

Antoine Rouchner • Stéphane Lavignac

À la recherche des neutrinos

Messagers de l'infiniment grand
et de l'infiniment petit

DUNOD

Relecture éditoriale : Ludovic Ligot

Couverture : collaboration ANTARES,
adaptée de François Montanet (CNRS/IN2P3)

© Dunod, 2018

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-078765-4

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.

À Luciano Moscoso et Pierre Binétruy

Prologue

Traits d'union entre la physique des particules, la physique nucléaire et l'astrophysique, les neutrinos constituent un domaine de recherche très actif. Ils interrogent et fascinent les physiciens depuis près d'un siècle, défiant expérimentateurs et théoriciens de les appréhender entièrement... Ils sont pourtant omniprésents! Sur terre comme au ciel: reliques du Big Bang, ils sont aussi produits en abondance par les galaxies lointaines où se cachent des trous noirs, par les étoiles comme le Soleil, par l'interaction des rayons cosmiques dans l'atmosphère, par les centrales nucléaires et les accélérateurs de particules, par la Terre ou même par nos propres corps à travers la radioactivité naturelle.

À la croisée de plusieurs disciplines, les neutrinos pourraient se révéler la clef de bien des mystères. Car s'ils ont participé à l'élaboration du Modèle Standard de la physique des particules – et ont à ce titre plusieurs fois été récompensés par le prix Nobel de Physique – les neutrinos sont aussi considérés comme l'indice d'une physique inconnue, promesse d'un nouveau paradigme. Ce sont donc des particules plus énigmatiques qu'on pourrait le croire... Sournois ou espiègles? Les neutrinos n'ont de cesse de surprendre les physiciens.

Des neutrinos, nous savons beaucoup et bien peu à la fois. Il existe au moins trois espèces de neutrinos intimement liés à d'autres particules qui, contrairement aux neutrinos, possèdent une charge électrique et sont donc sensibles à l'interaction électromagnétique: l'électron, le muon et le tau. Ces trois neutrinos (électronique, muonique et tauique) sont produits par divers processus. Mais comme pour mieux brouiller les pistes, ils se mélangent entre eux tout en se déplaçant, apparaissant et disparaissant périodiquement. Un piège que les physiciens ont fini par bien cerner, et que l'on connaît désormais sous le nom d'*oscillation des neutrinos*.

Ce phénomène révèle au passage que les neutrinos possèdent des masses, certes beaucoup plus faibles que celles des autres particules, mais des masses non nulles – ce qui n'était pas prévu par le Modèle Standard qu'ils ont contribué à bâtir. On ignore encore la valeur exacte de ces masses, qui font l'objet d'intenses recherches. On ignore tout autant si les oscillations des antineutrinos sont semblables à celles des neutrinos. Si ce n'était pas le cas, on pourrait en apprendre davantage sur les raisons de la prévalence de la matière sur l'antimatière, l'un des grands mystères de la physique contemporaine... Mais au fait, le neutrino est-il sa propre antiparticule? Autrement dit, une particule de Dirac ou de Majorana? Cette question-là non plus n'est pas encore tranchée: on en sait beaucoup et si peu à la fois...

Si les neutrinos font partie intégrante du catalogue des particules élémentaires, leur singularité vient autant de la faiblesse de leur masse que de l'infime intensité de leur interaction avec la matière. Cette propriété les rend extrêmement difficiles à observer, en dépit de leur abondance. En témoigne le quart de siècle d'efforts instrumentaux qui ont été nécessaires pour les détecter, après le postulat de leur existence par Wolfgang Pauli en 1930.

