

À la recherche des neutrinos

Antoine Kouchner • Stéphane Lavignac

À la recherche des neutrinos

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

DUNOD

Relecture éditoriale: Ludovic Ligo

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

© Dunod, 2018

11 rue Paul Bert, 92240 Malakoff

www.dunod.com

ISBN 978-2-10-074673-6

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 milliardième 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 ¹⁴C 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

portée. À l’opposé, un boson vecteur de masse nulle est associé à une interaction de portée infinie. Exception notable à cette règle : bien que les gluons soient de masse nulle, l’interaction forte est à courte portée en raison du confinement des quarks à l’intérieur des nucléons.

Il existe donc deux catégories de particules : les constituants de la matière et les bosons vecteurs des interactions. Mais qu’est-ce qui leur confère des rôles si différents ? La réponse fait intervenir leur *spin*, une quantité d’origine purement quantique qui ne peut prendre que des valeurs entières ou demi-entières (on dit que le spin est *quantifié*). Les constituants de la matière ont un spin demi-entier (plus précisément égal à $\frac{1}{2}$) et sont appelés *fermions*, tandis que les vecteurs des interactions ont un spin entier et sont appelés *bosons*. Les fermions obéissent au *principe d’exclusion de Pauli*, introduit par le physicien autrichien Wolfgang Pauli (dont nous verrons au chapitre 2 qu’il a joué un rôle primordial dans l’histoire des neutrinos). Selon ce principe, deux fermions ne peuvent pas occuper le même état quantique. À l’opposé, les bosons ont un comportement grégaire et peuvent s’agglutiner pour former un état cohérent ; par exemple, la lumière d’un laser est faite d’une multitude de photons aux propriétés quasi identiques.

Tableau 1.1 Les interactions fondamentales et leurs principales caractéristiques.

Interaction	Vecteur	Rôle	Portée
Électromagnétique	Photon	Cohésion de l’atome ; phénomènes électriques et magnétiques	Infinie
Forte	Gluons	Cohésion du noyau ; confine les quarks à l’intérieur des protons et des neutrons	Femtomètre [10^{-15} m] (dimension du noyau)
Faible	W et Z	Certaines réactions nucléaires et désintégrations de particules	Millième de femtomètre [10^{-18} m]
Gravitationnelle	Graviton	Attraction entre corps massifs ; orbites des planètes autour du Soleil	Infinie

Les deuxième et troisième familles de fermions

Mais la liste des particules élémentaires n'est pas encore complète. Les constituants de la matière ordinaire (quarks up et down, électron) appartiennent à ce qu'on appelle la première génération (ou *famille*) de fermions, dont fait également partie le neutrino. On l'appellera désormais *neutrino électronique*, et on le notera ν_e pour spécifier qu'il appartient à la même famille que l'électron.

L'inventaire ne s'arrête pas là. Il existe deux autres familles de fermions, qui sont des copies presque fidèles de la première : les fermions qui les constituent ont les mêmes charges électriques et les mêmes interactions, mais leurs masses sont différentes. Plus lourdes, instables, ces particules exotiques n'existent pas dans la matière qui nous entoure, mais sont produites par des interactions entre fermions de la première génération. Ces dernières peuvent être provoquées dans des accélérateurs de particules comme le LHC (le Grand Collisionneur de Hadrons situé au CERN) ou résulter de processus naturels, comme les collisions des rayons cosmiques avec les molécules de l'atmosphère. La deuxième famille est constituée de deux quarks, le *charm* (c) et le *strange* (s), et de deux leptons : le *muon* (μ), 200 fois plus lourd que l'électron, et le *neutrino muonique* (ν_μ) qui lui est associé⁶. Avec l'introduction de nouveaux quarks apparaissent de nouveaux hadrons, comme les *kaons*, mésons formés d'un quark s et d'un antiquark \bar{u} ou \bar{d} (ou d'un antiquark \bar{s} et d'un quark u ou d). On en dénombre quatre : les kaons neutres K^0 et \bar{K}^0 , antiparticules l'un de l'autre, et les kaons chargés K^- et K^+ , également antiparticules l'un de l'autre. La troisième famille, enfin, comprend les fermions les plus massifs. Le quark *top* (t), le plus lourd d'entre eux, n'a été découvert qu'en 1995 ; avant cette date, les collisionneurs de particules n'étaient pas capables d'atteindre des énergies suffisamment élevées pour le produire. Les autres fermions de la troisième génération sont le quark *bottom* (b), un lepton chargé appelé *tau* (τ) et son partenaire neutre, le *neutrino tauique* (ν_τ). Ces nouvelles particules, instables⁷, se désintègrent en leurs cousines plus légères aussitôt après avoir été produites. Ainsi, un muon se désintègre, par l'intermédiaire de l'interaction faible, en un électron accompagné d'un antineutrino électronique et d'un neutrino muonique. Un hadron contenant un ou

plusieurs quarks de la deuxième ou troisième génération, quant à lui, peut se désintégrer via l'interaction faible ou forte.

