

CHRONO  SCIENCES

Frank Close

LA PHYSIQUE DES PARTICULES

 sciences

Frank Close

LA PHYSIQUE DES PARTICULES

L'auteur nous emmène à l'intérieur de l'atome pour examiner les particules connues telles que les quarks, les électrons et le neutrino fantôme, et explique le rôle clé et l'importance du boson de Higgs.

En cours de route, il donne un aperçu passionnant de la manière dont les découvertes en physique des particules ont été faites et examine comment notre image du monde a été radicalement revisitée à la lumière de ces développements.

Il conclut en évoquant de nouvelles idées sur le mystère de l'antimatière et des neutrinos massifs, ainsi que ce que les 50 prochaines années de recherche pourraient révéler sur la nature du champ de Higgs, qui façonne à la fois les particules et les forces fondamentales.

Frank Close est professeur de physique à l'Université d'Oxford et *fellow* du Collège d'Exeter. Il est connu tant pour son œuvre de vulgarisation scientifique que pour ses travaux académiques y compris des cours publics, en tant que professeur d'astronomie au *Gresham College*, Londres.

ISBN : 978-2-7598-3520-1



La physique des particules



La physique des particules

Frank Close

Traduit de l'anglais par Alan Rodney



ChronoSciences

Collection destinée à un large public qui invite le lecteur à découvrir de façon très complète, mais abordable, un sujet ou une thématique précise.

« Dans la même collection »

L'Intelligence artificielle, Margaret A. Boden, 2021

La Théorie quantique, John Polkinghorne, 2021

Les Marées, David George Bowers et Emyr Martyn Roberts, 2021

L'Anthropocène, Erle C. Ellis, 2021

L'Odorat, Matthew Cobb, 2021

Le Changement climatique, 2022

Les Énergies renouvelables, 2022

L'Écologie, Jaboury Ghazoul, 2022

Le Temps, Jenann Ismael, 2022

La Physique, Sidney Perkowitz, 2022

La Théorie des nombres, Robin Wilson, 2023

Les Ondes, Mike Goldsmith, 2023

Les Insectes, Simon Leather, 2023

Les Virus, Dorothy H. Crawford, 2023

L'Arctique, Klaus Dodds et Jamie Woodward, 2023

Les Récifs coralliens, Charles Sheppard, 2023

Les Nanotechnologies, Philip Moriarty, 2024

Particle Physics: a very short introduction was originally published in English in 2023. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

© Franck Close, 2023.

© Pour la traduction française, EDP sciences, 2024.

Composition et mise en page : Desk (www.desk53.com.fr)

Imprimé en France

Papier : 978-2-7598-3520-1 – Numérique : 978-2-7598-3521-8

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.



Table des matières

Avant-propos.....	7
1. Voyage au centre de l'Univers.....	10
2. « Grand et petit », c'est « grand » comment et « petit » comment ?.....	24
3. Comment nous apprenons de quoi les choses sont faites et ce que nous avons découvert.....	37
4. Au cœur de la matière	52
5. Les accélérateurs : cosmiques et anthropiques	67
6. Les détecteurs : caméras et machines à remonter le temps.....	85
7. Les forces de la nature	105
8. La matière (et l'antimatière) exotique.....	120
9. Mais d'où vient la matière ?.....	141
10. Questions pour l'après-Higgs.....	152
Lectures supplémentaires.....	171
Glossaire.....	174

Sources et crédits des illustrations..... 182

Index..... 183



Avant-propos

Nous sommes constitués d'atomes. À chaque respiration, vous inspirez 10 000 milliards de milliards¹ d'atomes d'oxygène, ce qui donne une idée de la taille de chacun d'entre eux. Tous ces atomes, avec les atomes de carbone de votre peau, et en réalité tout le reste sur Terre, résultent d'une cuisson à l'intérieur d'une étoile, il y a environ 5 milliards d'années. Vous êtes donc fait d'éléments aussi vieux que la planète, et vieux d'un tiers de l'âge de l'Univers, mais c'est la première fois que ces atomes sont rassemblés de telle sorte qu'ils sont vous.

La physique des particules est la discipline qui a montré comment la matière est construite et qui commence à expliquer d'où elle vient. Elle a révélé l'existence d'une *essence* omniprésente, appelée « champ de Higgs », qui confère une masse aux particules fondamentales de la matière. Dans d'immenses accélérateurs de plusieurs kilomètres de long, nous pouvons accélérer des morceaux d'atomes, des particules

1. NDT. L'auteur parle de « 10 billion de trillion d'atomes d'oxygène ». Attention à ne pas confondre : le **billion anglais** est le milliard français, soit 10^9 . Le **trillion anglais** vaut mille milliards, soit 10^{12} . Nous inspirerions donc **dix mille milliards de milliards** d'atomes à chaque inhalation (environ 4 litres) ; soit $10^9 \times 10^{12}$, c'est-à-dire 10^{21} , cela environ 22 000 fois par jour !

telles que les électrons et les protons, ou même des morceaux exotiques d'antimatière et les faire s'écraser les uns contre les autres. Ce faisant, nous créons pendant un bref instant, dans une petite région de l'espace, une intense concentration d'énergie qui reproduit la nature de l'Univers tel qu'il était dans la fraction de seconde qui a suivi le Big Bang originel. Nous découvrons ainsi nos origines.

Il y a 100 ans, découvrir la nature de l'atome était relativement simple : les atomes sont omniprésents dans la matière et il était possible de percer leurs secrets à l'aide d'un appareil placé sur une paillasse.

L'étude de l'émergence de la matière à partir de la Création est un tout autre défi. Il n'y a pas d'appareil spécial Big Bang à acheter dans les catalogues scientifiques. Les pièces de base qui créent les faisceaux de particules, les accélèrent jusqu'à un iota près de la vitesse de la lumière, les écrasent et enregistrent les résultats pour analyse doivent toutes être fabriquées par des équipes de spécialistes. Le fait que nous puissions le faire est l'aboutissement d'un siècle de découvertes et de progrès technologiques. Il s'agit d'une coûteuse entreprise de grande envergure, mais c'est le seul moyen que nous connaissons actuellement pour répondre à des questions aussi profondes. En cours de route, des inventions inattendues et des outils ont été réalisés. L'antimatière et les détecteurs de particules sophistiqués sont aujourd'hui utilisés en imagerie médicale ; les systèmes d'acquisition de données conçus au CERN (Conseil européen pour la recherche nucléaire) ont conduit à l'invention du World Wide Web – ce ne sont là que quelques-unes des retombées de la physique des particules de haute énergie.

Les applications de la technologie et des découvertes de la physique des hautes énergies sont légion, mais ce n'est pas dans cette optique technologique que le sujet sera abordé.

Le moteur est la curiosité, le désir de savoir de quoi nous sommes faits, d'où cela vient et pourquoi les lois de l'Univers sont si finement équilibrées, de sorte que nous avons pu évoluer.

Dans cet ouvrage, j'espère vous donner une idée de ce que nous avons découvert et de certaines des grandes questions qui se posent aujourd'hui à nous. Je suis redevable à Latha Menon, d'Oxford University Press, de m'avoir encouragé à produire cette nouvelle édition, ainsi qu'à Alfons Weber pour ses conseils sur certains aspects de la physique expérimentale des particules.



Voyage au centre de l'Univers

LA MATIÈRE

Le 4 juillet 2012, nous avons changé d'époque scientifique. Ce jour-là, au CERN, le laboratoire de physique des particules de Genève, on annonçait la découverte d'une nouvelle particule, le boson de Higgs. Ce moment a marqué la « fin du commencement » dans la quête des éléments fondamentaux de la matière et des lois qui régissent leur comportement. Le fait que le boson de Higgs soit la seule particule à avoir été nommée d'après le nom d'une personne² témoigne de son rôle unique. Ce jour a marqué la fin de l'« ère pré-Higgs », qui s'est étendue sur plus de 2 000 ans, depuis l'époque où les Grecs de l'Antiquité croyaient que tout était fait à partir de quelques éléments de base.

2. NDT. Professeur **Peter Ware Higgs** né le 29 mai 1929, physicien théoricien, professeur émérite à l'Université d'Édimbourg, il a reçu le prix Nobel 2013 (colauréat avec le physicien belge François Englert) pour ses travaux sur la masse des particules subatomiques.

Dans la chaleur du Big Bang, les bosons de Higgs ont rempli l'Univers naissant. Si les conditions le permettent, les bosons peuvent interagir en grand nombre (« boson » est le nom descriptif donné à l'espèce de particule qui a cette tendance, contrairement aux « fermions » qui fonctionnent de manière plus discrète). C'est ce qui est arrivé aux bosons de Higgs lorsque l'Univers a vieilli et s'est refroidi : ils ont fusionné et sommeillent aujourd'hui dans un champ omniprésent et silencieux. Pour ressusciter les bosons de Higgs à partir de ce champ, il est nécessaire de recréer l'énergie thermique qui prévalait dans l'Univers primitif. C'est ce que les expériences de physique des particules menées au CERN peuvent faire, pendant de brefs instants, dans une petite région de l'espace.

La découverte du boson de Higgs confirme que nous sommes immergés dans ce champ omniprésent. Sa nature réelle reste un mystère, mais pas ses implications. Sa présence donne lieu à une structure plutôt qu'à un champ gluant, glissant³ et homogène. L'interaction des particules fondamentales avec ce champ leur confère une masse, ce qui permet de créer des structures telles que les atomes et les molécules, les modèles de construction de la vie.

La majeure partie de ce livre présente ce que nous savons des particules fondamentales de la matière et de leur rôle dans la construction de l'Univers dans son ensemble au cours de l'ère pré-Higgs. Nous ne savons pas pourquoi elles ont ces propriétés spécifiques et pas d'autres. Le découvrir est un objectif de l'ère post-Higgs, que nous commenterons à la fin de ce livre.

3. NDT. Terme imagé, presque onomatopéen « Goo » – substance liquide ou semi-liquide ; en particulier, liquide plus ou moins visqueux, poisseux ou **glissant**, ou bien fluide corporel.

Si l'idée des Grecs de l'Antiquité était fondamentalement correcte, les détails en étaient erronés. La terre, l'air, le feu et l'eau sont constitués de ce que nous appelons aujourd'hui les éléments chimiques. L'eau pure est composée de deux éléments : l'hydrogène et l'oxygène. L'air est principalement constitué d'azote et d'oxygène, avec un soupçon de carbone et d'argon. La croûte terrestre contient la plupart des 90 éléments naturels, principalement de l'oxygène, du silicium et du fer, mélangés à du carbone, du phosphore et beaucoup d'autres dont vous n'avez peut-être jamais entendu parler, comme le ruthénium, l'holmium et le rhodium.

L'abondance des éléments varie considérablement et, en règle générale, ceux qui vous viennent à l'esprit en premier sont parmi les plus courants, tandis que ceux dont vous n'avez jamais entendu parler sont les plus rares. L'oxygène est donc le grand gagnant : à chaque inspiration, vous inspirez 10 000 milliards de milliards de ses atomes, tout comme les 8 milliards d'êtres humains qui peuplent la planète, ainsi que d'innombrables animaux, et il y a dans notre environnement encore beaucoup d'autres atomes d'oxygène utilisés autrement. Lorsque vous expirez, ces atomes sont émis, piégés avec du carbone pour former des molécules de dioxyde de carbone, qui constituent le carburant des arbres et des plantes. Les chiffres sont énormes et les termes oxygène et carbone font partie du lexique de tout un chacun. Il en va tout autrement de l'astate ou du francium. Même si vous en avez entendu parler, il est peu probable que vous soyez entré en contact avec l'un d'eux, car on estime qu'il y a moins d'une once (soit moins de 30 grammes) d'astate dans toute la croûte terrestre, et pour ce qui est du francium, on a même affirmé qu'à tout instant, il n'y a que 20 atomes de ce métal dans l'air.