Les neutrinos ne se dévoilent certes pas facilement, mais ils apportent des informations uniques sur les phénomènes qui en sont la source. Particules passe-muraille, ils s'échappent des zones les plus denses de l'Univers, à l'instar des neutrinos issus des processus de fusion thermonucléaire dont le Soleil est le siège. Ils pourraient également nous aider à percer le mystère de l'origine des rayons cosmiques d'énergie extrême. Ils ouvrent ainsi la voie à une nouvelle forme d'astronomie... Mais comment les détecter efficacement? Les neutrinos ne se laissent appréhender qu'au travers de leur interaction avec la matière, qui se produit si rarement. Aussi n'y a-t-il pas d'autre moyen pour les étudier que d'inventer des détecteurs toujours plus performants, plus grands, quitte à instrumenter des cavernes entières ou même le fond des océans...

Cet ouvrage a pour ambition d'exposer les grandes étapes du développement de la physique des neutrinos, qui mêle progrès scientifiques spectaculaires, controverses, et parfois erreurs expérimentales. Il offre une synthèse des connaissances et interrogations actuelles, et donne un aperçu des défis à relever. Il souligne enfin la place singulière qu'occupent les neutrinos en tant que messagers de l'infiniment petit et de l'infiniment grand.

1

Le Modèle Standard de la physique des particules

« We are such stuff as dreams are made on. »
Shakespeare, *La Tempête*, 1610 ou 1611

Avant que nous partions à la rencontre des neutrinos, une introduction à la zoologie des particules élémentaires s'impose. Nous nous intéresserons d'abord aux constituants de la matière « ordinaire » et aux autres particules analogues, regroupées en familles, ainsi qu'à leurs interactions. Nous verrons que ces interactions proviennent de l'échange d'un autre type de particules appelées *bosons vecteurs*. Nous évoquerons aussi le boson de Higgs, dont le rôle est de donner une masse aux particules élémentaires. Enfin, nous introduirons la notion de *savueur leptonique*, qui nous sera utile par la suite.

Brève esquisse du Modèle Standard

Les constituants de la matière

Particules énigmatiques, les neutrinos ne sont en fait que des pièces d'un puzzle, celui du monde subatomique, fait de corpuscules élémentaires comme l'électron, les quarks (constituants ultimes des noyaux atomiques) et le photon (*quantum* de la lumière). Ces particules, et les interactions fondamentales qui les font se repousser, s'attirer et

se transformer les unes dans les autres, constituent ce qu'on appelle le *Modèle Standard* de la physique des particules. Élaboré dans les années 1960 et 1970 par les physiciens Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg (co-lauréats du prix Nobel de physique 1979), le Modèle Standard a dû attendre le 4 juillet 2012 pour que les expériences ATLAS et CMS du CERN¹ annoncent la découverte de sa dernière brique, le fameux boson de Higgs (objet du Prix Nobel de physique 2013).

Regardons de plus près la matière qui nous environne. Elle est faite d'atomes, eux-mêmes constitués d'un noyau composé de protons et de neutrons (désignés par le terme générique de *nucléons*), et d'électrons «gravitant» autour de ce noyau. Contrairement à l'électron, le proton et le neutron ne sont pas élémentaires, mais composés d'entités plus fondamentales, les quarks. Pour se représenter la taille de ces objets, il faut savoir qu'un atome mesure typiquement un dixième de nanomètre (soit un dixième de milliardième de mètre ou 10^{-10} m) et un nucléon environ un femtomètre (soit un millionième de milliardième de mètre ou 10^{-15} m)! Remarquons au passage que la matière est surtout constituée de vide : plus de 99,95 % de la masse des atomes se concentre dans le noyau...

Mais au juste, qu'est-ce qui assure la cohésion de cet assemblage de particules? L'image des électrons «gravitant» autour du noyau comme des satellites autour d'une planète est trompeuse, car ce n'est pas la gravitation qui les lie au noyau : c'est *l'interaction électromagnétique*. Celle-ci fait que deux particules dont les charges électriques ont des signes opposés s'attirent, comme le proton (chargé positivement) et l'électron (chargé négativement²). De plus, ces électrons ne suivent pas des trajectoires bien définies, comme le font les corps célestes, car les particules élémentaires obéissent aux lois de la mécanique quantique et non à celles de la physique classique. Dans ce cadre, la notion de position d'une particule est remplacée par sa probabilité de présence en chaque point de l'espace, et l'électron est mieux décrit par une onde que par un point. On doit donc se représenter le noyau comme environné d'un nuage d'électrons (on parle de *cortège électronique*), plutôt qu'entouré d'électrons décrivant des trajectoires précises.