« Who ordered that ? » (I. I. Rabi)

La découverte du muon, en 1936, a causé la perplexité des physiciens, car cette nouvelle particule ne semblait pas nécessaire à la compréhension des lois de la Nature. L'Américain Isidor Rabi s'est ainsi demandé qui avait bien pu réclamer son existence... Quatre-vingts ans plus tard, cet étonnement n'est plus guère partagé par les physiciens, tant l'observation d'une nouvelle particule est devenue banale. L'explosion de joie qui a suivi la découverte du boson de Higgs, en juillet 2012, a même fait place à une certaine frustration, aucune particule non prédite par le Modèle Standard n'ayant encore fait son apparition...

Le dernier venu : le boson de Higgs

Le Modèle Standard est maintenant complet... ou presque : nous n'avons pas encore rencontré la plus mystérieuse des particules, le *boson de Higgs*. Ne ressemblant à aucune autre, elle a été inventée par les physiciens pour des raisons de cohérence théorique. Tout comme le photon, les gluons, le W ou le Z , il s'agit d'un boson, mais d'une nature différente : alors que les vecteurs des interactions électromagnétique, faible et forte sont des particules de spin 1, le boson de Higgs est dépourvu de spin. Il n'est associé à aucune interaction fondamentale ; il n'est pas non plus un constituant de la matière, comme les quarks ou l'électron. Son rôle est d'expliquer la courte portée des interactions faibles, ou (ce qui revient au même) de donner une masse aux bosons W et Z ... et nous allons voir qu'il est aussi à l'origine des masses des autres particules ! L'existence du boson de Higgs a été postulée dans les années 1960 par Peter Higgs, Robert Brout et François Englert, mais il a fallu attendre le 4 juillet 2012 pour que le CERN annonce officiellement sa découverte⁸. Soit bien après que les autres particules du Modèle Standard aient été observées. Des physiciens sceptiques s'étaient même pris à douter de son existence et à élaborer des théories sans boson de Higgs...

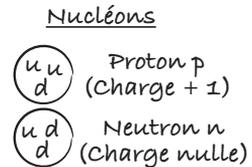
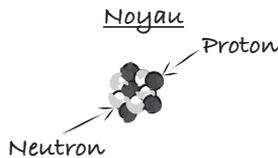
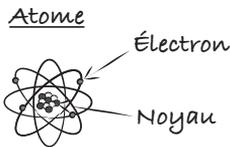
Mais revenons aux interactions faibles. Pour expliquer leur courte portée, nous avons vu que les bosons W et Z devaient être massifs. Pourquoi alors ne pas simplement supposer qu'ils ont une masse? Quel besoin avons-nous de ce boson de Higgs? Les choses ne sont hélas pas aussi simples, à cause des subtilités de la physique quantique, qui rendent la théorie incohérente dès que les bosons vecteurs sont massifs⁹. Il existe cependant une solution à cet épineux problème, qui consiste à leur donner une masse indirectement, via leur interaction avec le boson de Higgs... Ni force ni matière, ce dernier se « couple » à toutes les particules massives: plus une particule interagit fortement avec le boson de Higgs, plus sa masse est grande. Tout se passe comme si cette

Tableau 1.2 La matière et les particules du Modèle Standard.

Les trois familles de fermions du Modèle Standard et leurs principales caractéristiques. La première ligne correspond aux constituants de la matière ordinaire.