Un atome est le plus petit morceau d'un élément qui peut exister et être reconnu comme tel. Presque tous ces éléments,

comme l'oxygène que vous respirez et le carbone de votre peau, ont été fabriqués dans des étoiles il y a environ 5 milliards d'années, à peu près à l'époque où la Terre s'est formée. L'hydrogène et l'hélium sont encore plus anciens, la majeure partie de l'hydrogène ayant été fabriquée peu après le Big Bang, pour fournir par la suite le carburant des étoiles au sein desquelles les autres éléments vont être créés.

Il y a une centaine d'années, on pensait que les atomes étaient de petits objets impénétrables, comme des versions miniatures des boules de billard. Aujourd'hui, nous savons que chaque atome possède un riche labyrinthe de structures internes. En son centre se trouve un noyau dense et compact, qui ne représente qu'une infime partie de la masse de l'atome et qui porte une charge électrique positive. Dans les régions extérieures de l'atome se trouvent de minuscules particules légères appelées **électrons**. Un électron possède une charge électrique négative et c'est l'attraction mutuelle des charges opposées qui fait tourner ces électrons chargés négativement autour du noyau central chargé positivement.

Le point situé à la fin d'une phrase dans un texte imprimé contient quelque 100 milliards d'atomes de carbone. Pour voir l'un d'entre eux à l'œil nu, il faudrait agrandir le point pour qu'il fasse 100 mètres de diamètre. Bien qu'énorme, cela reste imaginable. Mais pour voir le noyau atomique, il faudrait que ce point soit agrandi à 10 000 kilomètres : aussi grand que la Terre d'un pôle à l'autre.

Entre le noyau central compact et les électrons lointains qui tourbillonnent, les atomes sont essentiellement constitués d'espace vide. C'est ce qu'affirment de nombreux livres, et si cela est vrai pour les particules qui composent un atome, ce n'est que la moitié de l'histoire. Cet espace est rempli de champs de force électriques et magnétiques, si puissants qu'ils vous arrêteraient en un instant si vous essayiez de

pénétrer dans l'atome. Ce sont ces forces qui donnent sa solidité à la matière, même si ses atomes sont censés être « vides ». Au moment où vous lisez ces lignes, vous êtes suspendu à une distance d'un seul atome au-dessus des atomes de votre chaise grâce à ces forces.

Aussi puissantes que soient ces forces électriques et magnétiques, elles sont insignifiantes par rapport à des forces encore plus puissantes à l'œuvre dans le noyau atomique. Perturberez les effets de ces forces puissantes et vous obtiendrez de l'énergie nucléaire ; perturbez les forces électriques et magnétiques et vous obtiendrez les effets plus ambiants de la chimie et de la biochimie de la vie. Ces effets familiers quotidiens sont dus aux électrons situés aux limites extérieures des atomes, loin du noyau. Ces électrons peuvent changer de place dans des atomes voisins, contribuant ainsi à relier les atomes entre eux pour former des molécules. Ce sont les pérégrinations de ces électrons qui mènent à la chimie, à la biologie et à la vie. Ce livre n'aborde pas ces sujets, qui traitent du comportement collectif de nombreux atomes. En revanche, nous voulons voyager à l'intérieur de l'atome pour comprendre ce qui s'y trouve.

À L'INTÉRIEUR DE L'ATOME

L'électron semble vraiment fondamental ; s'il possède une structure interne propre, nous ne l'avons pas encore découverte. Le noyau central, quant à lui, est construit à partir d'autres particules, les **protons** et les **neutrons**.

Un proton est chargé positivement ; les protons fournissent la charge positive totale du noyau. Plus il y a de protons dans le noyau, plus sa charge est élevée et plus il y a d'électrons qui peuvent être maintenus comme des satellites autour de lui, pour former un atome dans lequel les charges

positives et négatives se contrebalancent, laissant l'atome globalement neutre. Ainsi, bien que des forces électriques intenses soient à l'œuvre au plus profond des atomes de notre corps, nous n'en sommes pas vraiment conscients et nous ne sommes pas non plus chargés électriquement. L'atome de l'élément le plus simple, l'hydrogène, est normalement constitué d'un seul proton et d'un seul électron. Le nombre de protons dans le noyau est ce qui différencie un élément d'un autre. Un groupe de 6 protons forme le noyau de l'atome de carbone, le fer en a 26 et l'uranium 92.

Les charges opposées s'attirent, les charges similaires se repoussent. Il est donc étonnant que les protons, qui se repoussent mutuellement par cette force électrique, parviennent à rester ensemble dans les limites du noyau. En effet, lorsque deux protons se touchent, ils peuvent s'agripper fermement l'un à l'autre grâce à ce que l'on appelle la force forte. Cette force d'attraction est beaucoup plus puissante que la répulsion électrique, et c'est ainsi que les noyaux de nos atomes n'explosent pas spontanément. Cependant, on ne peut pas mettre trop de protons à proximité les uns des autres, car les perturbations électriques finissent par être trop importantes. C'est l'une des raisons pour lesquelles il existe l'élément naturel le plus lourd, l'uranium, dont chaque noyau contient 92 protons. S'il y a plus de protons que cela, le noyau ne peut pas survivre. Au-delà de l'uranium, on trouve des éléments hautement radioactifs tels que le plutonium, dont l'instabilité est tristement célèbre.

Les noyaux atomiques de tous les éléments autres que l'hydrogène contiennent des protons et des neutrons. Le neutron est en fait une version électriquement neutre du proton. Il a la même taille et, à une fraction de pourcentage près, la même masse que le proton. Les neutrons s'agrippent les uns aux autres avec la même force que les protons. N'ayant pas

de charge électrique, ils ne ressentent aucune perturbation électrique, contrairement aux protons. Par conséquent, les neutrons s'ajoutent à la masse d'un noyau et à la force d'attraction forte globale, et contribuent ainsi à stabiliser le noyau.

Lorsque les neutrons se trouvent dans cet environnement, par exemple lorsqu'ils font partie du noyau d'un atome de fer, ils peuvent survivre inchangés pendant des milliards d'années. Cependant, loin de ce regroupement compact, un neutron isolé est instable. En effet, un neutron libre n'est que 1,4 fois plus massif qu'un proton et, selon l'équivalence entre la masse et l'énergie d'Einstein, $E = mc^2$, il contient donc plus d'énergie. La nature cherche à trouver la stabilité en minimisant cette énergie. Elle le fait grâce à une autre force, appelée force faible, dont l'un des effets est de détruire le neutron en le transformant en proton. Cela peut même se produire lorsque trop de neutrons sont regroupés avec des protons dans un noyau. Cette conversion a pour effet de transformer le noyau d'un élément en un autre. Cette transmutation des éléments est à l'origine de la radioactivité et de l'énergie nucléaire.

Agrandissez un neutron ou un proton 1 000 fois et vous constaterez qu'ils ont eux aussi une riche structure interne. Comme un essaim d'abeilles qui, vu de loin, apparaît comme une tache sombre alors qu'une vue rapprochée montre le nuage bourdonnant avec énergie, il en va de même pour le neutron ou le proton. Sur une image de faible puissance, ils apparaissent comme de simples taches, mais lorsqu'on les observe avec un microscope à haute résolution, on s'aperçoit qu'il s'agit d'amas de particules plus petites appelées **quarks**.

Reprenons l'analogie du point final. Nous avons dû l'agrandir à 100 mètres pour voir un atome à l'œil nu, au diamètre de la planète⁴ pour voir le noyau. Pour révéler les quarks,

4. NDT. Le diamètre de la Terre est de 12 742 km.

il faudrait agrandir le point jusqu'à la Lune, puis continuer au-delà, jusqu'à encore 20 fois plus loin. En résumé, la structure sous-jacente de l'atome dépasse l'imagination.

Nous avons enfin atteint les particules fondamentales de la matière telles que nous les connaissons actuellement. Les électrons et les quarks sont comme les lettres de l'alphabet de la nature, les pièces de base à partir desquelles tout peut être construit. S'il existe quelque chose de plus primaire, comme le point et le tiret du code Morse, nous ne savons pas avec certitude de quoi il s'agit. Certains pensent que, si l'on pouvait grossir un électron ou un quark un milliard de milliards de fois de plus, on découvrirait que le code Morse sous-jacent ressemble à des cordes, qui vibrent dans un univers dont on découvre qu'il a plus de dimensions que les trois dimensions d'espaces et celle du temps dont nous sommes normalement conscients.

L'avenir nous dira si c'est la réponse ou non. Je voudrais vous parler de la façon dont nous avons appris à connaître l'électron et les quarks, qui ils sont, comment ils se comportent et quelles sont les questions qui se posent à nous.

LES FORCES

Si les électrons et les quarks sont comme les lettres de l'alphabet, il existe aussi des analogies avec la grammaire : les règles qui collent les lettres pour en faire des mots, des phrases et de la littérature. Pour l'Univers, cette colle est ce que nous appelons les forces fondamentales. Elles sont au nombre de quatre, dont la gravité est la plus familière, c'est-à-dire la force qui régit la matière brute. La matière est maintenue ensemble par la force électromagnétique ; c'est elle qui retient les électrons dans les atomes et relie les atomes entre eux pour former des molécules et des structures plus

grandes. À l'intérieur et autour du noyau agissent les deux autres forces : la force forte et la force faible. La force forte colle les quarks dans les petites sphères que nous appelons protons ou neutrons ; à leur tour, ces sphères sont maintenues étroitement serrées dans le noyau atomique. La force faible transforme une variété de particules en une autre, comme dans certaines formes de radioactivité. Elle peut transformer un proton en neutron, ou inversement, ce qui conduit à la transmutation des éléments. Ce faisant, elle libère également des particules connues sous le nom de neutrinos. Il s'agit de particules neutres légères et volantes qui ne réagissent qu'aux forces faible et gravitationnelle. Des millions d'entre elles vous traversent en ce moment même ; elles proviennent de la radioactivité naturelle des roches qui se trouvent sous vos pieds, mais la majorité des neutrinos proviennent du Soleil, produits dans son four nucléaire central, et remontent même au Big Bang.

Pour la matière sur la Terre et la plupart de ce que nous pouvons voir dans le cosmos, c'est l'ensemble des protagonistes qu'il vous faudra rencontrer. Pour fabriquer tout ce qui existe ici, il faut les ingrédients que sont l'électron et le neutrino, ainsi que deux variétés de quarks, appelés *up*⁵ et *down*, qui ensemencent les neutrons et les protons des noyaux atomiques. Les quatre forces fondamentales agissent ensuite sur ces particules de base de manière sélective, construisant la matière brute, et finalement vous, moi, le monde qui nous entoure et la plus grande partie de l'Univers visible.

5. NDT. La « matière ordinaire » se compose d'une « première génération » de quarks, par exemple *down* et *up* qui donnent les neutrons (à charge nulle) ; de même les protons (charge positive) sont formés de deux quarks *up* et d'un quark *down*. Les quarks dits de deuxième et troisième générations sont plus lourds, forment des particules toutes instables, et se désintègrent en quarks de première génération.

