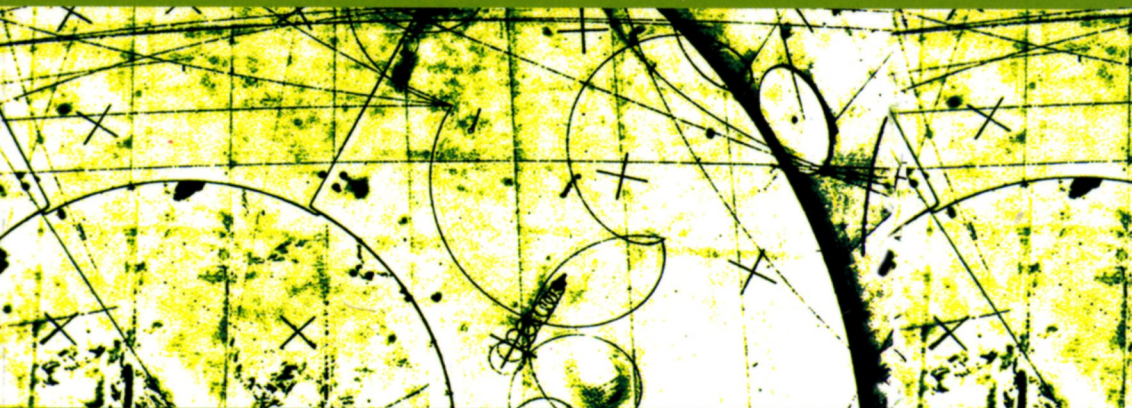


Bruno Escoubès et José Leite Lopes



Sources et évolution de la *physique quantique*

Textes fondateurs





Sources et évolution de la physique quantique

Textes fondateurs

José LEITE LOPES

et

Bruno ESCOUBÈS



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Une précédente édition de ce livre a été publiée en 1994 aux Éditions *Masson*.

Ouvrage publié avec le concours du Centre national du livre.

ISBN : 2-86883-815-4

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

© EDP Sciences 2005

AVANT-PROPOS

Nous sommes heureux de présenter une ré-impression de l'ouvrage de José Leite Lopes et Bruno Escoubès, *Sources et évolution de la physique quantique. Textes fondateurs*, dont la première édition, parue en 1994¹, avait été très vite épuisée. La réédition était demandée par beaucoup, et les auteurs-organisateurs de ce précieux recueil de textes et leurs ayants-droits nous en ont confié la charge. Elle était particulièrement opportune en cette « Année internationale » de la physique, décidée par l'ONU² et lancée par l'UNESCO à l'occasion du centenaire de la publication des travaux de l'« année d'or » d'Einstein, puisque les textes rassemblés s'inscrivent dans la suite directe de ces recherches pionnières, dégagant ce qui apparaissait peu à peu comme la voie royale de la physique de la matière élémentaire, atomique, nucléaire et subnucléaire.

Cet ouvrage est susceptible d'aider à renouer, sur des problématiques contemporaines, le fécond et nécessaire dialogue des sciences avec la philosophie. Ces « textes fondateurs » sont dus à la plume de physiciens importants du XX^e siècle, et les organisateurs du recueil sont également physiciens.

J. Leite Lopes, qui fut l'élève de Wolfgang Pauli et de José-Maria Jauch lors de ses années de doctorat aux États-Unis, ami de Richard Feynman, de David Bohm, et de nombreux autres physiciens prestigieux, est connu internationalement par ses travaux, notamment sur les interactions faibles (on lui doit une première esquisse de leur unification avec les interactions électromagnétiques dans le domaine quantique) ; il fut lui-même l'un des pionniers de la physique théorique au Brésil, grand professeur et créateur d'institutions qui ont formé des générations de chercheurs du Brésil et d'Amérique latine. Homme de progrès, il fut proscrit par la dictature militaire qui sévit dans son pays des années 1960 jusqu'au début des années 1980. Nourri de culture française, c'est en France qu'il trouva l'accueil qui lui permit la poursuite de ses travaux : à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg où il a enseigné jusqu'à sa retraite, reprenant ensuite ses activités au Brésil où il se trouve aujourd'hui.

Pendant son séjour en France, il engagea de fructueuses collaborations avec les physiciens expérimentateurs, et promut des dialogues riches et stimulants avec des chercheurs d'autres disciplines, et notamment des philosophes, suscitant la fondation du Séminaire sur les Fondements des Sciences de

¹ Aux éditions Masson (Paris).

² Lors de sa 58^e Assemblée Générale.

l'Université Louis Pasteur-Strasbourg-1³. La collaboration entre José Leite Lopes et Bruno Escoubès (1938-1999), physicien expérimentateur des particules, chercheur au CNRS, également intéressé par les questions de fondements et de méthodologie⁴, a pris naissance dans ce cadre, enrichie par des rapports personnels d'amitié. Bruno Escoubès n'aura malheureusement pas le plaisir de voir republié le livre *Sources et évolution de la physique quantique*, où il s'était grandement investi, puisqu'il nous a quittés prématurément, encore en pleine activité, en 1999⁵.

Ce livre est donc de part en part l'ouvrage de physiciens et il intéressera au premier chef les praticiens de cette discipline par les perspectives qu'il leur rappellera dans ce domaine. Mais en même temps on saisira très vite, à la lecture, comment il déborde les aspects spécialisés d'une discipline scientifique, en faisant revivre à nos yeux toute une aventure intellectuelle et ses enjeux. Il intéressera, à ce titre, très largement au-delà de la physique, ceux qui se préoccupent de la formation des idées scientifiques, des nouveaux concepts et des théories, de la nature et du rôle de l'expérimentation, et des implications plus générales de la nouvelle physique sur les conceptions de la connaissance et du monde matériel.

À cet égard il est utile de reprendre des éléments du commentaire que l'un d'entre nous en donnait pour accueillir la première édition⁶.