	Leptons (observables à l'état libre)		Quarks (confinés à l'intérieur des hadrons, sauf le top)			
	Charge -1	Charge nulle	Charge $+\frac{2}{3}$	Charge $-\frac{1}{3}$		
1 ^{re} famille	e^- Électron	ν_e Neutrino électronique	u up	d Down	Matière ordinaire	
2 ^e famille (plus lourde, vie brève)	μ^- Muon	ν_μ Neutrino muonique	c Charm	s Strange		Rayons cosmiques et accélérateurs de particules
3 ^e famille (encore plus lourde, vie encore plus brève)	τ^- Tau	ν_τ Neutrino tauique	t Top	b bottom		

○ Particules stables (quasi stables pour les neutrinos)



interaction gênait la particule dans son mouvement et lui conférait une inertie, donc une masse ! Ce mécanisme subtil engendre les masses des fermions comme celles des bosons vecteurs de l'interaction faible, dont il explique ainsi la courte portée. Il restaure du même coup la cohérence de la théorie, permettant aux physiciens de faire des prédictions très précises et de les vérifier expérimentalement. L'origine des masses des quarks et des leptons chargés (électron, muon et tau) est désormais bien comprise. Celle des masses des neutrinos, en revanche, reste encore mystérieuse (nous en reparlerons dans les chapitres 10 à 12)...

Symétries et quantités conservées

Le concept de *symétrie*, c'est-à-dire l'invariance des lois physiques sous certaines transformations, joue un rôle fondamental en physique des particules. Il s'agit de la généralisation de la notion de symétrie d'un système physique, liée à sa forme : un cylindre ne change pas d'aspect si on lui fait subir une rotation autour de son axe. La symétrie, dans ce cas, est l'ensemble des rotations de ce type (on parle de *symétrie cylindrique*). Par extension, on dit qu'une théorie physique possède une symétrie si les lois qui la composent restent identiques lorsqu'on leur fait subir certaines transformations. Et cette propriété entraîne la conservation de quantités physiques, comme nous allons le voir.

Énergie, impulsion et moment cinétique

Commençons par les transformations appelées *translations dans le temps*. Dire que la théorie est invariante par translation dans le temps, c'est dire que les lois de la physique sont les mêmes à chaque instant : une expérience réalisée le lundi produira le même résultat si vous la refaites le vendredi. De cette propriété – ou symétrie – découle l'un des plus importants principes de la physique : la *conservation de l'énergie* d'un système isolé. Le lien entre ces deux concepts (invariance de la théorie par translation dans le temps et conservation de l'énergie) peut sembler abstrait, mais ses conséquences sont considérables. C'est un cas particulier d'un résultat plus général, démontré par la mathématicienne allemande Emmy Noether en 1915, qui associe une loi de conservation à

chaque symétrie d'une théorie physique. Autre exemple, l'invariance de la théorie par *translation dans l'espace* – le fait que les lois physiques sont les mêmes partout – entraîne la conservation de la *quantité de mouvement* (encore appelée *impulsion*) d'un système isolé. Pour une particule non relativiste (qui se déplace à une vitesse nettement inférieure à celle de la lumière), il s'agit du produit de sa vitesse par sa masse. C'est un vecteur¹⁰, le mouvement étant orienté dans une direction donnée. Une particule sans interaction avec son environnement possède une impulsion constante; elle est donc animée d'un mouvement de translation rectiligne et uniforme. Enfin, à l'invariance de la théorie sous les rotations correspond la conservation d'une autre quantité physique associée au mouvement: le *moment cinétique*. Il s'agit encore d'un vecteur (ou plus précisément d'un pseudo-vecteur¹¹). Pour comprendre sa signification physique, imaginons un objet en rotation uniforme autour d'un axe, comme une toupie; son moment cinétique est proportionnel à sa vitesse de rotation. Si cette toupie n'était soumise à aucune force de friction, elle constituerait un système isolé. Son moment cinétique serait donc conservé et elle continuerait à tourner éternellement à la même vitesse...

Le moment cinétique en mécanique quantique – spin et hélicité

La situation devient plus complexe en mécanique quantique, où toute particule possède, outre le moment cinétique associé à son mouvement (que l'on appelle *moment cinétique orbital*), un moment cinétique intrinsèque: le *spin*. C'est le moment cinétique total, somme de ces deux composantes, qui est conservé. D'origine purement quantique, le spin – dont il est difficile de donner une représentation concrète¹² – est indépendant du mouvement de la particule. Il ne s'annule pas quand elle est au repos, contrairement au moment cinétique orbital. Comme on l'a vu, il est quantifié: il ne peut prendre que des valeurs bien déterminées, entières ou demi-entières (il n'existe pas de particule ayant un spin compris entre 0 et $\frac{1}{2}$). Par ailleurs, le spin d'une particule détermine sa nature: la matière est constituée de fermions de spin $\frac{1}{2}$; les bosons vecteurs des interactions ont un spin 1 (sauf pour l'interaction gravitationnelle, véhiculée une particule de spin 2, le graviton); le boson de Higgs a un spin 0.