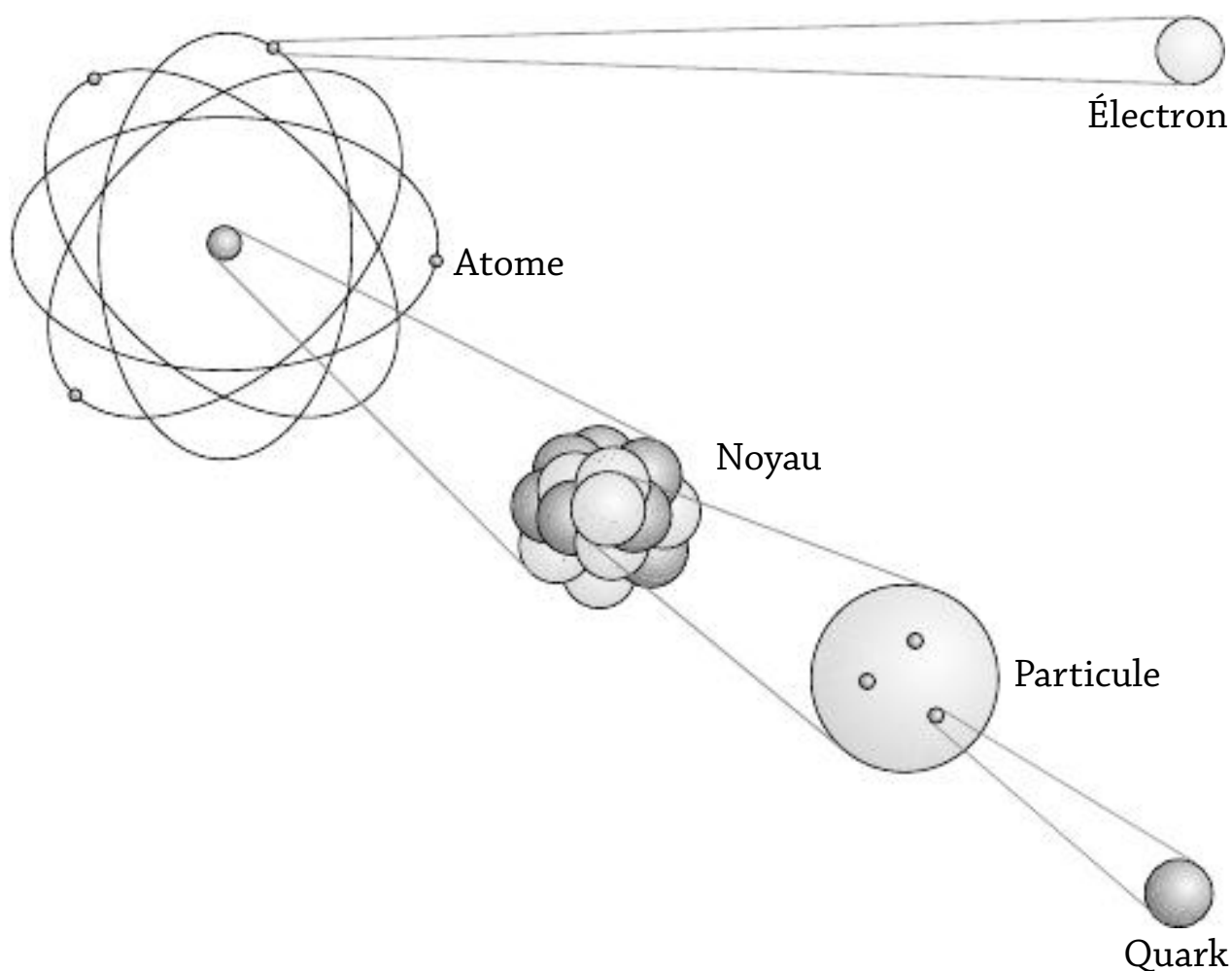


Fig. 1 L'intérieur de l'atome. Les atomes sont constitués d'électrons entourant à distance un noyau central massif. Le noyau est constitué de protons et de neutrons. Les protons sont chargés positivement ; les neutrons ne portent pas de charge. Les protons et les neutrons sont à leur tour constitués de particules encore plus petites appelées quarks. D'après nos meilleures expériences, les électrons et les quarks semblent être des particules de base sans constituants plus profonds.

Comme dit l'adage, une image vaut mille mots et je simplifie en résumant l'histoire présentée jusque-là dans les figures montrant la structure interne d'un atome et les forces de la nature.

COMMENT SAVONS-NOUS CELA ?

La manière dont nous connaissons ces choses constitue un élément important de cet ouvrage. Pour percevoir l'Univers à toutes les échelles, depuis la vaste étendue des galaxies jusqu'aux distances petites (au-delà de l'imaginable) à l'intérieur du noyau

atomique, nous devons élargir la portée de nos sens au moyen d'instruments. Les télescopes nous permettent de regarder vers l'extérieur et les microscopes révèlent l'aspect des choses à de petites distances. Pour regarder à l'intérieur du noyau atomique, il faut des microscopes spéciaux appelés accélérateurs de particules. Grâce à des champs électriques, des particules chargées électriquement, telles que des électrons ou des protons, sont accélérées jusqu'à quasiment la vitesse de la lumière, puis percutent des cibles de matière ou se heurtent les unes aux autres. Les résultats de ces collisions peuvent révéler la structure profonde de la matière. Ils révèlent non seulement les quarks qui ensemencent le noyau atomique, mais aussi des formes exotiques de matière portant des noms fantaisistes – *strange*, *charm*, *bottom*, et *top* – ainsi que des formes apparemment plus lourdes de l'électron, connues sous les noms de muon et tau. Ces formes ne jouent aucun rôle évident dans la matière que l'on trouve normalement sur Terre et l'on ne comprend pas tout à fait pourquoi la nature les utilise. Répondre à ces questions est l'un des défis auxquels nous sommes actuellement confrontés.

Bien que ces formes exotiques ne soient pas répandues aujourd'hui, il semble qu'elles aient été abondantes dans les premiers instants qui ont suivi le Big Bang, qui a marqué le début de notre Univers matériel. Les résultats des expériences sur les particules de haute énergie ont également permis de mieux comprendre les effets de ces expériences. Pendant 50 ans, la physique des particules de haute énergie s'est attachée à révéler la structure interne profonde de la matière et à comprendre les formes exotiques de matière qui étaient apparues de manière inattendue. Dans le dernier quart du XX^e siècle, une vision profonde de l'Univers est apparue : l'Univers matériel actuel est issu d'un Big Bang extrêmement chaud, et les collisions entre particules subatomiques sont capables de recréer momentanément les conditions qui prévalaient à cette époque précoce.

Nous considérons donc aujourd'hui les collisions entre particules de haute énergie comme un moyen d'étudier les phénomènes qui régnaient à l'époque de la naissance de l'Univers. Nous pouvons étudier la façon dont la matière a été créée et découvrir les variétés qui existaient. À partir de là, nous pouvons construire l'histoire de l'évolution de l'Univers matériel depuis le chaudron originel jusqu'aux conditions froides qui règnent aujourd'hui sur Terre, où la matière est fabriquée à partir d'électrons, sans besoin de muons et de taus, et où les germes des noyaux atomiques sont simplement les quarks ascendants et descendants, sans besoin d'éléments étranges ou charmés.

En termes très généraux, voici le déroulement de ce qui s'est passé. La matière qui est née dans le Big Bang chaud était constituée de quarks et de particules comme l'électron. L'Univers était rempli d'une *essence* omniprésente, connue sous le nom de « champ de Higgs », sans laquelle le vide de l'espace aurait été instable. Les interactions entre les particules fondamentales et le champ de Higgs leur confèrent une masse. Nous ne savons pas encore pourquoi ces masses ont leurs valeurs spécifiques. En ce qui concerne les quarks, les variétés *strange*, *charm*, *bottom* et *top* sont très instables et ont disparu en une fraction de seconde, la force faible les convertissant en descendants plus stables, les variétés « haut » et « bas » qui survivent en nous aujourd'hui. Une histoire similaire s'est déroulée pour l'électron et ses versions plus lourdes, le muon et le tau. Cette dernière paire est également instable et s'est éteinte, grâce à la force faible, laissant l'électron seul survivant. Au cours de ces désintégrations, de nombreux neutrinos et rayonnements électromagnétiques ont également été produits et continuent d'essaimer dans l'Univers quelque 14 milliards d'années plus tard.

Les quarks *up* et *down* et les électrons ont été les survivants lorsque l'Univers était encore très jeune et chaud. En se refroidissant, les quarks se sont collés les uns aux autres, formant

