

# **Le vrai roman des particules élémentaires**

**François Vannucci**

*Préface de Georges Charpak*

DUNOD

**LA Recherche**

## Du même auteur

*Les particules élémentaires* (avec M. Crozon), 1993, Ed. PUF, coll. « Que sais-je? »

*Les neutrinos vont-ils au paradis?*, 2002, Ed. EDP Sciences, coll. « Bulles de sciences »

*Le miroir aux neutrinos*, 2003, Ed. Odile Jacob

*Combien de particules dans un petit pois?*, 2003, Ed. Le Pommier

*L'homme est-il au centre de l'Univers?*, 2004, Ed. Le Pommier

*Qu'est-ce que la relativité?*, 2005, Ed. Le Pommier

*Marcel Proust à la recherche des sciences*, 2005, Ed. Le Rocher

*L'astronomie de l'extrême Univers*, 2007, Ed. Odile Jacob

*Atlas, le nouveau défi des particules élémentaires*, 2007, Ed. Ellipses

### Illustration de couverture : Interaction de neutrinos signant la découverte des courants neutres (1973).

© CERN

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2010

ISBN 978-2-10-055643-4

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), 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 ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

## PRÉFACE

J'aime la physique, j'apprécie le parcours de François Vannucci. Dans sa carrière de physicien, il eut le privilège de vivre des moments très forts. Il les relate dans ce livre; c'est une véritable épopée des temps modernes qu'il nous conte avec ses enjeux, ses succès et ses interrogations.

La physique des particules a vécu ses « trente glorieuses » au cours de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle. Avec la montée en puissance des accélérateurs, les découvertes se multiplièrent révélant la structure intime de la matière. Des concepts nouveaux se sont imposés et le lien entre infiniment petit et infiniment grand se fit de plus en plus prometteur. Ce fut une grande joie pour les chercheurs de voir se clore des domaines d'une complexité extrême grâce à l'exploitation des capacités techniques permises par des instruments nouveaux.

Dans les années 1960, les chemins de la connaissance n'étaient pas clairement identifiés, et les expérimentateurs allaient à la pêche en bombardant des cibles avec des particules de plus en plus énergiques. Petit à petit, la théorie a mis de l'ordre dans les découvertes. Idée après idée, elle s'est fermement construite pour indiquer la marche à suivre. Mais rapidement, elle s'est émancipée et elle arrive au point d'imaginer des phénomènes de plus en plus difficiles à vérifier expérimentalement. Aujourd'hui le futur n'est plus balisé avec assurance et l'on attend avec une certaine anxiété les résultats d'un dispositif gigantesque mis en service récemment au CERN pour savoir quelles directions restent à explorer.

François Vannucci nous fait un récit de cette quête toujours renouvelée, il ne se prive pas d'agrémenter le texte avec des témoignages personnels. Utilisant sa grande culture en physique des particules, il brosse

l'évolution historique de la discipline qui mena de l'étude artisanale des rayons cosmiques aux mesures programmées des appareillages géants construits auprès des derniers collisionneurs.

Aujourd'hui des milliards d'euros permettent à des milliers de physiciens d'attaquer de front des problèmes posés dans leur champ de recherche qui s'apparente parfois à une quête ésotérique. Des groupes puissants au budget de plus en plus élevés deviennent nécessaires pour aller de l'avant. La sociologie du milieu a peu à voir avec celle régnant dans les petits laboratoires universitaires d'antan.

Physicien de la génération qui suit la mienne, j'ai rencontré François Vannucci au CERN il y a bien des années. J'ai été frappé par son goût pour les sujets difficiles. Il eut la chance de participer à des expériences dirigées par des chefs de file prestigieux. Il s'est enivré du plaisir de chasser le gibier rare, et, quand il se mit à son compte, il choisit de se consacrer aux neutrinos. Ces particules mythiques offraient un défi de choix. À peu près indétectables bien que leur existence soit avérée, les neutrinos aiguisent les esprits imaginatifs. Au cours de cette recherche, il a su être l'inspirateur d'aventures exaltantes.