« Pour ceux qui travaillent dans la recherche, la physique va toujours de l'avant, de sorte que le "centre de gravité" des représentations qu'ils s'en font est toujours un petit peu au-delà du présent. Avant même d'avoir terminé l'analyse expérimentale et théorique des phénomènes observés, ils sont déjà en train d'en prévoir d'autres, que la force d'entraînement des premiers réclame – car les explications ne sont jamais fermées, et nécessitent quelque chose en plus. Pour les autres, les non-spécialistes, et jusqu'à un public relativement large, les conceptions de la physique contemporaine font désormais partie de notre univers intellectuel, à tel point que les descriptions et les commentaires qu'on

³ Fondé, au début des années 1970, et animé par J. Leite Lopes, Hervé Barreau et l'un d'entre nous (MP), ce séminaire eut un rôle important pour favoriser les dialogues interdisciplinaires. Il nourrit la publication de *Cahiers* et, jusqu'au début des années 1990, de la revue *Fundamenta Scientiæ*. C'est sur l'initiative de J. Leite Lopes que fut organisé, en 1974, le Colloque *Un demi-siècle de Mécanique Quantique*, qui compta, essentiellement grâce à son intermédiaire, avec des collaborations prestigieuses ; voir la publication : J. Leite Lopes et M. Paty (eds.), *Quantum mechanics, a half century later*, Reidel, Dordrecht, 1977. (Il en existe une version préliminaire avec une partie des textes en français, publiée comme *Cahiers Fundamenta Scientiæ* (ULP, Strasbourg), n°s 25 à 41 : cette publication peut être consultée dans diverses bibliothèques, notamment la Bibliothèque Universitaire de Strasbourg et la Bibliothèque Nationale de France).

⁴ Il a notamment donné un ouvrage apprécié sur les méthodes statistiques en physique : B. Escoubès, *Probabilités et statistiques à l'usage des physiciens*, éditions Ellipses, Paris, 1998.

⁵ La vie, les travaux et les engagements de Bruno Escoubès sont évoqués dans la brochure à Bruno Escoubès. *Hommages et témoignages*, CNRS, Strasbourg, 29 septembre 1999.

⁶ M. Paty, [C-r de lecture] « J. Leite Lopes et B. Escoubès, *Sources et évolution de la physique quantique*. Textes fondateurs », Lettre des Départements scientifiques du CNRS. Physique nucléaire et corpusculaire, IN2P3, n° 19, oct.-déc. 1994, 26-27.

en donne sont toujours actualisés, formulés dans des termes d'aujourd'hui, comme s'ils l'avaient toujours été, participant d'une connaissance intemporelle et énoncés une fois pour toutes, bien que l'on sache que la physique évolue et que l'on attende toujours son fin mot.

En sorte que l'on en oublie les tâtonnements anciens et les surgissements périodiques d'idées nouvelles qui ont marqué toute son histoire. Cela vaut d'ailleurs pour les accomplissements relativement récents : tendus vers la recherche du sixième quark ou des bosons de Higgs, l'on en oublie presque que ce qui les a motivés, les symétries de jauge, ont fait un jour leur apparition, elles-mêmes suscitées dans la pensée théorique par des problèmes antérieurs... Si nous dévidons, à partir de ce que nous savons aujourd'hui de la physique des particules élémentaires et des champs quantifiés, le fil des questions et des découvertes, qui sont inextricablement d'ordre expérimental et d'ordre théorique, c'est tout le développement de la physique atomique et quantique qui se présente à nous. Telle est l'aventure que nous proposent J. Leite Lopes et B. Escoubès – comme une cure de rajeunissement pour une discipline déjà riche et quelque peu âgée, plutôt qu'un simple album de souvenirs – en nous donnant à lire et en nous présentant l'ensemble de textes fondateurs réunis dans ce livre.

Quelle fraîcheur, en effet – et quel plaisir intellectuel – de lire, dans les termes mêmes de leurs inventeurs, dans le halo parfois incertain, parfois déjà étrangement précis, de leur apparition, de leur nouveauté, les énoncés de cette physique qui s'élabore peu à peu, de la découverte de la radioactivité à la recherche de la symétrie des champs unifiés. Il était, bien entendu, nécessaire de faire un choix parmi l'abondante production d'idées et de résultats couvrant tout un siècle – depuis la découverte faite par Becquerel –, et portant sur un vaste domaine. Celui-ci inclut, en effet, la physique des rayonnements et de l'atome, la physique quantique sous sa première forme, semi-classique, puis comme mécanique quantique, prolongée en théorie quantique des champs, les physiques atomique et nucléaire, celle du rayonnement cosmique, enfin la physique des particules élémentaires, prolongée dans l'« astroparticule » actuelle et la cosmologie des premiers instants de l'Univers.

Le choix proposé par J. Leite Lopes et B. Escoubès se fonde sur le fait que la théorie des particules élémentaires s'identifie aujourd'hui à la théorie quantique des champs, et que l'axe théorique de tous ces développements – très bien indiqué par le titre de leur ouvrage – est celui de l'élaboration de la théorie quantique, qui culmina un temps avec la mécanique quantique non relativiste, mais qui a pris décidément depuis la direction – relativiste – de la théorie quantique des champs, de l'électrodynamique quantique aux champs de jauge unifiés.

Une fois prise la décision de privilégier la physique théorique sous son aspect fondamental, dans la ligne indiquée, le choix des textes apparaît judicieux. Ceux qui ont été retenus comptent parmi les plus significatifs de l'élaboration de la physique quantique, de la radioactivité à la mécanique quantique et à la théorie quantique des champs, tout en restant généralement accessibles au-delà des jargons techniques – et ne serait-ce pas là, d'ailleurs, la définition de ce que l'on pourrait appeler désormais « les grands classiques » ? Ils sont répartis en chapitres, introduits par un commentaire, toujours éclairant, qui les

situe dans leur contexte et évoque les autres travaux qui les ont rendus possibles ainsi que ceux, également importants, mais qui ne pouvaient trouver leur place dans ce précieux recueil. Le résultat est une présentation de tout un pan de la physique contemporaine, à travers la lecture directe de certains de ses textes fondateurs, telle qu'elle s'est constituée grâce à l'invention d'idées nouvelles conçues pour la formulation et la résolution des problèmes posés par la structure de la matière.

La plupart des textes choisis sont des articles originaux – souvent d'accès difficile, notamment en langue française. Quelques-uns sont de nature expérimentale, comme ceux de Becquerel sur la radioactivité, de Rutherford sur l'existence du noyau atomique, de Uhlenbeck et Goudsmit sur la mise en évidence du spin de l'électron. D'autres sont plus « phénoménologiques », comme celui de Pauli sur le principe d'exclusion, ou celui de Fermi sur la statistique qui porte son nom. D'autres, enfin, sont de nature plus « fondamentale » du point de vue théorique, et ce sont les plus nombreux, en raison du principe qui a présidé à la sélection. Ils concernent tout d'abord l'hypothèse des quanta de Max Planck et d'Albert Einstein. De la période intermédiaire entre les premières idées sur les quanta et l'élaboration de la mécanique quantique, les auteurs ont retenu l'article de S.N. Bose sur la statistique des particules de spin entier.