Poursuivons notre exploration et regardons à présent à l'intérieur des protons et des neutrons : chacun d'eux est constitué de trois quarks.

Nous n'en avons cependant pas de preuve directe, car on n'a jamais observé de quark à l'état libre ; seulement des *états liés* composés de trois quarks (comme le proton et le neutron) ou d'une paire quark-antiquark (l'antiparticule du quark, voir l'encadré). La force qui les lie si étroitement à l'intérieur de ces particules composites que l'on appelle *hadrons*³ a pour nom *interaction forte*. C'est elle qui empêche les hadrons de se dissocier et les quarks d'apparaître à l'état libre. Imaginez un ressort : plus vous l'étirez, plus sa force de rappel est importante ; de même, si l'on voulait séparer deux quarks au sein d'un proton ou d'un neutron, la force qui les rapproche augmenterait d'autant plus qu'ils s'éloigneraient l'un de l'autre. Les quarks se trouvent donc *confinés* à l'intérieur des hadrons par l'interaction forte. C'est également cette dernière qui est responsable de la cohésion des noyaux atomiques : alors que l'interaction électromagnétique tend à éloigner les protons les uns des autres (on parle de *répulsion électrostatique*), l'interaction forte les maintient amalgamés avec les neutrons à l'intérieur du noyau. Sa portée est donc de l'ordre de la taille d'un nucléon, soit un femtomètre, et ne dépasse pas les limites du noyau atomique.

Dans certains cas, le noyau n'est pas stable : il se désintègre en éléments plus légers – un phénomène connu sous le nom de *radioactivité*. Par exemple, un atome de carbone 14 se désintègre en un atome d'azote, selon la réaction : $^{14}_6\text{C} \rightarrow ^{14}_7\text{N} + e^- + \bar{\nu}$. Cette désintégration est due à une troisième force fondamentale : l'*interaction faible*. Ici, pour la première fois, nous rencontrons un neutrino, noté ν – ou plutôt son antiparticule, l'antineutrino $\bar{\nu}$. Insensibles à l'interaction électromagnétique comme à l'interaction forte, les neutrinos interagissent très peu avec la matière, à la différence des électrons et des quarks. C'est pourquoi ils s'échappent aisément de l'environnement dans lequel ils ont été produits pour se propager librement dans l'Univers, comme nous le reverrons tout au long de ce livre...

Complétons notre inventaire des particules élémentaires. La matière ordinaire – celle qui nous entoure – est constituée d'électrons et de deux types de quarks, appelés *up* (u) et *down* (d). L'électron a une charge électrique entière (-1 en unité de la charge élémentaire e), tandis que les quarks up et down ont des charges électriques fractionnaires (+2/3 et -1/3 respectivement). À ces constituants de l'atome, il faut ajouter

le neutrino, qui est électriquement neutre et n'interagit que par l'interaction faible (on exclut ici la gravitation, dont l'intensité est trop faible pour avoir une influence à l'échelle microscopique). On regroupe toutes ces particules sous le nom générique de *fermions*. Parmi ceux-ci, les particules insensibles à l'interaction forte (l'électron et le neutrino) sont appelées *leptons*. Comme on l'a vu, les quarks up et down sont confinés à l'intérieur des nucléons par l'interaction forte: le proton, de charge +1, est constitué de deux quarks up et d'un quark down; le neutron, dépourvu de charge électrique, est constitué de deux quarks down et d'un quark up. Il existe également des états liés formés d'une paire quark-antiquark, appelés *mésons*: le pion neutre (π^0) et les pions chargés (π^- et π^+ , antiparticules l'un de l'autre). Instables, ces particules sont produites lors de collisions entre des protons et la matière ordinaire, et se désintègrent presque aussitôt. Nous verrons que les pions chargés jouent un rôle important dans la production des neutrinos, en laboratoire comme dans le cosmos.