Le domaine des particules élémentaires est d'une énorme richesse ; il touche à la réalité du monde environnant, mais va bien au-delà. Avec les dernières découvertes, il explore l'origine même de notre Univers en simulant sur des dimensions minuscules les conditions qui régnaient aux infimes instants succédant au Big Bang.

Dans cet ouvrage, François Vannucci divulgue au grand public les secrets fascinants débusqués par la physique de l'infiniment petit. Il sait transmettre la synthèse des idées les plus complexes et j'espère que ce livre illuminera les esprits des plus jeunes en leur dévoilant la beauté de la recherche pure.

GEORGES CHARPAK

# PRÉAMBULE

« L'histoire a été dans tous les siècles une étude si recommandée, qu'on croirait perdre son temps d'en recueillir les suffrages. »

Louis de Saint-Simon

*Mémoires*

De quoi l'Univers est-il fait ? Comment a-t-il débuté et quel est son avenir ? Et subsidiairement, pourquoi existons-nous ? Et où allons-nous ? Voilà quelques questions que l'homme s'est toujours posées. Pour donner certains éléments de réponse, la physique des particules a étudié de plus en plus profondément la constitution ultime de la matière ainsi que les lois qui dictent les interactions entre objets fondamentaux. Or cette recherche est à la croisée des chemins.

L'empire de la science s'étend aujourd'hui entre les limites extrêmes de  $10^{27}$  m, taille de l'Univers actuel tel que nous pouvons l'analyser, et  $10^{-18}$  m, dimensions maximales des constituants élémentaires mis en évidence par l'expérience. Quelque part entre ces extrêmes, il y a l'homme, avec sa dimension caractéristique de l'ordre du mètre. Il semble, selon la percutante formule de Pascal : « ...un néant à l'égard de l'infini, un tout à l'égard du néant, un milieu entre rien et tout. » Le philosophe physicien ajoute : « Je ne vois que des infinités de toutes parts, qui m'enferment comme un atome et comme une ombre qui ne dure qu'un instant sans retour. »

Dans l'échelle des dimensions croissantes, l'homme a exploré tour à tour le relief terrestre puis la Terre dans sa globalité, le système solaire, notre galaxie et aujourd'hui l'Univers tout entier.

Dans la direction de l'infiniment petit, les progrès ont franchi les étapes successives des molécules, des atomes, des noyaux atomiques

pour aujourd'hui comprendre les constituants élémentaires. Sur ce front de l'infiniment petit, la quête a toujours tenté de répondre à la question : qu'y a-t-il encore plus profondément ?

C'est cette dernière aventure que ce livre veut raconter. Le niveau de l'exposé restera volontairement descriptif, la physique est une science d'abord expérimentale, mais on soulignera aussi les efforts constants de la théorie qui cherche à comprendre ce que la mesure met au jour et à canaliser les directions d'investigation. Sans cesse, l'idée de simplicité reste sous-jacente dans la complexité apparente, et si le rêve d'Einstein d'une description unifiée de tous les phénomènes n'est pas encore réalisé, les chercheurs poursuivent cette quête.

L'idée d'unification est depuis longtemps l'un des objectifs de la physique. Isaac Newton unifia le mouvement de la chute des corps avec celui des planètes en expliquant les deux phénomènes grâce à sa loi de gravitation universelle. Au XIX<sup>e</sup> siècle, James C. Maxwell continua dans cette voie en unifiant électricité et magnétisme au sein de la théorie électromagnétique. Plus près de nous, l'électromagnétisme et l'interaction faible se sont fondus dans l'interaction électrofaible. Il reste à arrimer l'interaction forte dans un moule commun, c'est le but de la « grande unification », et plus tard à associer peut-être la gravitation, c'est la tentative des théories de cordes.