L'absence des articles fondamentaux d'Einstein de cette période intermédiaire, celui de synthèse de 1915 (« Vers une théorie quantique du rayonnement », republié en 1916), qui fut le point de départ de tous les travaux ultérieurs, vers la mécanique ondulatoire comme vers la mécanique quantique, et ceux de 1924-1925 sur ce qui devait s'appeler la « statistique de Bose-Einstein », s'explique par le fait que ces textes sont devenus des classiques, republiés et plus faciles à trouver⁷. L'élaboration des mécaniques ondulatoire et quantique est présente par des articles de Louis de Broglie, Erwin Schrödinger, Werner Heisenberg, ainsi que celui de Max Born établissant à la fois l'« approximation de Born » en théorie des perturbations et l'interprétation probabiliste de la fonction d'onde. Celle de la mécanique quantique relativiste nous est donnée avec l'article original de Paul A.M. Dirac. Les questions d'interprétation au sens général, caractéristiques de la mécanique quantique, ne sont pas absentes, représentées par Niels Bohr et la complémentarité, ainsi que par les considérations de Fritz London et Edmond Bauer sur la réduction du paquet d'onde⁸.

L'élaboration de la théorie quantique des champs et les développements récents sont confiés à des rétrospectives, plus accessibles et synthétiques que les contributions originales – telles la découverte par Richard Feynman des intégrales de chemin, contée par son auteur de la manière la plus vivante, ou l'invention de la théorie électrofaible évoquée par Steven Weinberg dans son

⁷ Les Annales de la Fondation Louis de Broglie (1979, 1982) en ont donné naguère des traductions, et l'édition en français des Œuvres choisies d'Einstein (6 vols., Seuil, Paris, 1989-1993) a incorporé de nouvelles traductions de ces articles dans le premier volume, sur *Les Quanta* (1989).

⁸ Il aurait fallu un autre volume entier pour couvrir tout ce domaine, comme par exemple le livre de recueil de textes de John A. Wheeler et Wojciech H. Zurek, *Quantum theory of measurement*, Princeton University Press, Princeton, 1983.

Discours de réception du Prix Nobel – ; ils sont aussi l'objet de prospectives, par la reprise d'un texte de Pierre Fayet, qui sert de conclusion ouverte sur l'avenir, avec les perspectives offertes aujourd'hui à l'unification. Un appendice sur la physique nucléaire au cours des années 30 dans différents pays et une bibliographie complètent l'ensemble. Au total, on ne peut que se féliciter de l'heureuse initiative prise par José Leite Lopes et Bruno Escoubès en mettant sous nos yeux un ensemble aussi riche d'idées et aussi exemplaire d'inventivité, qui témoigne à l'évidence pour la créativité du travail scientifique, avec ceci de remarquable que les formes inventées nous rendent intelligible la constitution matérielle du monde où nous vivons. »

Ces textes représentent des moments marquants de l'histoire de la physique contemporaine et de son développement, tant par le mouvement de la pensée qu'ils rendent manifeste pris dans leur ensemble, que par leurs incidences implicites ou explicites sur les problèmes de la philosophie de la connaissance. Cette réédition, qui se présente sous la forme d'un fac-similé, n'appelait pas de changement particulier par rapport à la première, et nous avons également jugé bon de garder la préface, tout à fait pertinente, que Jean-Marc Lévy-Leblond, professeur émérite à l'Université de Nice, avait donnée pour la première édition à la demande des auteurs. Nous remercions vivement José Leite Lopes et Salomé de Unamuno Escoubès, légataire de son époux décédé, de nous avoir confié cet ouvrage, de nous avoir fourni tous les éléments pour sa publication, et de ne pas avoir désespéré au vu des difficultés éditoriales rencontrées.

Michel PATY
et Jean-Jacques SZCZECINIARZ

TABLE DES MATIÈRES

Préface	XI
----------------------	----

Chapitre 1 : De l'atomisme grec à la découverte de la radioactivité

1.1 Les intuitions grecques	1
1.2 L'atomisme	3
1.3 La dynamique	4
1.4 La cosmologie	6
1.5 La synthèse newtonienne	7
1.6 Les découvertes du XIX ^e siècle	9
<i>Article I – H. Becquerel : Découverte de la radioactivité</i>	11

Chapitre 2 : De la relativité à la première quantification

2.1 La théorie de la relativité	13
2.2 Planck et la quantification de l'énergie ; Einstein et les photons ..	16
2.3 Les modèles atomiques, de Thomson à Bohr	18
<i>Article II – M. Planck : Quantification de l'interaction rayonnement- matière</i>	20
<i>Article III – A. Einstein : Le photon</i>	28
<i>Article IV – E. Rutherford : La mise en évidence du noyau</i>	41

Chapitre 3 : La construction de la nouvelle mécanique

3.1 Le principe d'exclusion et le spin de l'électron. La condensation de Bose	57
<i>Article V – W. Pauli : Le principe d'exclusion</i>	63
<i>Article VI – G.E. Uhlenbeck et S. Goudsmit : Le spin de l'électron</i>	78
<i>Article VII – E. Fermi : La statistique des fermions</i>	81
<i>Article VIII – S. Bose : La statistique des bosons</i>	85
3.2 La mécanique quantique	89
<i>Article IX – L. de Broglie : La longueur d'onde associée à la matière</i>	92
<i>Article X – E. Schrödinger : L'équation non relativiste des ondes de De Broglie</i>	99
<i>Article XI – W. Heisenberg : La mécanique des matrices</i>	112
3.3 L'interprétation probabiliste de la mécanique quantique	126

<i>Article XII – M. Born : L'indéterminisme quantique</i>	129
<i>Article XIII – N. Bohr : Le principe de complémentarité</i>	133
<i>Article XIV – F. London et E. Bauer : Le problème de la mesure en physique</i>	153

Chapitre 4 : De la mécanique quantique relativiste à la théorie quantique des champs