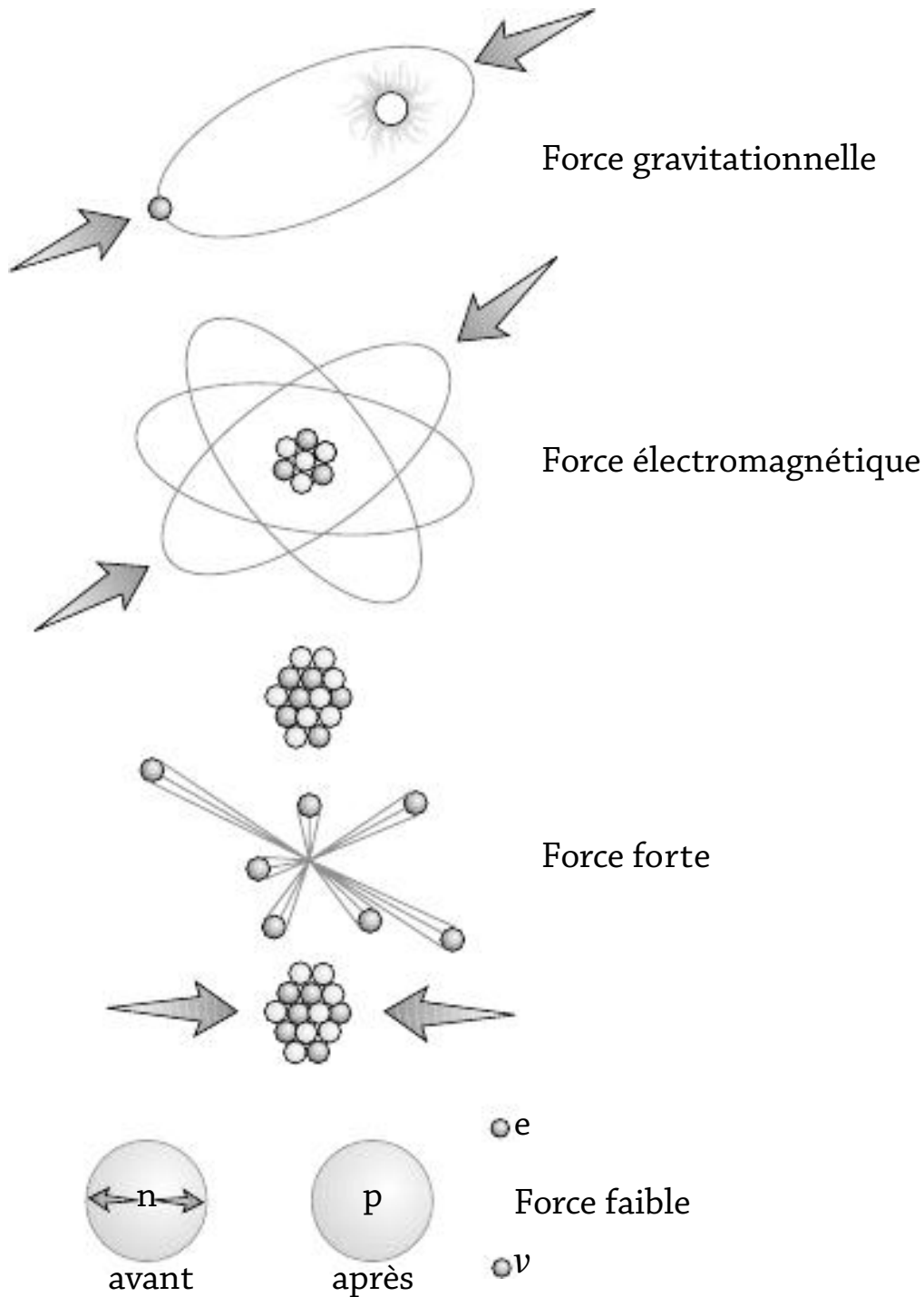


Fig. 2 Les forces de la nature. La gravité est attractive et contrôle les mouvements à grande échelle des galaxies, des planètes et des pommes qui tombent. Les forces électriques et magnétiques maintiennent les électrons à l'extérieur des atomes. Elles peuvent être attractives ou répulsives et tendent à se contrebalancer dans la matière brute, laissant la gravité dominer à grande distance. La force forte colle les quarks les uns aux autres, formant des neutrons, des protons et d'autres particules. Sa puissante attraction s'exerce entre les protons et les neutrons lorsqu'ils se touchent et contribue à créer le noyau compact au cœur des atomes. La force faible peut transformer une forme de particule en une autre. Cela peut entraîner la transmutation des éléments, comme la transformation de l'hydrogène en hélium dans le Soleil.

les protons et les neutrons. L'attraction gravitationnelle mutuelle entre ces particules les a rassemblées dans de grands nuages qui ont formé les étoiles primitives. En se heurtant les uns aux autres au cœur de ces étoiles, les protons et les neutrons ont constitué les germes d'éléments plus lourds. Certaines étoiles sont devenues instables et ont explosé, éjectant ces noyaux atomiques dans l'espace, où ils ont piégé des électrons pour former les atomes de la matière telle que nous la connaissons. C'est ce qui s'est produit, selon nous, il y a environ 5 milliards d'années, lors de la formation de notre système solaire ; vous et moi sommes aujourd'hui constitués d'atomes provenant d'une supernova morte depuis longtemps.

Ce que nous pouvons faire maintenant dans le cadre d'expériences, c'est inverser le processus et observer la matière se transformer pour retrouver ses formes primitives d'origine. En chauffant la matière à quelques milliers de degrés, ses atomes s'ionisent – les électrons sont séparés des noyaux centraux. C'est ainsi que cela se passe à l'intérieur du Soleil. Le Soleil est un plasma, c'est-à-dire un gaz composé d'électrons et de protons chargés électriquement et tourbillonnant indépendamment les uns des autres. À des températures encore plus élevées, typiques des conditions qui peuvent être atteintes dans des accélérateurs de haute énergie relativement petits, les noyaux sont désintégrés en leurs protons et neutrons constitutifs. À des énergies encore plus élevées, ces derniers « fondent » à leur tour en un plasma de quarks circulant librement. Aux énergies extrêmes accessibles par le Grand collisionneur de hadrons, le LHC du CERN, il s'est avéré possible d'exciter le champ de Higgs, formant ainsi des bosons de Higgs. Nous savons donc que nous sommes immergés dans ce champ omniprésent, qui confère leur masse aux particules fondamentales.

Comment tout cela s'est produit, comment nous le savons et ce que nous avons découvert, tels sont les thèmes de ce livre.

2

« Grand et petit », c'est « grand » comment et « petit » comment ?

DES QUARKS AUX QUASARS

L'Univers n'est pas le même partout : le Soleil et les étoiles sont beaucoup plus chauds que la Terre, et la matière prend des formes différentes, mais elle est en fin de compte constituée de la même substance. Les atomes sont très petits, le cosmos est très grand. Comment se comparent-ils aux objets de la vie quotidienne ?

Les étoiles sont énormes et visibles à l'œil nu sur de très grandes distances. Le contraste est saisissant avec leurs composants de base, les particules qui finissent par constituer les atomes. Il faudrait environ un milliard d'atomes superposés pour atteindre le niveau de votre tête ; il faudrait un nombre similaire de personnes, mesurées de la tête aux pieds et additionnées pour obtenir le diamètre du Soleil. L'échelle de mesure humaine se situe donc à peu près à mi-chemin entre celle du Soleil et celle d'un atome. Les particules qui

composent les atomes – les électrons qui forment les régions extérieures et les quarks qui sont les graines ultimes du noyau central – sont elles-mêmes un facteur supplémentaire d'environ un milliard de fois plus petit que l'ensemble atomique.

Un être humain adulte mesure un peu moins de 2 mètres. Pour une grande partie de ce que nous allons voir dans ce livre, les ordres de grandeur ont plus d'importance que les valeurs précises. Ainsi, pour définir l'échelle, je considérerai que les êtres humains mesurent environ 1 mètre en « ordre de grandeur » (ce qui signifie que nous sommes beaucoup plus grands que $1/10$ de mètre, ou 10^{-1} m, et, par conséquent, d'autant plus petits que 10 m). Si l'on passe ensuite aux grandes échelles de l'astronomie, le rayon de la Terre⁶ est de 10^7 m (c'est-à-dire 1 suivi de sept zéros) ; celui du Soleil est de 10^9 m ; notre orbite autour du Soleil est de 10^{11} m (ou, en unités plus lisibles, 100 millions de kilomètres). Pour référence ultérieure, notez que les tailles relatives de la Terre, du Soleil et de notre orbite sont d'un facteur 100 environ.

Les distances supérieures deviennent de plus en plus difficiles à visualiser, avec un grand nombre de zéros lorsqu'elles sont exprimées en mètres, c'est pourquoi une nouvelle unité est utilisée : l'année-lumière. La lumière se déplace à une vitesse de 300 000 kilomètres par seconde. C'est rapide mais pas infini : il faut à la lumière une nanoseconde, c'est-à-dire 10^{-9} s, pour parcourir 30 cm, ce qui correspond à la taille de votre pied. Les ordinateurs modernes fonctionnent sur de telles échelles de temps, et ces « microtemps » deviendront essentiels lorsque nous entrerons dans le monde de l'atome.

6. NDT. Plus précisément, le diamètre de la Terre est de 12 742 km ; son rayon est donc de 6 371 km.

Pour l'instant, nous nous dirigeons vers l'autre extrême : les très grandes distances du cosmos et les temps très longs que met la lumière à voyager depuis des galaxies lointaines jusqu'à nos yeux.

Il faut 8 minutes à la lumière pour parcourir les 150 millions de kilomètres qui séparent la Terre du Soleil ; on dit donc que le Soleil est distant de 8 minutes-lumière. Il faut une année à la lumière pour parcourir 10^{16} m, et cette distance est donc appelée année-lumière. Notre galaxie, la Voie lactée, s'étend sur 10^{21} m, soit environ 100 000 années-lumière. Les galaxies se regroupent en amas qui s'étendent sur plus de 10 millions d'années-lumière. Ces amas sont eux-mêmes regroupés en superamas, d'une longueur d'environ 100 millions d'années-lumière (ou 10^{24} m). L'étendue de l'Univers visible est d'environ 10 milliards d'années-lumière, soit 10^{26} m. Ces chiffres ne sont pas très importants, mais remarquez que l'Univers n'est pas homogène et qu'il est plutôt regroupé en structures distinctes : superamas, amas de galaxies et galaxies individuelles comme la nôtre, chacune étant plus petite que la précédente d'environ 1/100. Lorsque nous pénétrerons dans le micromonde, nous ferons à nouveau l'expérience de ces couches de structure, mais à une échelle beaucoup plus petite : non pas 1/100, mais plutôt 1/10 000.

Après ce voyage dans les grandes échelles de l'espace, prenons la direction opposée, celle du micromonde des atomes et de leur structure interne. À l'œil nu, nous pouvons distinguer des morceaux de poussière d'une taille comprise entre un dixième et un centième de millimètre : 10^{-4} à 10^{-5} m. Cela correspond à la partie supérieure de la taille d'une bactérie. La lumière est une forme d'onde électromagnétique, et la longueur d'onde de la lumière visible que nous voyons sous forme d'arc-en-ciel s'étend de 10^{-6} à 10^{-7} m. Les atomes sont

mille fois plus petits que cela : environ 10^{-10} m. C'est le fait que les atomes sont tellement plus petits que la longueur d'onde de la lumière visible qui les met hors de portée de notre vision normale.

Tout ce qui existe sur Terre est constitué d'atomes. Chaque élément possède son plus petit morceau, bien trop petit pour être vu à l'œil nu, mais néanmoins réel, comme peuvent le montrer des instruments spéciaux.

Pour résumer ici le chapitre 1, les atomes sont constitués de particules plus petites. Les électrons tourbillonnent dans les régions éloignées : au cœur de ces particules se trouve le noyau atomique compact et massif. Le noyau a sa propre structure, composée de protons et de neutrons eux-mêmes constitués de particules encore plus petites : les « quarks ». Les quarks et les électrons sont à l'origine de la matière telle que nous la trouvons sur Terre.

Alors que l'atome mesure typiquement 10^{-10} m de diamètre, son noyau central ne mesure que 10^{-14} à 10^{-15} m environ. Il faut donc se méfier de l'analogie souvent citée selon laquelle les atomes sont comme des systèmes solaires miniatures, avec les « électrons planétaires » encerclant le « soleil nucléaire ». Le système solaire réel présente un facteur de 1/100 entre notre orbite et la taille du soleil central ; l'atome est beaucoup plus vide, avec 1/10 000 comme rapport correspondant entre l'étendue de son noyau central et le rayon de l'atome. Et ce vide persiste. Les protons et les neutrons ont un diamètre d'environ 10^{-15} m et sont à leur tour constitués de particules encore plus petites, les quarks. Si les quarks et les électrons ont une taille intrinsèque, elle est trop petite pour que nous puissions la mesurer. Tout ce que nous pouvons dire avec certitude, c'est qu'elle ne dépasse pas 10^{-18} m.