L'homme est un roseau pensant, et s'il semble bien chétif devant l'Univers, il reprend la main grâce à sa compréhension des phénomènes. C'est encore Pascal qui parle : « Par l'espace, l'Univers me comprend et m'engloutit comme un point ; par la pensée, je le comprends. » Il nous dit aussi : « ... cependant il ne faut pas moins de capacité pour aller jusqu'au néant que jusqu'au tout ; il la faut infinie pour l'un et l'autre, et il me semble que qui aurait compris les derniers principes des choses pourrait aussi arriver jusqu'à connaître l'infini. L'un dépend de l'autre, et l'un conduit à l'autre. Ces extrémités se touchent et se réunissent à force de s'être éloignées. »

Merveilleuse prémonition, la pensée de Pascal se réalise aujourd'hui. Effectivement, la physique moderne démontre que les deux infinis ont partie liée. Les progrès réalisés sur le front de l'infiniment petit servent à encadrer les évolutions de l'Univers dans sa totalité, car il s'avère que la connaissance des particules est nécessaire pour expliquer les étapes du Big Bang. Entre les deux extrêmes, il y a résonance, et l'on verra qu'aujourd'hui les programmes de recherche menés dans les grands accélérateurs de particules sont en partie guidés par les grandes énigmes de l'infiniment grand.

# 1

## UNE HISTOIRE BIEN PARTICULAIRE

Au tournant du siècle dernier, en cette période de l'histoire qu'on appelle « la Belle Époque », précisément en l'an 1892, Lord Kelvin ose déclarer :

« Il n'y a plus rien à découvrir en physique. Il ne reste à faire que des mesures de plus en plus précises ». Il développe sa pensée en ajoutant :

« La physique est définitivement constituée dans ses concepts fondamentaux ; tout ce qu'elle peut désormais apporter, c'est la détermination précise de quelques décimales supplémentaires. Il y a bien deux petits problèmes : celui du résultat négatif de l'expérience de Michelson et celui du corps noir, mais ils seront rapidement résolus et n'altèrent en rien notre confiance ».

### Lord Kelvin

William Thomson (1824-1907) est plus connu sous le nom de Lord Kelvin. Il est surtout fameux pour ses contributions à la thermodynamique. Remarquant que la température d'un gaz est liée à son agitation thermique, il introduisit la notion de zéro absolu quand tous les atomes sont au repos. Le kelvin est aujourd'hui l'unité absolue des températures.

William Thomson fut anobli pour son travail sur le premier câble transatlantique. Il aimait proclamer des oracles. Un florilège de ses déclarations inclut : « Les rayons X se révéleront une mystification », ou encore : « La radio n'a pas d'avenir ».

Pour les savants en place à l'époque, les jeux étaient donc faits, la Nature obéissait à une mécanique certes très fine, mais totalement classique et calculable, qui n'avait plus de secret pour les initiés. De fait, on peut en partie comprendre cette attitude conquérante qu'exprime Kelvin. C'est le sentiment d'autosatisfaction qu'a le travailleur arrivé à la fin d'une tâche bien accomplie. Le XIX<sup>e</sup> siècle vécut en effet des réussites majeures dans l'approfondissement des connaissances. La mécanique newtonienne expliquait avec précision le mouvement des objets célestes (à l'exception du périhélie de Mercure). L'astronome Urbain Le Verrier pouvait mesurer l'invisible en postulant l'existence d'une planète inconnue, qu'il déduisait à partir d'une petite anomalie dans la trajectoire d'Uranus. C'est ainsi que fut découvert Neptune. La loi de la gravitation était un pilier sur lequel on pouvait s'appuyer sans états d'âme. De son côté, James C. Maxwell paracheva le couronnement de l'électromagnétisme en unifiant magnétisme et électricité, qui semblaient deux phénomènes totalement différents, en une théorie très élégante incluant la lumière qu'on expliquera comme une onde électromagnétique, une vibration de champs dont la fréquence caractérise la couleur.