4.1 La mécanique quantique relativiste : l'anti-matière	189
<i>Article XV – P.A.M. Dirac : L'équation d'onde relativiste de l'électron</i> . .	194
4.2 L'électrodynamique quantique	209
4.3 La quantification par l'intégrale de chemin	210
4.4 Les diagrammes de Feynman pour les propagateurs de l'électron et du photon	212
4.5 Le positon et la marche de l'électron vers le passé	215
4.6 La renormalisation des théories quantiques des champs	217
<i>Article XVI – R.P. Feynman : L'électrodynamique quantique</i>	219

Chapitre 5 : Les grandes heures de la physique des particules

5.1 Le neutrino de Pauli	241
5.2 Le neutron	242
5.3 Le champ de mésons de Yukawa	243
<i>Article XVII – H. Yukawa : La prédiction du méson</i>	246
5.4 Les accélérateurs et les détecteurs de particules	255
5.5 La découverte des mésons : la désintégration des pions et des muons	256

Chapitre 6 : Vers l'unification des interactions

6.1 Les particules élémentaires et le modèle SU(3) de Gell-Mann	261
6.2 Les champs de jauge et les interactions fortes	270
6.3 Le modèle standard d'unification des interactions électromagnétique et faible	275
<i>Article XVIII – S. Weinberg : L'unification électro-faible</i>	279
6.4 La super-unification	296
<i>Article XIX – P. Fayet : L'unification de toutes les interactions ?</i>	299

Appendice – La physique nucléaire dans les années 30 aux États-Unis, en France, au Japon et au Brésil	307
---	-----

Bibliographie	311
--------------------------------	-----

Index	313
------------------------	-----

PREFACE

Pourquoi (re)lire les classiques ?

On n'imagine pas un écrivain qui n'aurait pas lu Proust et Faulkner, un philosophe qui n'aurait pas travaillé Husserl et Sartre, un musicien qui n'aurait pas écouté Stravinski et Messiaen, un peintre qui n'aurait pas regardé Picasso et Malevitch. Mais on ne s'étonne pas qu'un physicien n'ait pas lu Einstein ni Heisenberg – pour nous en tenir à ce siècle : la comparaison entre la fréquentation par leurs successeurs respectifs de Rabelais et Cervantes, Descartes et Kant, Monteverdi et Mozart, Titien et Goya d'une part et Galilée et Newton de l'autre, n'est que trop éloquente. On a même théorisé cette amnésie constitutive : “ une science qui hésite à oublier ses fondateurs est condamnée ” a pu écrire Whitehead au début de ce siècle. Il est vrai que la science se laissait encore prendre pour le parangon du progrès.

Nous abandonnons à peine cette belle mais naïve vision. C'est le développement même de la science qui nous y contraint. On aurait bien surpris les jeunes chercheurs d'il y a trente ans en leur annonçant qu'à la fin de ce siècle, l'un des domaines les plus actifs et les plus prestigieux de la physique théorique serait la dynamique non-linéaire, héritière directe de la “ vieille ” mécanique du 19^e, par-dessus trois quarts de siècle de physique “ moderne ”, quantique et relativiste. On les aurait choqués plus encore en leur apprenant que la physique des particules et interactions fondamentales, après 50 ans de domination peu contestée sur la physique “ de pointe ”, allait probablement connaître à son tour une phase de récession.

Aussi pourrait-on voir avec quelque malice le présent recueil des grands textes originaux qui ont jalonné le développement de la physique atomique, puis nucléaire et subnucléaire, comme ces albums de souvenir nostalgiques que les grandes stars feuilletent au soir de leur carrière pour se rappeler leurs succès passés.

La physique contemporaine a bien sûr d'autres sources et a connu d'autres évolutions, ne serait-ce que dans les domaines de l'astrophysique et de la cosmologie, de la physique des solides et des matériaux, de la physique statistique et de la dynamique des fluides, par exemple, pour se retrouver toute entière dans cette histoire.

Il n'en demeure pas moins que *cette* physique, celle de la plongée vers l'élémentaire de la matière et le fondamental de sa pensée (même si l'un et l'autre sont toujours plus élusifs, d'ailleurs), a connu au cours de ce siècle des succès majeurs et qui resteront dignes d'admiration. La lutte des théoriciens pour rompre avec des représentations trop familières et pour construire de nouveaux concepts adéquats à la compréhension du monde dans ces cantons nouveaux de notre expérience ne saurait être sous-estimée. Il est bon de pouvoir revivre “ en direct ” ces efforts admirables, et d'en retrouver la vigueur et la complexité, trop souvent affadies ou aseptisées dans les manuels d'enseignement et les livres de vulgarisation.

On peut d'ailleurs formuler le vœu qu'un second volume de cette entreprise vienne bientôt rendre hommage au travail des expérimentateurs qui ne fut pas moindre : Bohr sans Rutherford, de Broglie sans Davisson et Germer, Fermi (théoricien) sans Fermi (expérimentateur), Feynman sans Lamb, ne peuvent illustrer qu'une face des médailles commémoratives des triomphes de cette physique. Que ces travaux pratiques n'aient pas connu, hors du milieu professionnel, la même notoriété que les recherches théoriques, et n'aient pas fait l'objet d'autant d'exégèses philosophiques et métaphysiques souvent douteuses ne fait que renforcer la nécessité de corriger une vision par trop désincarnée de la science contemporaine.

A propos de ces exégèses d'ailleurs, la vulgate des commentaires épistémologiques et historiques sur la théorie quantique, et beaucoup d'idées reçues sur son "interprétation" et ses implications, seront sérieusement mises à mal par le retour aux sources que nous offre ce livre ; ce n'est pas l'un de ses moindres mérites. On constatera ainsi, non sans un étonnement porteur d'intéressantes questions, qu'Einstein n'utilise pas le terme de "photon", ni Rutherford celui de "noyau" : plus surprenant encore, les articles fondateurs de de Broglie ne font aucune mention de la "longueur d'onde" en tant que telle, et celui d'Heisenberg élimine d'emblée la position de l'électron des grandeurs "observables". Quant à Born, c'est dans une note de repentir ajoutée lors de la correction des épreuves qu'il interprète comme probabilité le carré de la fonction d'onde ! En d'autres termes, les idées nouvelles une fois découvertes, il reste à les dégager de leur gangue et à les polir, à les transformer en paradigme, comme on dirait aujourd'hui. Mais c'est une autre histoire – à suivre ...