Ici encore, nous constatons que la taille relative du quark par rapport au proton est de l'ordre de 1/10 000 (tout au

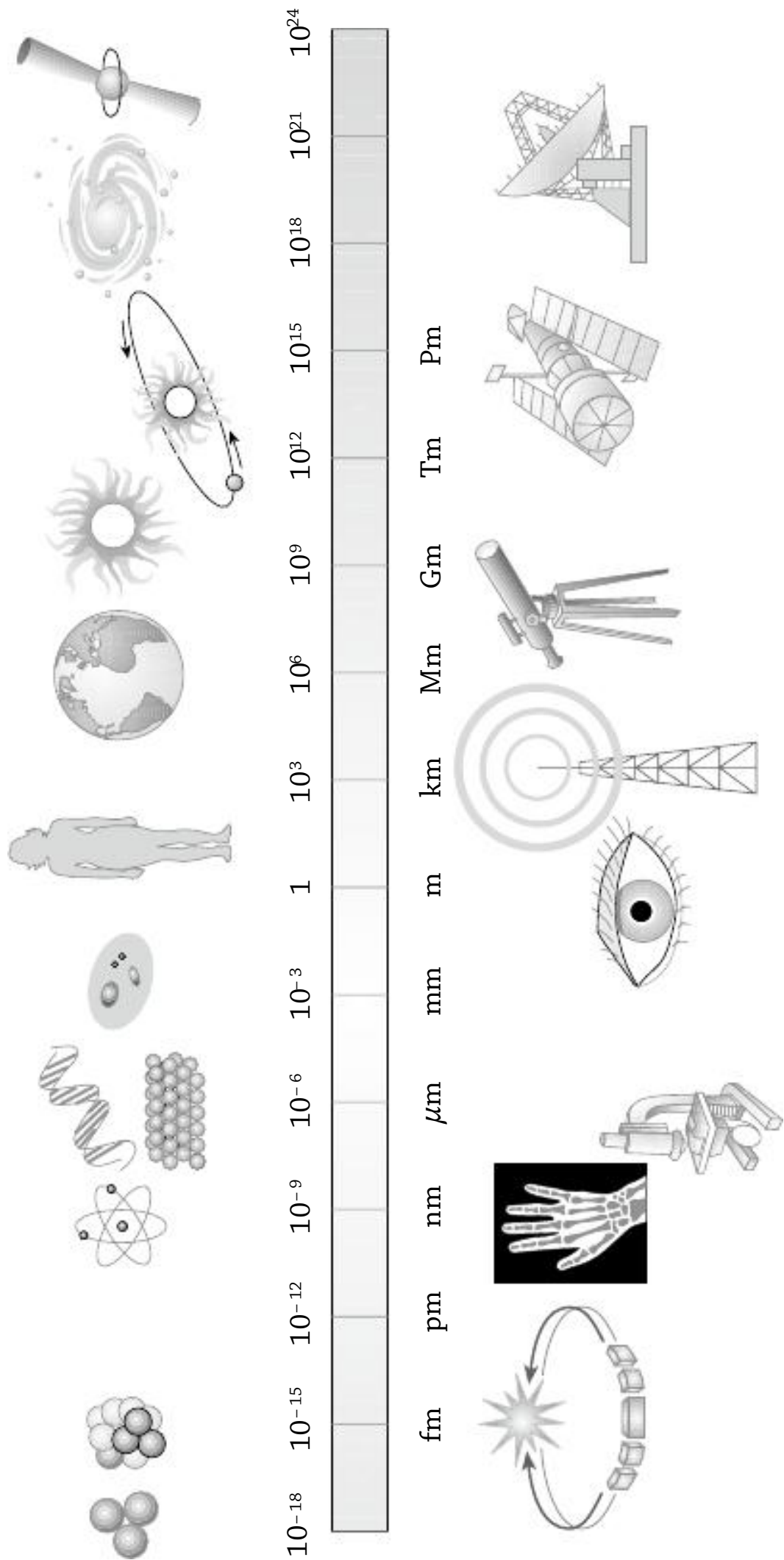


Fig. 3 Comparaisons entre l'échelle humaine et les échelles au-delà de la vision normale. À petite échelle, 10^{-6} mètre correspond à 1 micron, 10^{-9} mètre à 1 nanomètre et 10^{-15} mètre à 1 fermi.

plus !). Il en va de même pour l'électron « planétaire » par rapport au proton « soleil » : 1/10 000 au lieu du simple 1/100 du système solaire réel. Le monde à l'intérieur de l'atome est donc incroyablement vide.

Pour vous faire une meilleure idée, imaginez le « trou » le plus long que vous puissiez trouver sur un terrain de golf, disons 500 m. La longueur relative de ce fairway par rapport à la taille du minuscule trou dans lequel vous finirez par envoyer la balle est d'environ 10 000:1 et donc similaire à celle du rayon de l'atome d'hydrogène par rapport à son noyau central, le proton.

Tout comme les grandes distances deviennent difficiles à gérer lorsqu'elles sont exprimées en mètres, il en va de même pour les dimensions submicroscopiques des structures atomiques et nucléaires. Dans le premier cas, nous avons introduit l'année-lumière, 10^{16} m ; dans le second, il est d'usage d'utiliser l'angström, Å, où 1 angström = 10^{-10} m (typiquement la taille d'un atome simple), et le fermi, fm, où 1 fm = 10^{-15} m. Ainsi, les angströms sont des unités utiles pour mesurer la taille des atomes et des molécules, tandis que les fermis sont naturels pour les noyaux et les particules. (Ångström et Fermi étaient des scientifiques atomiques et nucléaires célèbres aux XIX^e et XX^e siècles respectivement).

Nos yeux voient des choses à l'échelle humaine ; nos ancêtres ont développé des sens qui les protégeaient des prédateurs et n'avaient pas besoin d'yeux pour voir les galaxies qui émettent des ondes radio ou les atomes de notre ADN. Aujourd'hui, nous pouvons utiliser des instruments pour étendre nos sens : des télescopes qui étudient les profondeurs de l'espace et des microscopes qui révèlent les bactéries et les molécules. Nous disposons de « microscopes » spéciaux pour révéler des distances plus petites que les atomes : c'est le rôle des accélérateurs de particules à haute énergie. Grâce

à ces outils, nous pouvons révéler la nature sur une vaste gamme d'échelles de distance. Les chapitres 5 et 6 traiteront de la manière dont cela se fait pour les particules.

L'UNIVERS EN TERMES DE TEMPÉRATURE ET DE TEMPS

C'est ainsi que les choses se présentent aujourd'hui, mais il n'en a pas toujours été ainsi. L'Univers, tel que nous le connaissons, a commencé par un Big Bang chaud où les atomes ne pouvaient pas survivre. Aujourd'hui, environ 14 milliards d'années plus tard, l'Univers dans son ensemble est très froid et les atomes peuvent y survivre. Il existe des points chauds locaux, tels que des étoiles comme notre Soleil, et la matière qui s'y trouve diffère de celle que l'on trouve ici sur notre Terre, relativement froide. Nous pouvons même simuler les conditions extrêmes des fractions de seconde qui ont immédiatement suivi le Big Bang, lors d'expériences réalisées dans des accélérateurs de particules, et voir comment les germes de base de la matière ont dû émerger à l'origine. Cependant, bien que les formes que prend la matière varient à travers l'espace et le temps, les éléments de base sont communs. La façon dont la matière apparaît dans le froid (aujourd'hui), dans le chaud (comme dans le Soleil et les étoiles) et dans l'ultra-chaud (comme au moment des conséquences immédiates du Big Bang) est le thème de cette section.

En physique macroscopique, nous comptabilisons l'énergie en joules ou, dans les grandes industries, en mégajoules ou térajoules. En physique atomique, nucléaire et des particules, les énergies en jeu sont insignifiantes en comparaison. Si un électron, chargé électriquement, est accéléré par le champ électrique d'une batterie de 1 volt, il acquiert une

énergie de $1,6 \times 10^{-19}$ J. Même lorsqu'il est projeté à une vitesse proche de celle de la lumière, que l'on atteint dans les accélérateurs du CERN à Genève, l'énergie ne mesure encore que 10^{-8} J, soit un centième d'un millionième de joule. Ces petits nombres font désordre, c'est pourquoi il est d'usage d'utiliser une autre mesure, connue sous le nom d'« électronvolt », ou eV. Nous avons dit plus haut que lorsque l'électron est accéléré par le champ électrique d'une pile de 1 volt, un électron acquiert une énergie de $1,6 \times 10^{-19}$ J, et c'est cette énergie que nous définissons comme 1 électronvolt.

Les énergies impliquées dans la physique subatomique deviennent maintenant gérables. Nous appelons mille eV un kilo-eV, ou keV ; un million (méga), 10^6 eV, est 1 MeV ; un milliard (giga), 10^9 eV, est 1 GeV ; et les expériences les plus récentes sont menées dans la région du « téra » ou 10^{12} eV, 1 TeV.

La célèbre équation d'Einstein $E = mc^2$ indique que l'énergie peut être échangée contre de la masse, et vice versa, le « taux d'échange » étant c^2 , le carré de la vitesse de la lumière. L'électron a une masse de 9×10^{-31} kg. Une fois de plus, ces chiffres sont compliqués, et nous utilisons donc $E = mc^2$ pour quantifier la masse et l'énergie, ce qui donne environ 0,5 MeV pour l'énergie d'un seul électron au repos ; nous indiquons traditionnellement sa masse comme étant $0,5 \text{ MeV}/c^2$. La masse d'un proton dans ces unités est de $938 \text{ MeV}/c^2$, soit près de $1 \text{ GeV}/c^2$.

L'énergie est également profondément liée à la température. Si un grand nombre de particules se heurtent les unes aux autres, transférant de l'énergie de l'une à l'autre de manière à ce que l'ensemble soit à une température fixe, l'énergie moyenne des particules individuelles peut être exprimée en eV (ou en keV, etc.). La température ambiante correspond à environ $1/40$ eV, soit 0,025 eV. Il est peut-être

plus facile d'utiliser la mesure de $1 \text{ eV} \Leftrightarrow 10^4 \text{ K}$ (où K fait référence au Kelvin, la mesure absolue de la température ; le zéro absolu 0 K vaut -273 degrés Celsius, et la température ambiante est d'environ 300 K).

Si vous lancez une fusée avec suffisamment d'énergie, elle pourra échapper à l'attraction gravitationnelle de la Terre ; donnez suffisamment d'énergie à un électron dans un atome et il pourra échapper à l'attraction électrique du noyau atomique. Dans de nombreuses molécules, les électrons seront libérés par une énergie de quelques fractions d'électronvolt ; la température ambiante peut donc être suffisante pour ce faire, ce qui est à l'origine de la chimie, de la biologie et de la vie. Les atomes d'hydrogène survivront à des énergies inférieures à 1 eV , ce qui, en termes de température, est de l'ordre de 10^4 K . De telles températures ne se produisent pas normalement sur Terre (à l'exception d'exemples spécifiques tels que certains fours industriels, les lampes à arc au carbone et les appareils scientifiques), et les atomes sont donc la norme ici. Cependant, au centre du Soleil, la température est d'environ 10^7 K , soit 1 keV en termes d'énergie ; les atomes ne peuvent pas survivre à de telles conditions.

À des températures supérieures à 10^{10} K , l'énergie disponible est suffisante pour être convertie en particules, telles que les électrons. Un électron individuel a une masse de $0,5 \text{ MeV}/c^2$, et il faut donc une énergie de $0,5 \text{ MeV}$ pour qu'il se transforme en électron. Comme nous le verrons plus loin, cela ne peut pas se produire spontanément ; un électron et son homologue en antimatière, le positron, doivent être créés en tant que paire. Une énergie de 1 MeV est donc nécessaire pour que la création d'un électron ou d'un positron se produise. De même, une énergie de 2 GeV est nécessaire pour créer un proton et son antiproton. De telles énergies sont aujourd'hui faciles à produire dans les laboratoires nucléaires

et les accélérateurs de particules ; elles étaient la norme au tout début de l'Univers, et c'est au cours de ces premiers instants que les particules fondamentales de la matière (et de l'antimatière) ont été formées. Nous reviendrons en détail sur ce sujet dans le chapitre 9, mais il est utile d'en donner les grandes lignes dès à présent.