Il restait pourtant à élucider quelques points obscurs : pourquoi, au contraire de tous les phénomènes connus, la vitesse de la lumière est-elle indépendante de tout mouvement relatif des repères dans lesquels elle se propage ? Quelle est l'origine des spectres d'émission lumineuse des éléments ? Mais pour Lord Kelvin, cela relevait du détail, celui derrière lequel on sait que le diable se cache. D'autant que ces anomalies dérangent le bon ordre des idées seulement dans des domaines très éloignés de la vie quotidienne. Elles affectaient les mondes extrêmes de l'infiniment petit et de l'infiniment grand qui laissent beaucoup de monde indifférent. Alors, pour les personnes pragmatiques, ces énigmes n'avaient guère de poids. Pourtant, on peut dire aujourd'hui que Lord Kelvin se trompait lourdement. Il n'interprétait pas correctement les signes troublants de son temps. Son aveuglement fut complet.

La Belle Époque était forte de la certitude que tôt ou tard toute la connaissance serait à portée des mesures et que la Nature serait entièrement apprivoisée. Les scientifiques avaient effectivement peaufiné la méthode expérimentale si fructueuse pour expliquer le monde, du moins à l'échelle de l'expérience humaine. Mais malgré ce point de vue



triomphaliste, un certain désenchantement flottait dans l'air du temps si l'on en juge par cet extrait littéraire datant de 1913 :

« En ces trente années, mon existence à moi s'est chargée d'événements...

Eh bien, pendant ce temps, la science, qu'a-t-elle fait? Je ne vois guère qu'elle a progressé. La faillite de la science résulte tout simplement de la disproportion qui existe entre la brièveté de notre vie d'hommes, et la lente évolution des connaissances. »

Roger Martin du Gard

*Jean Barois*

Examiné un siècle plus tard, ce sentiment de frustration vis-à-vis du progrès est infiniment surprenant, tant il est clairement erroné. La période en question fut l'une des plus fructueuses de l'histoire des sciences. En seulement une dizaine d'années les savants découvrent tour à tour les rayons X, la radioactivité, l'électron, le noyau atomique, et initient les deux révolutions parallèles qui guident encore toute la physique d'aujourd'hui : la relativité d'un côté, la mécanique quantique de l'autre. Merveilleux tableau de chasse! Martin du Gard ne semble pas très au fait des avancées scientifiques de son temps. La relativité, qui explique la constance de la vitesse de la lumière, règne sur l'infiniment grand de l'évolution de l'Univers et nous donne les clés de la cosmologie. La mécanique quantique explique le subtil comportement des constituants élémentaires de la matière, et en particulier elle rend compte des spectres lumineux des éléments. Mais il fallait sans doute plus de recul que n'avait Martin du Gard, et plus d'imagination que Lord Kelvin pour deviner les perspectives totalement inédites que promettaient ces approfondissements.

Au cours du XX<sup>e</sup> siècle que nous allons parcourir, la recherche s'est énormément développée, particulièrement dans les domaines extrêmes de la connaissance. On a parlé à juste titre du siècle de la physique, et la branche qui s'intéresse aux particules et dont il sera essentiellement question ici, a connu pendant cette période une évolution phénoménale. Cette spécialité, qui explore la constitution intime de la matière, est relativement récente, mais elle a progressé de manière si fulgurante qu'on distingue aujourd'hui des détails cent millions de fois plus fins qu'il y a cent ans. En quelques décennies, la frontière de l'infiniment petit a été repoussée de huit ordres de grandeur.

À vrai dire, la question de la constitution ultime de la matière faisait réfléchir les hommes dès l'Antiquité. De quoi le monde qui nous entoure est-il fait ? Les Anciens avaient trouvé leur recette. Ils bâtissaient le monde terrestre à partir de quatre éléments bien identifiés : l'eau, la terre, le feu et l'air. Ces éléments étaient périssables ce qui expliquait la décrépitude et la mort de tout objet de notre environnement, et de nous-mêmes par la même occasion. Le cosmos, qui apparaissait comme le domaine du permanent, avait droit à un élément constitutif particulier, l'éther immuable.