Le présent ouvrage, cependant, s'il est certes un monument à la gloire d'une noble discipline, n'est pas pour autant un cénotaphe. C'est que la physique fondamentale, si elle n'est plus seule au faite de la renommée, reste encore vivante et riche de problèmes et de promesses. La difficulté même des tâches qu'elle affronte désormais rend certainement nécessaire le développement d'idées neuves. Rien de plus utile dans ces conditions qu'un retour au passé. L'histoire des sciences abonde en situations où l'innovation a surgi d'œuvres anciennes dont certaines potentialités sont restées incomprises ou négligées (ainsi de la récente relecture des travaux de Poincaré, après plusieurs décades d'oubliettes). Il est tout à fait plausible que nombre de textes fondateurs, comme ceux ici rassemblés, recèlent, dans la confusion inéluctable des commencements, d'utiles indications pour aujourd'hui ou demain.

Il faut donc lire ces textes, non seulement comme des témoignages du passé, mais comme des appels du futur. C'est dire que, de fait, nous devons considérer Einstein et Heisenberg *comme* Proust et Faulkner, Husserl et Sartre, Stravinski et Messiaen, Picasso et Malevitch. Physiciens, encore un effort pour être cultivés !

Jean-Marc Lévy-Leblond
Nice, février 1994

AVANT-PROPOS

Remonter aux sources, aborder les événements – découvertes et interrogations – qui fondèrent la physique du XX^e siècle, comme le firent ceux qui s'intéressèrent les premiers aux dimensions du monde quantique, et par là recréèrent la nature à travers ses particules et les forces s'exerçant entre elles, voici le but de ce livre. Il propose, en effet, la lecture d'articles originaux choisis depuis la découverte de la radioactivité, et replacés dans leur cadre historique, allant de la vision des philosophes présocratiques à celle des physiciens d'aujourd'hui, ces derniers basant leur connaissance du monde sur l'étude des leptons, des quarks et de leurs interactions.

Quels articles ? Si, bien sûr, les plus importants n'y figurent pas tous, ceux qui ont été choisis eurent et ont toujours une importance capitale. Les uns furent à l'origine de percées théoriques et expérimentales qui bouleversèrent nos conceptions de la structure de la matière. D'autres, comme l'exposé de F. London et E. Bauer, furent considérés par leurs collègues comme essentiels en tant que mises au point sur des problèmes âprement disputés comme le fut – et comme l'est – le problème de la mesure en mécanique quantique. Les deux conférences Nobel de R.P. Feynman et S. Weinberg sont, en plus du témoignage personnel de la démarche de chacun vers la découverte, des résumés de "l'état de l'art" à leur époque dans les domaines de l'électrodynamique quantique et des théories d'unification.

Ce faisant, nous sommes conscients que nous nous privons de de la contribution d'auteurs aussi importants que E. Wigner ou C.N. Yang, pour ne citer qu'eux. Tout choix entraîne des regrets.

En quelle langue ? A quelques éclatantes exceptions près, la langue de la physique avant 1933 fut l'allemand. Quand Einstein reçut, pour donner son avis, l'article de Bose ici reproduit, il le traduisit en allemand afin de lui assurer une meilleure diffusion. Pour faciliter l'accès à des textes parfois ardu, nous avons adopté le français pour tous les textes, y compris ceux écrits en anglais et en italien. Nous mentionnerons pour chaque article le nom de son traducteur. Et nous avons pu indirectement bénéficier pour cette tâche, de collaborateurs aussi prestigieux que A. Proca ou L. Rosenfeld.

Ce livre se présente donc comme une série d'étapes historiques, pourvues des jalons nécessaires à la compréhension des textes choisis dans l'anthologie, textes donnés quant à eux sans commentaires. L'approche privilégie celle du physicien théoricien, même si on a pris soin de signaler les principales découvertes expérimentales. Des approches complémentaires sont présentées dans la bibliographie à la fin de l'ouvrage, parmi lesquelles l'on peut souligner le très beau livre de E. Segrè, et, plus spécifique, celui de R.N. Cahn et G. Goldhaber.

Nous voulons remercier ici tous ceux qui ont rendu ce livre possible. Et tout d'abord les physiciens de Strasbourg qui ont participé à la traduction des articles : MM. Henri Braun, Georges Frick, Jean Klein, Georges Oberlechner pour l'allemand ; et Mme Clara Matteuzzi-Cundy, de Milan et du CERN, pour l'italien.

Nous remercions également la Fondation Nobel de nous avoir permis de reproduire les Conférences Nobel choisies, les Editions du Seuil et Laffont pour les traductions d'Einstein et de Feynman, les éditeurs des revues où furent publiés les articles choisis ; le Niels Bohr Archive ; les Presses Universitaires de France, les éditions Hermann et la Société Française de Physique.

Nous tenons aussi à remercier M. Georges Weil, du Centre de Calcul du CNRS de Strasbourg et Mme Alice Tissier, du Centre de Recherches Nucléaires, pour leur précieuse aide lors de la saisie du texte.

Chapitre 1

De l'atomisme grec à la découverte de la radioactivité

1.1 Les intuitions grecques

Quelle est l'image physique du monde aujourd'hui ? Comment a-t-elle évolué à travers l'histoire ?

Les spéculations sur la structure de l'Univers constituèrent toujours une part importante des systèmes philosophiques et des modèles cosmogoniques des anciennes civilisations. En Asie, au Moyen Orient, en Afrique, dans les Amériques, les sociétés anciennes ont produit de belles réalisations dans leur approche mythique de la nature, dans leurs monuments, dans leur génie artistique et technologique, dans leurs observations astronomiques, dans leur philosophie de l'espace, du temps, de la matière, de la vie et de la mort, dans toutes ces créations qui reflètent leur rapport au monde.

Si, durant des milliers d'années, existèrent des éléments de culture avancée dans d'autres civilisations, il revint aux Grecs d'inventer les mathématiques comme représentation des principes permanents du monde, de pratiquer la philosophie comme spéculation scientifique sur la nature des choses, des corps célestes, de l'Univers, tout en développant leur propre imaginaire mythique, religieux et artistique.

Bertrand Russel ¹ écrivait : “ *Dans toute l'histoire, rien n'est plus surprenant ni plus difficile à expliquer que l'éclosion subite de la civilisation en Grèce* ”. Et dans son beau livre ² sur la philosophie des mathématiques et des sciences de la nature, Hermann Weyl affirmait : “ *Nous devons aux Grecs une compréhension claire de la nature intime de la structure de l'espace qui se manifeste dans les relations entre configurations et dans ses lois de relations mutuelles, et qui est quelque chose d'entièrement rationnel* ”.