On observe que les galaxies s'éloignent rapidement les unes des autres et que l'Univers est en expansion. À partir du taux d'expansion, nous pouvons remonter le scénario dans le temps et en déduire qu'il y a environ 14 milliards d'années, l'Univers se serait compacté sur lui-même. C'est l'éruption explosive de cet état dense que nous appelons le Big Bang⁷. Dans cet état originel, l'Univers aurait été beaucoup plus chaud qu'il ne l'est aujourd'hui. L'Univers actuel baigne dans un rayonnement micro-onde dont la température est d'environ 3 K. En combinant ce rayonnement avec l'image de l'expansion post-Big Bang, on obtient une mesure de la température de l'Univers en fonction du temps.

Dans le milliardième de seconde qui a suivi le Big Bang, la température de l'Univers aurait dépassé 10^{16} K, soit, en termes d'énergie, 1 TeV. Le champ de Higgs a rempli et stabilisé le vide. Certains théoriciens se demandent s'il n'a pas contribué à l'expansion inflationniste initiale de l'Univers, mais il n'existe encore aucune preuve empirique pour valider cette hypothèse. Ce que nous savons, c'est qu'à de telles énergies, des particules et antiparticules fondamentales ont été créées, y compris des formes exotiques qui ne sont plus courantes aujourd'hui, et qu'elles ont acquis une masse grâce à leur interaction avec le champ de Higgs. La plupart de ces variétés exotiques se sont éteintes presque immédiatement,

7. Pour en savoir plus, lisez l'ouvrage de Peter Coles intitulé *Cosmology* dans la série *Very Short Introduction* d'Oxford University Press.

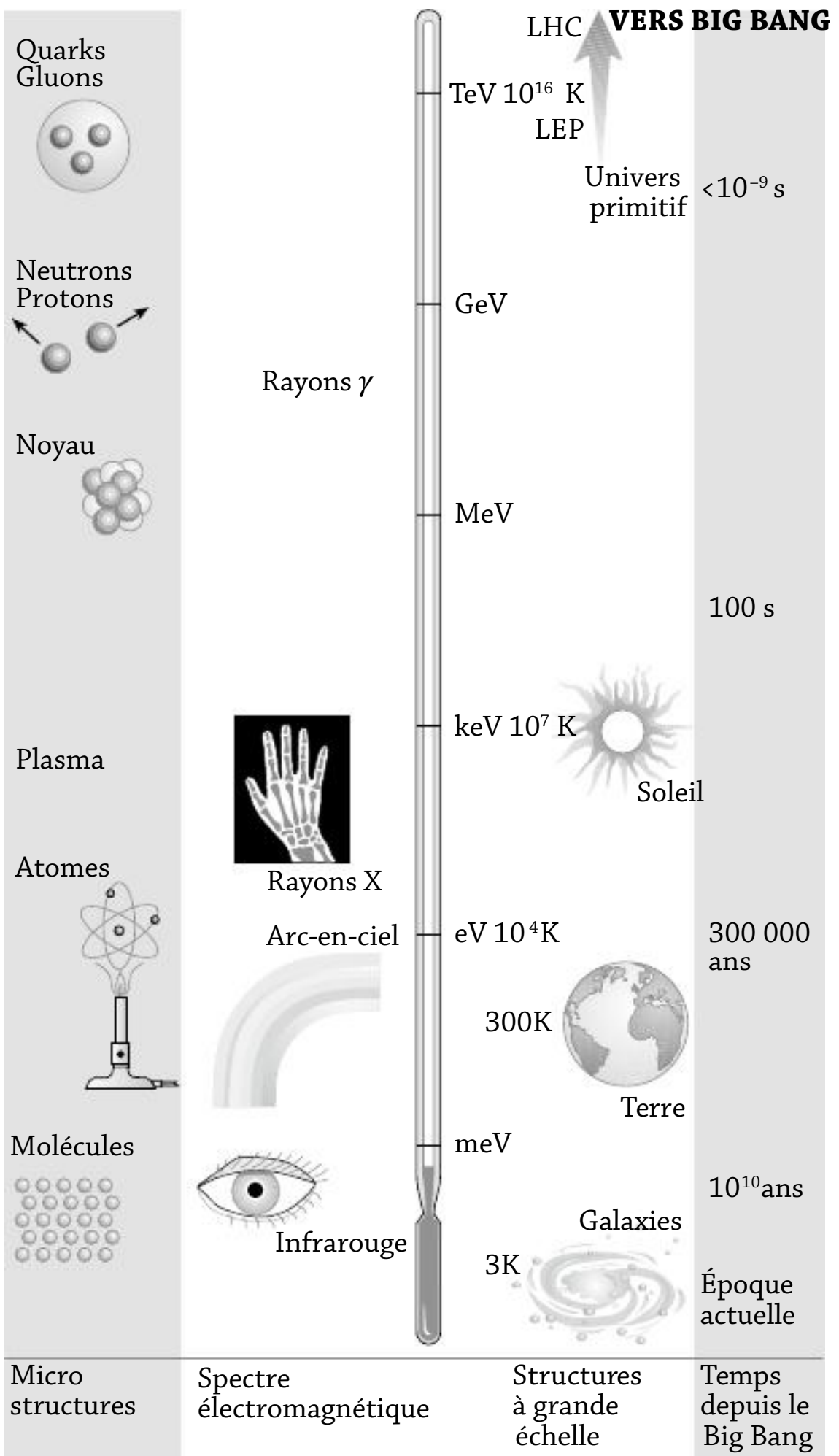


Fig. 4 Correspondance entre les échelles de température et d'énergie en électronvolts (eV).

produisant des rayonnements et davantage de particules de base telles que les électrons et les quarks survivants qui constituent la matière actuelle.

Avec l'âge, l'Univers s'est refroidi, dans un premier temps très rapidement. En l'espace d'un millionième de seconde, les quarks se sont regroupés par trois, ce qu'ils n'ont jamais cessé de faire depuis. C'est ainsi que sont nés les protons et les neutrons. Après environ trois minutes, la température est tombée à environ 10^{10} K, soit une énergie de 1 MeV. Cette température est suffisamment « froide » pour que les protons et les neutrons se collent les uns aux autres et constituent les germes nucléaires des éléments atomiques (qui n'existent pas encore). Quelques noyaux légers ont été formés, par exemple l'hélium et des traces de béryllium et de bore. Les protons, stables et les plus simples, étaient les plus courants et se sont regroupés sous l'effet de la gravité en boules sphériques que nous appelons étoiles. C'est là que les noyaux des éléments lourds allaient être « cuits » au cours des milliards d'années à venir. Dans le chapitre 9, je décrirai comment les protons de ces étoiles se sont heurtés les uns aux autres, se sont regroupés et, par une série de processus combinatoires, ont produit les germes nucléaires d'éléments plus lourds : d'abord l'hélium, puis les éléments plus lourds tels que l'oxygène, le carbone et le fer. Lorsque ces étoiles explosent et meurent, elles projettent ces germes nucléaires dans le cosmos, et c'est de là que proviennent le carbone de votre peau et l'oxygène de notre air.

Le Soleil est en train de vivre la première partie de cette histoire. Il convertit les protons en noyaux d'hélium depuis 5 milliards d'années et a utilisé environ la moitié de son combustible jusqu'à présent. Les températures en jeu dans son cœur sont similaires à celles de l'Univers tout entier lorsqu'il était âgé de quelques minutes. Le Soleil poursuit donc aujourd'hui ce que l'Univers primitif a fait il y a très longtemps.

Les atomes ne peuvent pas survivre dans les profondeurs du Soleil, pas plus qu'ils ne pouvaient le faire dans l'Univers primitif. Ce n'est qu'au bout de 300 000 ans que l'Univers s'est suffisamment refroidi pour que ces noyaux capturent les électrons qui circulent et forment des atomes. C'est ainsi que les choses se passent aujourd'hui sur Terre.

3

Comment nous apprenons de quoi les choses sont faites et ce que nous avons découvert

L'ÉNERGIE ET LES ONDES

Des instruments tels que les microscopes et les accélérateurs de particules nous permettent d'étendre notre vision au-delà de l'arc-en-ciel de la lumière visible et de voir dans le micromonde subatomique. Cela nous a permis de découvrir la structure interne de l'atome : les électrons, les particules nucléaires et les quarks.

Pour découvrir la composition d'un objet, on peut : (a) le regarder, (b) le chauffer et voir ce qui se passe, ou (c) l'écraser en se servant de la force brute. On croit souvent à tort que c'est cette dernière méthode que les physiciens des hautes énergies, ou « des particules », utilisent. Il s'agit d'un terme hérité de l'époque où les accélérateurs de particules étaient connus sous le nom de « briseurs d'atomes ». Et en effet,

historiquement, c'est ce qui s'est passé, mais aujourd'hui les objectifs et les méthodes sont plus sophistiqués. Nous entrerons dans les détails plus tard, mais pour commencer, concentrons-nous sur les trois options que nous venons de mentionner. Chacune d'entre elles présente une caractéristique commune : elles consomment toutes de l'énergie.

Dans le cas du chauffage, nous avons déjà vu comment la température et l'énergie sont corrélées ($10^4 \text{ K} \sim 1 \text{ eV}$). Par conséquent, même en regardant les choses, l'énergie s'avèrera jouer un rôle.

Vous voyez ces mots parce que la lumière brille sur la page et est transmise à vos yeux ; l'idée générale est qu'il y a une source de rayonnement (la lumière), un objet à étudier (la page) et un détecteur (votre œil). À l'intérieur d'un point, il y a des millions d'atomes de carbone, et vous ne pourrez jamais voir les atomes individuels, même avec la loupe la plus puissante. Ils sont plus petits que la longueur d'onde de la lumière « visible » et ne peuvent donc pas être distingués individuellement par une loupe ordinaire ou un microscope optique.

La lumière est une des formes de rayonnement électromagnétique. Nos yeux ne réagissent qu'à une très petite partie du spectre électromagnétique, mais des instruments spéciaux permettent d'accéder à l'ensemble de ce spectre. La lumière visible est le rayonnement le plus puissant émis par le Soleil, et l'homme a développé des yeux qui n'enregistrent que cette gamme particulière. L'ensemble du spectre électromagnétique est présent, comme nous pouvons l'illustrer par une analogie avec le son. Une seule octave de son implique une division par deux de la longueur d'onde (ou un doublement de la fréquence) entre une note (disons le « la » à 440 Hz) et celle d'une octave supérieure (le « la » à 880 Hz). Il en va de même pour l'arc-en-ciel : il s'agit d'une « octave » dans le spectre électromagnétique. Lorsque l'on passe de la

lumière rouge à la lumière bleue, la longueur d'onde diminue de moitié, la longueur d'onde de la lumière bleue étant la moitié de celle de la lumière rouge (ou, dit autrement, la fréquence à laquelle les champs électriques et magnétiques oscillent est deux fois plus rapide pour la lumière bleue que pour la lumière rouge). Le spectre électromagnétique s'étend plus loin dans les deux directions. Au-delà de l'horizon bleu – où l'on trouve les ultraviolets, les rayons X et les rayons gamma –, les longueurs d'onde sont plus petites que dans l'arc-en-ciel visible ; en revanche, à des longueurs d'onde plus grandes et dans la direction opposée, au-delà du rouge, on trouve les infrarouges, les micro-ondes et les ondes radio.