Cette dichotomie dans la vision du monde fut remise en question dès le XVI<sup>e</sup> siècle. À la suite de l'observation de la supernova de 1572, on s'aperçut que l'évolution du cosmos ne se limite pas au continuel ballet toujours répété de la voûte céleste. L'apparition d'une supernova signe la mort d'une étoile : l'immutabilité du ciel se trouvait soudain remise en question. On sait aujourd'hui que les étoiles naissent, vivent et meurent à l'image de tous les objets matériels, quoique sur des échelles de temps évidemment sans commune mesure avec notre propre espérance de vie puisqu'on compte ici en milliards d'années. Autre preuve d'une origine commune entre objets terrestres et célestes : Galilée pointant sa lunette vers la Lune y détecte une surface aussi tourmentée que celle de la Terre. La Lune n'est pas une sphère parfaite : sa nature irrégulière la rétrograde au rang des objets simplement matériels.

Avec nos connaissances actuelles, cette constatation ne surprend guère. Les mêmes constituants élémentaires sont à la base de la construction de tous les objets existant dans l'Univers. Une preuve directe se trouve dans la lumière qui nous arrive des galaxies les plus lointaines et où se reconnaissent les marques caractéristiques des éléments qui constituent notre environnement proche. Il n'y a pas lieu de différencier conceptuellement le monde terrestre et le cosmos, ils sont composés des mêmes particules, et c'est pourquoi, grâce à la physique nucléaire et des particules étudiées sur terre, on comprend mieux l'évolution de l'Univers dans son ensemble.

L'infiniment petit explique l'infiniment grand. Toute la matière visible est un assemblage des mêmes particules élémentaires, qu'elles forment les objets de la vie quotidienne ou les monstres qui peuplent les espaces intersidéraux, quasars et autres trous noirs. Il y a une harmonieuse beauté dans cette unification, même si elle ôte au cosmos une partie de son mystère.

« Qui donc connaît les flux et les reflux de l'infiniment grand et de l'infiniment petit ? »

Victor Hugo

*Les Misérables*

Les briques élémentaires à la base de toute la matière sont aujourd'hui bien étudiées. Elles définissent les dimensions de l'infiniment petit. Encore faut-il comprendre l'architecture qui les assemble en objets macroscopiques très complexes. Ici aussi la question s'est posée depuis l'Antiquité. Peut-on diviser sans cesse la matière en grains de plus en plus fins, ou existe-t-il une taille minimale infranchissable, un ultime niveau de poussières insécables ?

Dès le V<sup>e</sup> siècle avant Jésus-Christ, Démocrite disait : « Rien n'existe que l'atome et l'espace vide, et tout le reste est commentaire. » Dans cette vision des choses, l'atome, du grec « atomos » signifiant indivisible, désigne le grain de matière le plus petit qu'on puisse isoler. Son caractère élémentaire exclut toute propriété interne. Un tel grain ultime n'est pas nécessairement un point sans dimensions, mais même si ce minuscule point est étendu, comme le postulent les théories des cordes aujourd'hui à la mode, on ne pourra envisager une analyse interne de sa structure.

C'est seulement récemment que des moyens technologiques sans précédent ont permis de mettre au jour les unes après les autres les briques élémentaires qui constituent la matière ordinaire, et en parallèle, de comprendre leurs associations et leurs comportements. En passant, il est amusant de noter que si les Anciens conféraient au cosmos la propriété d'éternité que la science moderne lui a ôtée, le proton et l'électron à la base de la constitution de l'Univers semblent bien être éternels. Ils ne subissent pas les assauts du temps, un proton peut nous provenir de sources distantes de milliards d'années-lumière sans avoir pris une seule ride. L'éternité se cache donc, non dans les profondeurs extrêmes du cosmos, mais au contraire dans l'intimité de la matière. On peut alors se poser la question : comment engendrer du périssable avec de l'éternel ?

Les particules élémentaires ont un rapport assez particulier au temps, et nous verrons que la différence de nature qui existe dans l'Univers ne met pas en opposition le terrestre d'un côté et le céleste de l'autre, mais le macroscopique et le microscopique. Le monde de l'infiniment petit demandera une remise en question complète de nos modes de pensées, habitués que nous sommes au monde macroscopique.