Avant les Grecs, les Babyloniens et les Egyptiens avaient déjà fait, pendant des siècles, des observations du mouvement du soleil et de la lune par rapport aux étoiles fixes, et savaient comment prédire les éclipses lunaires et solaires. Mais les Grecs tentèrent les premiers de comprendre l'Univers en tant que tel. Alors que leur mythologie assimilait les corps célestes à des dieux, Anaxagore affirma que le Soleil était semblable à une pierre chauffée au rouge et que la Lune était faite comme la Terre. Pour les disciples de Pythagore, à la fin du 5^e siècle avant J.-C., la Terre était sphérique ; Aristarque de Samos, au 3^e siècle avant J.-C. découvrit le système

¹ Bertrand Russel, *History of western philosophy*, Unwin Paperbacks, London 1979.

² H. Weyl, *Philosophy of mathematics and natural sciences*, Princeton University Press, Princeton 1949.

héliocentrique, et Erathostène, aux environs de 200 ans avant J.-C., calcula, d'après Claudius Ptolémée, la distance maximale entre le Soleil et la Terre.

A Pythagore on attribue l'origine du mot *théorie*, un état de contemplation rempli de passion et d'affinité, origine de la connaissance mathématique et de la physique théorique. Chez Thalès, fondateur de l'Ecole de Milet, qui prédit une éclipse de Soleil survenue en 585-584 avant J.-C., nous trouvons l'idée de l'existence d'une *substance primordiale*, un élément fondamental dont seraient faites toutes les choses, et qu'il identifie avec l'eau. " *C'est, pense-t-on, pour l'avoir appris des Egyptiens, qu'Homère et Thalès posaient l'eau comme le principe et l'origine de toutes choses* " ³. Anaximandre, de Milet, affirme que toutes les choses sont faites d'une *substance fondamentale*, qui n'est ni l'eau, ni *aucun des corps que nous connaissons* : elle est infinie, éternelle, elle est la matière de tous les mondes, notre monde n'étant qu'un monde parmi beaucoup d'autres. Il existerait, suivant Anaximandre, une proportion définie de feu, de terre et d'eau ; chacun de ces éléments, conçus comme des dieux, tente de dominer les autres, mais sa proportion obéit à une fatalité, à une certaine *nécessité* : cette nécessité d'une proportion entre les éléments annonce la notion de *loi de la nature*.

Pour Anaximène, un autre penseur de Milet (antérieur à 494 avant J.-C.), la substance primordiale est l'air, le feu étant l'air raréfié, l'air se condensant se transforme en *eau*, celle-ci se condensant en pierres, en *terre* ; la cohésion du monde serait assurée par une espèce de respiration – une notion qui sera substituée au XIX^e siècle par l'*éther*, substance dont le rôle serait de transmettre à travers l'espace les actions physiques.

Cette approche matérialiste de la nature s'accompagne d'une intuition qui se révélera féconde.

Pour Pythagore, *toutes les choses sont des nombres*. Aristote décrivait ainsi les Pythagoriciens : " *...comme, en plus ils voyaient que les nombres exprimaient les propriétés et les proportions musicales ; comme enfin toutes les autres choses leur paraissaient, dans leur nature, formées à l'image des nombres, et comme les nombres paraissaient être les réalités primordiales de l'Univers : dans ces conditions, ils considéraient que les principes des nombres sont les éléments de tous les êtres et que le Ciel entier est harmonie et nombres* " ⁴. Ce principe, qui situe les mathématiques au cœur de la réalité, évoluera sous différentes formes jusqu'à Galilée, Newton, puis Maxwell, Einstein et Dirac, et enfin jusqu'aux physiciens contemporains créant les théories et les modèles d'unification.

Que disons-nous aujourd'hui ? Les premiers éléments de toutes les choses se constituent en familles de particules, les *leptons* (comme l'électron), les *quarks* (constituants du proton, du neutron) et certains *champs de jauge* (comme le champ électromagnétique) qui déterminent leurs interactions et obéissent à des structures abstraites : des symétries ; une violation spontanée de certaines de ces symétries engendre la masse des particules et les forces se produisent à travers les *quanta*

³ Plutarque, cité dans *Les Présocratiques*, p 14, Gallimard, Paris 1988.

⁴ Aristote, *La Métaphysique*, A, 5, 985b, 25, Librairie Philosophique J. Vrin, Paris 1981.

des champs, gluons, gravitons, photons et bosons intermédiaires. Des quarks proviennent les hadrons, parmi lesquels les baryons ; les baryons (comme le proton, le neutron) donnent lieu aux noyaux des atomes ; des leptons (électrons) et des noyaux forment les atomes des corps que nous percevons. Des leptons, quarks, bosons, noyaux et atomes résulte une multitude de structures physiques (dont une structure pensante), l'ensemble formant un *cosmos*, devenu intelligible grâce à l'étude de ses éléments premiers constitutifs.

Autre conception antique qui préfigurait une approche moderne : parallèlement aux Milésiens et à leur recherche des principes unificateurs du monde, apparaît Héraclite qui, lui, pense cette unité du monde comme le résultat de la combinaison des contraires ; de plus il pense que " *l'un est formé de toutes les choses, et toutes les choses proviennent de l'un* " ⁵. Le feu est une substance primordiale, car il possède les propriétés de la matière, au moins la matière corporelle, mais il est *plus subtil*. Héraclite affirmait que les êtres mortels sont immortels, les immortels sont mortels, l'un vit de la mort de l'autre et meurt de la vie de l'autre ⁶. Les photons, nous le savons aujourd'hui, peuvent naître d'une annihilation de paires d'électron-positon, des paires de particule-antiparticule naissent de la mort d'un photon.

L'opposition des contraires, l'harmonisation de tensions opposées, comme pour *l'arc et la lyre*, telle est l'idée qui semble avoir longuement cheminé à travers de nombreux systèmes conceptuels, depuis la pensée d'Héraclite jusqu'au cœur de la science moderne : le principe fondamental de la conjugaison de charge en est un exemple.

1.2 L'atomisme

Les philosophes grecs fondateurs de l'atomisme furent Leucippe (vers 440 av J.-C.) et Démocrite (420 av J.-C.), influencés par le monisme de Parménide et de Zénon. Effectuant une sorte de synthèse des systèmes de Parménide et d'Empédocle, ils postulèrent que *toutes les choses sont composées d'atomes en incessant mouvement dans le vide* ; que les atomes sont indivisibles, qu'ils ont toujours été et qu'ils seront toujours animés de mouvement. Les atomistes admettaient le vide que refusera Aristote, ainsi que le déterminisme : *rien n'arrive par hasard*. La constitution atomique rend compte des différences de densité des corps, les transformations qui se produisent dans le monde sont conséquence des changements dans le temps des distances entre les atomes. Ceux-ci sont invisibles, rigides et impénétrables.