Nous pouvons percevoir le spectre électromagnétique au-delà de l'arc-en-ciel ; nos yeux ne peuvent pas voir le rayonnement infrarouge, mais la surface de notre peau peut le ressentir sous forme de chaleur. Les caméras infrarouges modernes peuvent « voir » les rôdeurs grâce à la chaleur qu'ils dégagent. C'est le génie humain qui a créé des machines capables d'étendre notre vision à toute la gamme électromagnétique, révélant ainsi des vérités profondes sur la nature de l'atome.

Notre incapacité à voir les atomes est due au fait que la lumière agit comme une onde et que les ondes ne se dispersent pas facilement à partir de petits objets. Pour voir une chose, la longueur d'onde du faisceau doit être plus petite que cette chose. Par conséquent, pour voir des molécules ou des atomes, il faut des éclairages dont les longueurs d'onde sont similaires ou inférieures à celles des molécules ou des atomes. Les ondes lumineuses, comme celles auxquelles nos yeux sont sensibles, ont une longueur d'onde d'environ 10^{-7} m (autrement dit, 10 000 longueurs d'onde tiendraient dans un millimètre). Cette longueur d'onde est tout de même 1 000 fois supérieure à la taille d'un atome. Pour se faire une idée de l'ampleur de

la tâche, il suffit d'imaginer le monde en augmentant l'échelle de 10 millions de fois. Une seule longueur d'onde de lumière, grossie 10 millions de fois, serait plus grande qu'un humain, alors qu'un atome à cette échelle ne s'étendrait que sur 1 millimètre, ce qui est bien trop peu pour perturber la longue d'onde bleue. Pour avoir une chance de voir les molécules et les atomes, nous avons besoin de lumière avec des longueurs d'onde beaucoup plus courtes. Nous devons aller bien au-delà de l'horizon bleu, jusqu'aux longueurs d'onde de la région des rayons X et plus petites encore.

Les rayons X sont une lumière dont les longueurs d'onde sont si courtes qu'elles peuvent être diffusées par des structures régulières à l'échelle moléculaire, comme celles que l'on trouve dans les cristaux. La longueur d'onde des rayons X est supérieure à la taille des atomes individuels, qui restent donc invisibles. Cependant, la distance entre les plans adjacents dans la matrice régulière des cristaux est similaire à la longueur d'onde des rayons X. Les rayons X commencent donc à discerner la position relative des éléments dans les cristaux. C'est ce qu'on appelle la « cristallographie aux rayons X ».

Une analogie peut être faite si l'on pense un instant aux ondes aquatiques plutôt qu'aux ondes électromagnétiques. Si on laisse tomber une pierre dans une eau calme, des ondulations se produisent. Si l'on vous montrait une image de ces motifs circulaires, vous pourriez déduire où la pierre se trouvait au départ. Un ensemble de pierres synchronisées jetées dans l'eau créera un motif d'ondes plus complexe, avec des pics et des creux au fur et à mesure qu'elles se rencontreront et interféreront. À partir de ce schéma, il est possible de déduire, non sans difficulté, il faut l'admettre, l'endroit où les pierres sont entrées dans l'eau. La cristallographie aux rayons X consiste à détecter les multiples ondes diffusées par les couches régulières du cristal, puis à décoder le motif pour en déduire la structure

cristalline. C'est ainsi que l'on a pu déduire la forme de molécules très compliquées, telles que l'ADN.

Pour distinguer les atomes individuels, nous avons besoin de longueurs d'onde encore plus courtes, et nous pouvons le faire en utilisant non seulement la lumière, mais aussi des faisceaux de particules telles que les électrons. Ces derniers présentent un avantage particulier : ils ont une charge électrique et peuvent donc être manipulés, accélérés par des champs électriques et recevoir ainsi de grandes quantités d'énergie. Cela nous permet de sonder des distances de plus en plus courtes, mais pour comprendre pourquoi, nous devons faire un bref détour pour voir comment l'énergie et la longueur d'onde sont liées.

L'une des grandes découvertes de la théorie quantique est que les particules peuvent avoir un caractère ondulatoire et, inversement, que les ondes peuvent se comporter comme des paquets de particules en *staccato*, appelés « quanta ». Ainsi, une onde électromagnétique se comporte comme une rafale de quanta-photons. L'énergie de chaque photon est proportionnelle à la fréquence (ν) des champs électriques et magnétiques oscillants de l'onde. Cela s'exprime sous la forme :

$$E = h\nu$$

où la constante de proportion, h , est la constante de Planck.

La longueur d'une onde (λ) et la fréquence à laquelle les crêtes passent en un point donné sont liées à sa vitesse, c , par $\nu = c/\lambda$. Nous pouvons donc relier l'énergie et la longueur d'onde :

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

et la constante de proportionnalité $hc \sim 10^{-6}$ eV m. Cela nous permet de relier l'énergie et la longueur d'onde par la règle approximative suivante : « 1 eV correspond à 10^{-6} m », et ainsi de suite.

Vous pouvez faire la comparaison avec la relation entre l'énergie et la température du chapitre 2, et voir comment la température et la longueur d'onde sont liées. Cela illustre le fait que des corps à des températures différentes ont tendance à rayonner à des longueurs d'onde différentes : plus le corps est chaud, plus la longueur d'onde est courte. Par exemple, lorsqu'un courant traverse un filament métallique et le réchauffe, il émet d'abord de la chaleur sous forme de rayonnement infrarouge et, lorsqu'il devient plus chaud (environ 1 000 degrés), il commence à émettre de la lumière visible et à éclairer la pièce. Les gaz chauds à proximité du Soleil peuvent émettre des rayons X ; certaines étoiles extrêmement chaudes émettent des rayons gamma.

Énergie	1 eV	1 keV	1 MeV	1 GeV	1 TeV
Longueur d'onde (m)	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}	10^{-18}

Fig. 5 Énergie et longueur d'onde approximative.

Pour sonder les atomes en profondeur, nous avons besoin d'une source de longueur d'onde très courte. Comme nous ne pouvons pas fabriquer d'étoile émettrice de rayons gamma en laboratoire, la technique consiste à utiliser les particules de base elles-mêmes, telles que les électrons et les protons, et à les accélérer dans des champs électriques. Plus leur vitesse est élevée, plus leur énergie et leur quantité de mouvement sont importantes et plus la longueur d'onde qui leur est associée est courte. Les faisceaux de particules à haute énergie peuvent donc distinguer des objets aussi petits que des atomes. Il suffit d'accélérer les particules, de leur donner de plus en plus d'énergie pour obtenir des longueurs d'onde de plus en plus petites. Pour résoudre des distances à l'échelle du noyau atomique, 10^{-15} m, il faut des énergies de l'ordre du GeV. C'est l'échelle d'énergie de ce que l'on appelle la physique des hautes énergies. En effet, lorsque

ce domaine a débuté sérieusement du début au milieu du XX^e siècle, les énergies de l'ordre du GeV étaient à la limite de ce qui était techniquement disponible. À la fin du XX^e siècle, des énergies de plusieurs centaines de GeV étaient la norme, et nous entrons maintenant dans le domaine des énergies à l'échelle du TeV, sondant et analysant la matière à des distances inférieures à 10^{-18} m. Ainsi, lorsque nous disons que les électrons et les quarks n'ont pas de structure plus profonde, nous ne pouvons vraiment dire qu'« au moins à des échelles de 10^{-18} m ». Il est possible qu'il existe des couches plus profondes, sur des distances inférieures à celles-ci, mais qui sont au-delà de notre capacité actuelle à les résoudre par l'expérience. Ainsi, même si je parlerai tout au long de ce livre comme si ces entités étaient les pièces ultimes, il faut toujours garder à l'esprit cette mise en garde : nous ne savons comment la nature fonctionne qu'à des distances supérieures à environ 10^{-18} m.

COMMENT ACCÉLÉRER DES PARTICULES ?

L'idée des accélérateurs sera décrite dans le chapitre 5, mais pour l'instant, réfléchissons un instant à ce que cela implique. L'accélération de particules à haute énergie nécessite beaucoup d'espace. La technologie du milieu et de la fin du XX^e siècle permettait d'accélérer les électrons, disons à un taux correspondant à l'augmentation de l'énergie de chaque électron du faisceau de quelques dizaines de MeV par mètre parcouru. Ainsi, le Stanford Linear Accelerator Center (SLAC) en Californie contenait un accélérateur de 3 km de long qui produisait des faisceaux d'électrons jusqu'à 50 GeV, tandis que dans les années 1990, au CERN à Genève, les électrons étaient propulsés et guidés autour d'un anneau circulaire de 27 km de long, atteignant des énergies de l'ordre de 100 GeV. Les protons, plus massifs, sont plus puissants,

mais nécessitent toujours de grands accélérateurs pour atteindre leurs cibles. Aujourd'hui, ce tunnel de 27 km au CERN abrite le Grand collisionneur de hadrons (le LHC), qui accélère les protons et les noyaux lourds à des énergies supérieures à 1 TeV, c'est-à-dire 1 000 GeV. En fin de compte, c'est la relation quantique entre les courtes distances, les courtes longueurs d'onde nécessaires pour les sonder et les hautes énergies des faisceaux qui crée cet apparent paradoxe : il faut des machines de plus en plus grandes pour sonder les distances les plus infimes.

Tels étaient les premiers objectifs des expériences visant à sonder le cœur du noyau atomique en le frappant avec des faisceaux de particules à haute énergie. L'énergie des particules contenues dans le faisceau est énorme (à l'échelle de l'énergie contenue dans un seul noyau, qui maintient le noyau ensemble) et, par conséquent, le faisceau a tendance à briser l'atome et ses particules en morceaux, engendrant de nouvelles particules dans le processus. C'est pour cette raison que l'on parlait autrefois de « broyeurs d'atomes ». Aujourd'hui, nous avons dépassé ce stade, et ce terme de « broyeur » n'est plus d'actualité.

L'ÉLECTRON ET LE PROTON

L'électron et le proton sont les particules chargées électriquement qui constituent les atomes. Un atome de l'élément le plus simple, l'hydrogène, est normalement constitué d'un seul électron (chargé négativement) et d'un proton ayant la même charge, mais positive. Ainsi, bien qu'un atome puisse être électriquement neutre dans l'ensemble (comme c'est le cas de la plupart des matières brutes qui nous sont familières), il contient des charges négatives et positives. Ce sont ces charges, et les forces électrique et magnétique qui en

découlent, qui lient les atomes en molécules et en matière. Nous aborderons les forces de la nature dans le chapitre 7. Ici, nous nous concentrerons sur ces particules de base chargées électriquement et sur la manière dont elles ont été utilisées comme outils pour sonder la structure atomique et nucléaire.

Les faisceaux d'électrons ont été utilisés au XIX^e siècle, mais personne ne savait alors de quoi il s'agissait. Lorsque des courants électriques traversaient des gaz à des pressions extrêmement basses, un faisceau mince comme un crayon apparaissait. Ces faisceaux ont été appelés « rayons cathodiques » et, comme nous le savons aujourd'hui, ils sont constitués d'électrons. L'exemple le plus familier de cet appareil est la télévision classique, où la cathode est le filament chaud à l'arrière duquel les faisceaux d'électrons émergent et frappent l'écran.

