théorie universelle des objets et événements atomiques qui identifie les états possibles d'un système physique avec les vecteurs d'un espace de Hilbert. La connaissance fondamentale des choses ne peut pas avoir les qualités de certitude et de causalité géométrique construites par Einstein dans sa relativité et qu'il voulait étendre à toutes les théories des phénomènes physiques.

PAULI

HEISENBERG

DIRAC

1927 -

1929

: extension de la mécanique quantique à la théorie des champs. Description de la production et de l'annihilation de particules. Abandon de l'idée de corpuscules immuables. Le vide est un système dynamique dans lequel il y a fluctuation de champs. Equation de Dirac.

STUCKELBERG

FEYNMAN

SCHWINGER

TOMONAGA

DYSON

1948

: découverte de la méthode de la renormalisation capable d'éliminer des difficultés de divergence de certaines théories quantiques de champs, telles que l'électrodynamique.

WEINBERG

SALAM

GLASHOW

'T HOOFT ET

AL.

1967

: les éléments fondamentaux de la matière leptons et quarks, appartiennent à un espace de représentation d'un groupe de jauge, les champs de force

découlent du postulat d'invariance des équations de la matière par rapport à ce groupe. Mais les masses et les champs physiques résultent d'une certaine brisure de symétrie, au moyen de certains champs appelés de Higgs. L'espoir est d'unifier ainsi les forces faible, électromagnétique et forte dans le cadre de ces conceptions. Il manque encore l'unification avec la gravitation et des nouvelles questions et de nouveaux mystères surgissent. Le nombre et la nature des champs introduits sont des problèmes ouverts ; ainsi que toute une collection de nouvelles particules, gluino, photino, gravitino et d'autres que prédit la supersymétrie.

L'idéal d'unification entre le champ de gravitation et le champ électromagnétique que poursuivait Einstein pendant les dernières trente années de sa vie et qu'il n'a pu bâtir en théorie a néanmoins produit ses fruits sous la forme d'une idéologie héritée par les générations suivantes des physiciens. Cet idéal est la base des théories des champs de jauge actuelles.

politique, je n'ai pas le temps non plus pour discuter ses conceptions sur le caractère probabiliste de la connaissance que postule la mécanique quantique, les fondements desquels il a contribué à bien éclairer à travers ses discussions avec Niels Bohr.

C'est un privilège pour nous tous de vivre à l'époque d'Einstein. Particulièrement, j'ai eu le privilège, quand j'allais de l'Université de Princeton à l'Institute for Advanced Study pour discuter avec Pauli, avec qui je travaillais en 1944 et 1945, de rencontrer Einstein dans le chemin, qu'il parcourait chaque soir, entre l'Institut et sa maison à Mercer Street. La vision d'Einstein, simple et souriant, semblait rayonner comme un prophète sorti des pages des livres sacrés. On le voyait toujours dans le théâtre Mc Cornick du campus de Princeton, dans les concerts de Wanda Landowska de Rudolf Serkin, de l'orchestre d'Adolphe Bush, du fameux quatuor de Budapest. Einstein allait également aux conférences à l'Institut et à l'Université, parmi lesquels celle de Bertrand Russell, sur la confrontation qu'inévitablement se produirait entre les Etats Unis et L'union Soviétique après la guerre. Et à Fine Hall son séminaire sur la dernière forme de la théorie de l'unification a attiré une grande audience. Ce fut un privilège pour moi de le voir et de l'entendre, à coté de Hermann Weyl, Von Neumann et Dirac. Ce fut un privilège d'avoir eu l'amitié, à cette époque et quelques années plus tard, de Wolfgang Pauli et Robert Oppenheimer, d'Oscar Klein et Hideki Yukawa, de Richard Feynmann, de Salomon Lefschetz; le mathématicien

et d'Américo Castro, l'humaniste, de Sandoval Vallarta, Marcos Moshinsky, d'Abraham Pais et Jack Steinberger, de Josef Maria Jauch, de C.N. Yang et Ning Hu.

Son oeuvre est certainement imprégnée de ce que disait Aristote sur les Pythagoriciens : "les éléments des nombres sont les éléments de toutes les choses et le ciel tout entier est une échelle musicale". Et le Dieu subtil qu'invoquait Einstein comme le géomètre de l'Univers serait peut-être aussi le Dieu des cantates de Bach.

---

Je remercie H. Barreau pour ses commentaires et suggestions.

## RESUMO

Neste trabalho discute-se a evolução das idéias que constituem a descrição física do mundo, desde a escola de Mileto até a imagem atual que resulta das teorias de campos de calibre que tentam uma unificação das forças do Universo. Pitágoras, Heráclito e Parmênides, a cosmogonia de Platão, a física de Aristóteles, o sistema do mundo Galileo-Newtoniano, Maxwell e Lorentz, Einstein significam concepções precursoras da teoria de hoje de Salam, Weinberg e Glashow.

Palavras-chave: Filosofia da natureza; Mundo newtoniano; Relatividade geral; Campos de calibre (gauge); Unificação das interações