Particules et antiparticules

À chaque particule est associée une *antiparticule* de même masse et de charge électrique opposée, avec laquelle elle peut s'annihiler pour produire d'autres particules. L'antiparticule de l'électron est appelée *positon*, celle du proton *antiproton*, etc. Certaines particules neutres, comme le photon ou le pion π^0 , sont identiques à leurs antiparticules.

Le physicien italien Ettore Majorana a étudié en 1937 la possibilité qu'un fermion soit sa propre antiparticule; la postérité a adopté le terme de *fermion de Majorana* pour désigner un tel objet. Parmi les fermions connus, seul le neutrino, dépourvu de charge électrique, pourrait être concerné. Le neutrino et l'antineutrino seraient-ils donc une seule et même particule? Cette question, d'une importance fondamentale, est encore ouverte et fait l'objet d'intenses recherches expérimentales. Nous en reparlerons dans les chapitres 10 et 11. La matière ordinaire étant exclusivement composée de particules (électrons, protons et neutrons), nous n'avons guère l'occasion de croiser des antiparticules dans notre environnement immédiat, mais elles peuvent être produites par diverses réactions impliquant des particules. Si l'on en trouve dans les rayons cosmiques (voir le chapitre 4), les structures

observées dans l'Univers (étoiles, galaxies...) ne semblent guère en contenir. L'origine de cette *asymétrie matière-antimatière* est l'une des grandes énigmes de la physique contemporaine. Nous verrons dans le chapitre 10 que les neutrinos pourraient jouer un rôle clef dans sa résolution...

Interactions fondamentales et bosons vecteurs

Les particules élémentaires interagissent via trois forces fondamentales⁴ : l'interaction électromagnétique, qui agit sur les particules chargées ; l'interaction forte, à laquelle seuls les quarks sont sensibles ; et l'interaction faible, qui agit sur toutes les particules. Dans le cadre du Modèle Standard, ces forces sont véhiculées par des particules intermédiaires, appelées *bosons vecteurs*, qui permettent aux particules d'interagir à distance. Ainsi, deux particules chargées interagissent en échangeant un photon (noté γ), le vecteur de l'interaction électromagnétique, lui-même dépourvu de charge électrique. L'interaction forte est véhiculée par huit particules appelées *gluons*. Quant à l'interaction faible, elle fait intervenir deux types de vecteurs : le *boson W*, chargé électriquement, et le *boson Z*, qui est neutre. Ces trois interactions ont des portées singulièrement différentes. Celle de l'interaction électromagnétique est infinie : deux particules de charges électriques opposées s'attirent même si elles sont très éloignées l'une de l'autre, l'intensité de l'attraction décroissant comme l'inverse du carré de la distance. Cette propriété découle du fait que le vecteur de l'interaction, le photon, a une masse nulle. Notons que l'attraction gravitationnelle, qui explique aussi bien la chute des pommes que le mouvement des corps célestes, a également une portée infinie ; elle s'interprète par l'échange d'une particule hypothétique de masse nulle, le *graviton*.

Le cas de l'interaction faible, qui gouverne de nombreuses réactions nucléaires et désintégrations de particules, est bien différent : son rayon d'action est extrêmement petit, de l'ordre de 10^{-18} m... Cette portée minuscule s'explique par le fait que, contrairement au photon, les bosons W et Z sont massifs. Car il existe une relation de « proportionnalité inverse » entre la portée d'une interaction et la masse du boson qui la véhicule⁵ : plus ce dernier est lourd, plus l'interaction est de faible