La doctrine de Démocrite et de Leucippe fut reprise par Epicure, et, ensuite, par Lucrèce au 1^{er} siècle avant J.-C.

Lucrèce écrivait dans son ouvrage *De la Nature* ⁷ :

⁵ " *Un est le savoir. Il connaît la pensée par qui sont gouvernées toutes choses au moyen de toutes choses* ", Diogène de Laërce cité dans *Les Présocratiques*, p 155, Gallimard, Paris 1988.

⁶ Voyez le fragment : " *Immortels, mortels, mortels, immortels ; vivant de ceux-là la mort, mourant de ceux-là la vie* ". Cf. *Les Présocratiques*, Héraclite, Fragments, p 160, Gallimard, Paris 1988.

⁷ Garnier-Flammarion, Paris 1964.

“ Les corps sont, d’une part les principes simples des choses, les atomes, et d’autre part, les composés formés par ces éléments premiers. Quant à ceux-ci, aucune force n’est capable de les détruire ; à toute tentative dans ce sens, ils résistent avec solidité. Du reste, si l’on n’admettait pas dans la nature un terme ultime de petitesse, les corps les plus petits seraient formés d’une infinité de parties, puisque chaque moitié posséderait toujours une moitié, et ainsi de suite jusqu’à l’infini. Quelle différence y aurait-il entre l’Univers lui-même et les corps les plus petits ? Aucune différence ne pourrait être établie : aussi petit ou aussi grand que l’on suppose l’univers, les corps les plus petits seraient, eux aussi, composés d’une infinité de parties. La raison se révolte contre cette conséquence et n’admet pas que l’esprit l’accepte ; pour cela, il est nécessaire que tu t’avoues vaincu et que tu reconnaisse qu’il existe des particules irréductibles à toute division et qui atteignent le degré ultime de petitesse ; et comme elles existent, il te faut reconnaître aussi qu’elles sont solides et éternelles ”.

Il est important de signaler que les atomistes n’adoptèrent pas l’idée de finalité, c’est-à-dire l’idée qu’un événement dans le futur détermine l’occurrence d’un événement du présent. Leur conception mécaniste des phénomènes, non téléologique, annonçait ainsi une dynamique qui se prêterait à une formulation mathématique, condition *sine qua non* d’une description exacte du mouvement. Mais entretemps, cette approche sera supplantée par la physique d’Aristote, essentiellement qualitative mais intégrée à la philosophie de la nature la plus cohérente et complète qu’ait produite la pensée antique.

1.3 La dynamique

Pour Aristote, les corps célestes et terrestres n’obéissent pas aux mêmes lois. Le ciel se caractérise par la régularité et l’invariance des mouvements. Sur Terre, les corps se transforment et tendent vers leur fin naturelle. Du point de vue dynamique, la force motrice d’un objet terrestre est directement proportionnelle à sa masse et inversement proportionnelle à la résistance opposée à son mouvement. Un objet mobile est donc soumis à une force motrice permanente durant son mouvement. Qu’un corps terrestre se meuve par sa propre inertie – idéal dynamique ne correspondant à aucune situation réelle – était pour Aristote une impossibilité logique et physique.

La pensée d’Aristote est systématisée durant les siècles qui suivent par les philosophes de la civilisation musulmane, notamment, au XI^e siècle, par Avicenne. Médecin et philosophe perse, auteur de *La Philosophie Illuminative*, il développe la pensée d’Aristote et est de ceux qui contribuent à préserver et à transmettre la culture grecque. Pour lui⁸, comme pour Aristote “ *Le temps est la mesure du mouvement* ”. Dans le *Rans’il*, une encyclopédie de 51 volumes, connue comme le *Coran après le Coran*, on trouve une liste des distances aux planètes (en fonction du rayon de la Terre) et des tailles de celles-ci ; il y est affirmé que l’espace “ *est*

⁸ Cf. C.W. Misner, K.S. Thorne, J.A. Wheeler, *Gravitation*, p 753, W.H. Freeman and Co, San Francisco 1973, d’où est tirée la citation.

une forme abstraite de la matière et qui n'a d'existence que pour la conscience ". Cette conception anticipe de nombreux systèmes philosophiques à venir.

La physique aristotélicienne n'est remise en question dans ses principes fondamentaux qu'au VI^e siècle après J.-C. par Jean Philopon, puis au XIV^e siècle par Jean Buridan et Nicolas Oresme, de l'Ecole des Nominalistes de Paris, et par Léonard de Vinci et Jean-Baptiste Benedetti⁹. Leurs travaux, ainsi que de nombreuses autres contributions, ont rendu possible l'éclosion de la physique moderne symbolisée par les travaux de Galileo Galilei au XVII^e siècle.

Jean Buridan propose la première formulation du concept de la quantité de mouvement, à laquelle est associée une notion primitive d'inertie, tandis qu'Oresme met en évidence une première corrélation entre l'accélération uniforme et une série croissante d'unités de temps (équivalente au carré du temps). La rupture avec la physique d'Aristote est consommée lorsqu'au XVII^e siècle Galilée énonce la première relation dynamique correcte permettant de définir la force comme fonction non de la vitesse – proportionnelle à la résistance au mouvement – mais d'un changement de vitesse¹⁰, c'est-à-dire d'une accélération – relative à l'inertie du mobile :

*" 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 consacré 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 quelles proportions, 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 temps égaux par un mobile partant du repos ont entre eux même rapport que les nombres impairs successifs à partir de l'unité. On a démontré 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 les esprits plus perspicaces que le mien exploreront les parties les plus cachées "*¹¹.

Le principe d'inertie se précise ensuite avec Descartes qui le définit comme rectiligne et universel. Les concepts fondamentaux de la future mécanique newtonienne étaient ainsi prêts à être intégrés au plus vaste édifice théorique qu'aura connu la physique jusqu'alors. Entretemps, la cosmologie aristotélicienne était, elle aussi, appelée à disparaître.

⁹ Cf. A. Koyré, *Du monde clos à l'univers infini*, Gallimard, Paris 1973.

¹⁰ Marie-Françoise Biarnais, in Postface, *Isaac Newton, Principia Mathematica*, C. Bourgois Editeur, Paris, 1985.

¹¹ Galilée, *Discours concernant deux sciences nouvelles*, Armand Colin, Paris 1970.

Mais si l'on n'a pas détecté les superpartenaires aujourd'hui, pourquoi les trouverait-on demain ? Ces particules, si elles existent, ne doivent pas en principe avoir des masses très supérieures à celle du W ($80 \text{ GeV}/c^2$), faute de quoi cette dernière se trouverait en quelque sorte "aspirée" vers des valeurs beaucoup plus grandes. Ce type d'argument indique que les masses attendues sont de préférence de l'ordre de la centaine de GeV/c^2 , ou au plus du TeV/c^2 ($1 \text{ TeV} = 1\,000 \text{ GeV}$). Il a été très utilisé, au début des années 1980, dans le cadre de la grande unification des interactions fortes, électromagnétiques et faibles. Ces théories rencontrent un grave problème, la masse du W ayant tendance à y être aspirée par l'énergie d'unification de ces trois interactions, au moins 10^{12} fois supérieure ! Les théories supersymétriques sont susceptibles de faciliter la résolution de ce problème, tant que les masses des superpartenaires ne dépassent pas l'ordre du TeV/c^2 .

Supersymétrie et unification

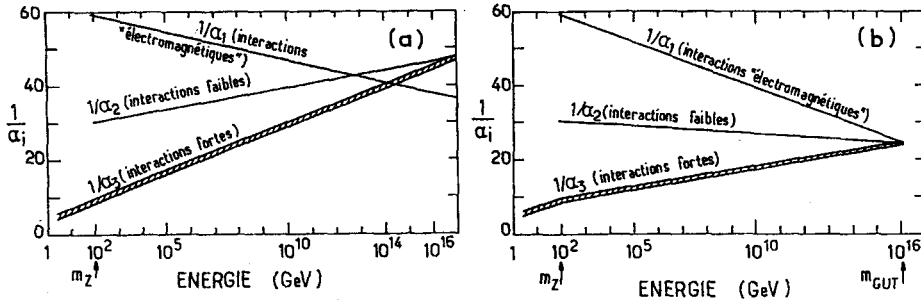
Dans l'approche de la grande unification, les médiateurs des interactions fortes, électromagnétiques et faibles (voir table 1) sont reliés, et le proton doit être très faiblement instable, se désintégrant par exemple en $\pi^0 e^+$, par transformation en lepton d'un de ses quarks constituants. La grande unification permet aussi de relier les intensités de ces trois interactions. Mais les prédictions du modèle le plus simple, tant en ce qui concerne la durée de vie finie du proton que les relations entre intensités des interactions, ont été infirmées par les résultats expérimentaux. Ces prédictions sont modifiées, dans le cadre des théories supersymétriques, par l'effet des superpartenaires et des nouveaux bosons de Higgs, et sont alors parfaitement compatibles avec les observations (figure). Ceci peut être considéré, de manière optimiste, à la fois comme un indice de l'existence des superpartenaires – et avec des masses pas trop élevées – et d'une unification entre les interactions, à une énergie de l'ordre de 10^{16} GeV , ou un peu plus.

Il s'agit là d'une énergie qui commence à se rapprocher de l'"énergie de Planck" ($G_{\text{Newton}}^{-\frac{1}{2}}$, soit environ 10^{19} GeV), où l'interaction gravitationnelle, extrêmement faible aux énergies usuelles, devient une interaction de forte intensité. C'est là que les quatre types d'interactions pourraient se fondre en une interaction unique.

À des énergies aussi énormes, les effets quantiques de la gravitation sont essentiels. Or la mécanique quantique et la relativité générale – qui décrit la gravitation – ne font pas bon ménage : dans les calculs apparaissent des quantités infinies, que l'on ne sait pas traiter de manière satisfaisante. Il semble que l'on doive alors quitter le cadre habituel de la théorie des champs décrivant des particules élémentaires ponctuelles, pour se représenter celles-ci comme des objets étendus tels que des cordes. L'espace pourrait alors être doté de dimensions supplémentaires, très petites, et les particules correspondraient aux divers états de vibration d'une corde minuscule ($\approx 10^{-33} \text{ cm}$), leurs interactions résultant de processus de fusion ou de séparation entre cordes. La supersymétrie joue un rôle essentiel dans cette approche, dite des supercordes. Il est très difficile de savoir si ces théories permettent de décrire les particules avec les symétries, les masses et les interactions que nous leur connaissons. Du moins imagine-t-on ainsi ce que pourrait être une "théorie ultime" unifiant toutes les interactions, à des énergies gigantesques qu'il n'est pas question d'atteindre directement. Mais les futurs accélérateurs LHC et SSC devraient permettre d'explorer l'échelle d'énergie du TeV , éclairant les mécanismes de

la différenciation entre interactions et de l'origine des masses. Et on a bon espoir de découvrir alors l'existence des superpartenaires, qui révélerait la supersymétrie comme invariance fondamentale des lois de la physique, au delà de la relativité générale.

Lien entre les intensités des trois interactions



Les paramètres α_1 , α_2 et α_3 , qui déterminent les intensités des interactions électromagnétiques, faibles et fortes sont en fait des fonctions lentement variables de l'énergie, dont on peut extrapoler le comportement à très haute énergie à partir des mesures actuelles. Dans une théorie de grande unification ces paramètres doivent converger à une énergie très élevée, pour laquelle les trois types d'interactions viendraient se fondre en une interaction unique. Le modèle le plus simple est maintenant exclu, cette convergence ne se produisant pas (a). Mais l'effet des superpartenaires sur l'évolution de ces trois paramètres conduit à une convergence remarquable (b), qui pourrait indiquer à la fois une unification entre interactions (vers 10^{16} GeV ou un peu plus), et l'existence de ces superpartenaires à des énergies pas trop éloignées.

Bibliographie

1. *Supersymmetry and Supergravity*, A Reprint Volume of Physics Reports, ed. M. Jacob (North Holland/World Scientific, 1986).
2. P. Fayet, *La Recherche* **19** 334 (1988) ; *Introduction to Supersymmetric Theories of Particles and Interactions*, in " Properties of SUSY Particles ", Proc. of the Erice Workshop, (1992), ed. by Cifarelli and Khoze (World Scientific, 1993) p.1.