La surprise fut grande au XIX^e siècle lorsque l'on découvrit que les rayons pouvaient traverser la matière solide de part en part, presque comme si rien ne s'y opposait. C'est un paradoxe : la matière solide au toucher est transparente à l'échelle atomique. Philipp Lenard⁸, qui a découvert ce phénomène, a fait remarquer que « l'espace occupé par un mètre cube de platine solide est aussi vide que l'espace entre les étoiles au-delà de la Terre ». Les atomes peuvent être essentiellement de l'espace vide, mais quelque chose les définit, donnant une masse aux choses. Les travaux d'Ernest Rutherford, au début du XX^e siècle, ont clairement montré que l'espace n'est pas tout à fait vide. Cela s'est produit après les découvertes de l'électron et de la radioactivité, qui ont fourni les outils essentiels permettant de mettre en évidence la structure atomique.

8. NDT. **Philipp Eduard Anton von Lenard** [1862-1947] est un physicien allemand, qui a reçu le prix Nobel de physique (1905). Lenard était un expérimentateur connu pour ses contributions à l'étude des rayons cathodiques.

L'électron a été découvert et identifié comme un constituant fondamental des éléments atomiques par J. J. Thomson⁹ en 1897. Chargés négativement, les électrons sont présents dans les atomes depuis que la Terre existe. Ils sont faciles à extraire, des températures de quelques milliers de degrés suffisent. Des champs électriques les accélèrent, leur donnent de l'énergie et permettent ainsi à des faisceaux d'électrons de haute énergie de sonder des structures à petite échelle.

Il existe d'autres balles atomiques. Le proton a une charge électrique positive, de même amplitude que la charge négative de l'électron, mais en masse le proton l'emporte largement, puisqu'il est près de 2 000 fois plus massif. Les protons permettent de réaliser un faisceau de choix pour les recherches subatomiques, mais à l'origine, c'est une autre entité chargée électriquement qui s'est avérée déterminante. Il s'agit de la particule alpha.

Nous savons aujourd'hui qu'il s'agit du noyau d'un atome d'hélium : un amas compact de deux protons et de deux neutrons, chargé positivement et environ quatre fois plus massif qu'un seul atome d'hydrogène. La raison pour laquelle ce phénomène a été mis en évidence est que les noyaux de nombreux éléments lourds sont radioactifs, émettant spontanément des particules alpha et fournissant ainsi librement une source de sondes chargées électriquement. Les noyaux lourds sont constitués d'un grand nombre de protons et de neutrons serrés les uns contre les autres, et le phénomène de la radioactivité alpha se produit lorsqu'un noyau lourd gagne en stabilité en éjectant spontanément un paquet serré de deux protons et de deux neutrons. Les détails de ce phénomène ne nous intéressent pas ici, il suffit d'admettre qu'il

9. NDT. **Joseph John Thomson** [1856-1940] ; ne pas confondre avec **William Thomson**, alias Lord Kelvin [1824-1907].

se produit, que la particule « alpha » émerge avec de l'énergie cinétique et peut percuter les atomes de la matière environnante. C'est ainsi qu'Ernest Rutherford et ses assistants Geiger et Marsden ont découvert l'existence du noyau atomique.

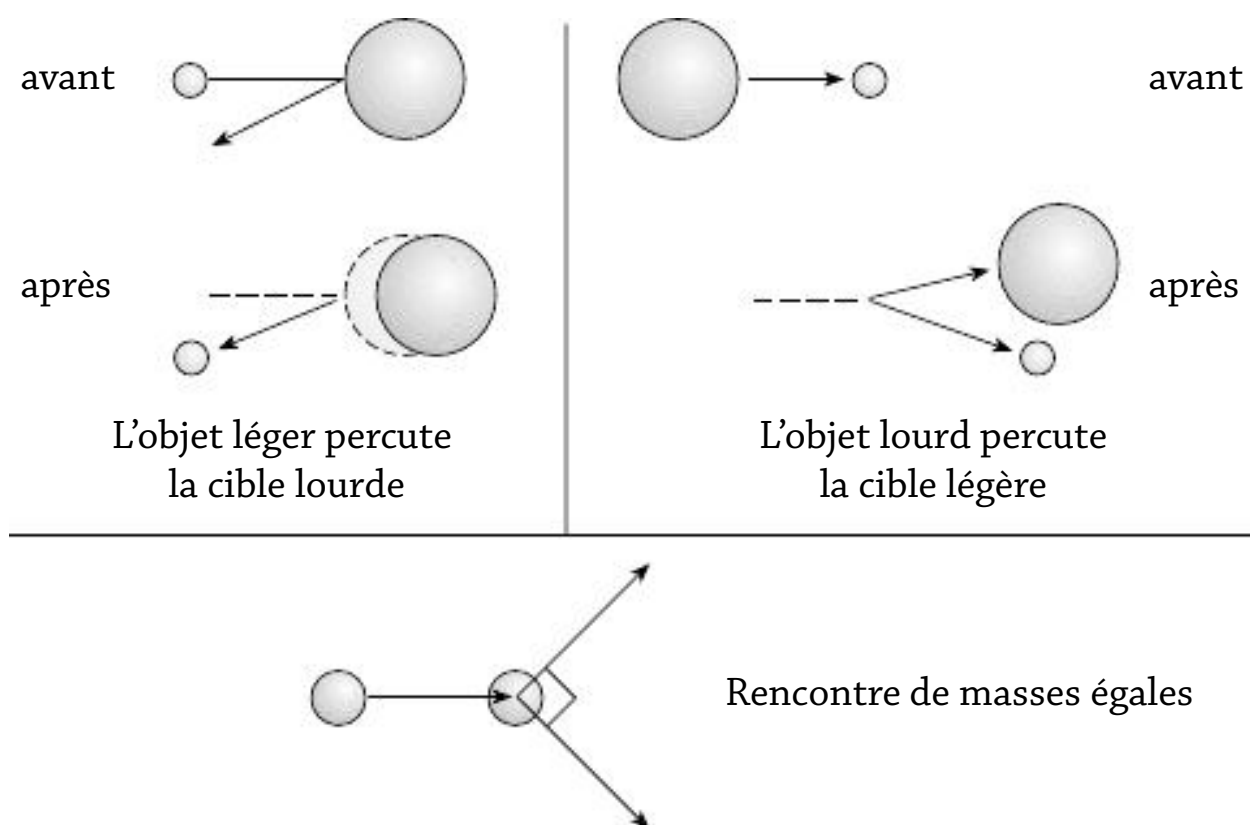


Fig. 6 Résultat de l'impact d'objets lourds et légers sur des cibles légères et lourdes, respectivement.

Lorsque des particules alpha rencontrent des atomes, elles sont parfois dispersées violemment, voire renvoyées dans la direction opposée. C'est ce qui se produit lorsque la charge positive d'un élément lourd, comme l'or, est concentrée dans une masse centrale compacte. Les alphas chargées positivement ont été repoussées par le noyau atomique chargé positivement ; et de même qu'un objet léger, comme une balle de tennis, peut reculer devant un objet lourd comme un ballon de football, les alphas ont reculé devant le noyau massif de l'atome d'or.

Les particules alpha sont beaucoup plus légères que les noyaux d'or, mais plus lourdes qu'un proton, le noyau de

l'atome d'hydrogène. Par conséquent, si des particules alpha sont projetées sur l'hydrogène, on se retrouve dans une situation similaire à celle d'un ballon de football frappant une balle de tennis légère. Dans ce cas, le ballon de football aura tendance à poursuivre sa trajectoire, faisant tomber la balle de tennis vers l'avant dans la même direction générale. Ainsi, lorsque les particules alphas relativement massives frappent les protons de l'hydrogène, ce sont ces protons qui sont éjectés vers l'avant. Ces protons ont été détectés par les traces qu'ils laissaient dans les chambres à nuages (voir le chapitre 6).

Ces expériences menées au début du XX^e siècle ont permis d'établir l'idée de base de l'atome nucléaire. En résumé, la façon dont les particules alpha se sont dispersées à partir des atomes a permis d'établir l'image de l'atome que nous connaissons depuis lors : la charge positive vit dans un centre compact et volumineux – le noyau atomique – tandis que les négatives sont des électrons qui tourbillonnent à distance à la périphérie.

Les particules alpha naturelles ne sont pas très puissantes. Elles sont éjectées de noyaux lourds avec seulement quelques MeV d'énergie cinétique, ou quelques MeV/c de quantité de mouvement, et permettent donc de distinguer des structures sur des échelles de distance supérieures à 10^{-12} m. Certes, ces tailles sont inférieures à celles des atomes, ce qui rend les particules alpha si utiles, mais elles sont encore bien plus grandes que les 10^{-14} m d'étendue d'un noyau, même de grande taille, comme celui d'un atome d'or, sans parler des 10^{-15} m des protons et des neutrons individuels qui se combinent pour former ce noyau. Ainsi, bien que les particules alphas soient parfaites pour découvrir l'existence du noyau atomique, pour voir à l'intérieur de ces noyaux il faudrait des faisceaux plus énergétiques.

C'est dans cette optique que sont nés les débuts de la physique moderne des hautes énergies. En 1932, le premier accélérateur de particules¹⁰ chargées électriquement a été construit par Cockroft et Walton, et une image détaillée de la structure nucléaire et des particules qui la composent a commencé à émerger. Il est possible d'utiliser des faisceaux de noyaux atomiques, mais bien qu'ils aient été de véritables « briseurs d'atomes (ou plutôt de noyaux) » et qu'ils aient contribué à déterminer le modèle des isotopes nucléaires (formes d'un même élément contenant un nombre égal de protons mais un nombre différent de neutrons) et leurs détails, les informations les plus claires sur leurs constituants de base ont été fournies par les faisceaux les plus simples. Un noyau de carbone contient typiquement six protons et un nombre similaire de neutrons. Il y a donc beaucoup de débris lorsqu'il frappe un autre noyau, certains provenant du faisceau de carbone lui-même autant que de la cible. Il est donc difficile d'obtenir une interprétation claire. Le processus s'avère beaucoup plus propre quand on utilise un faisceau de protons uniquement ; c'était, et c'est encore aujourd'hui, l'un des principaux moyens de sonder le noyau, et des distances allant jusqu'à 10^{-19} m.

Les protons, qui portent la charge positive, sont les particules de choix depuis plus de 50 ans, car ils sont très puissants. Cependant, les électrons présentent des avantages particuliers, et une grande partie de nos connaissances actuelles sur la structure des noyaux atomiques, et même des protons et des neutrons qui les composent, est le résultat d'expériences utilisant des faisceaux d'électrons.

10. NDT. Le **générateur Cockcroft-Walton** était parmi les tout premiers accélérateurs de particules. Construit en 1937 par Philips à Eindhoven aux Pays-Bas, il est maintenant au Science Museum de Londres.

La radioactivité sous forme de désintégration bêta émet des électrons – le rayonnement « bêta » – qui pourraient être utilisés pour sonder la structure atomique. Cependant, ces électrons n'ont que quelques MeV d'énergie, comme c'était le cas pour les particules alpha, et souffrent donc des mêmes limitations : ils permettent de voir un noyau – tout comme les alpha – mais ils ne peuvent pas distinguer finement la structure interne du noyau. La clé du progrès consistait à ioniser les atomes, en libérant un ou plusieurs de leurs électrons, puis à accélérer le faisceau d'électrons accumulés au moyen de champs électriques. Dans les années 1950, à Stanford en Californie, des faisceaux d'une énergie de 100 MeV à 1 GeV par électron ont commencé à distinguer des distances approchant les 10^{-15} m. Les électrons diffusés par les protons et les neutrons ont commencé à révéler une couche de structure plus profonde à l'intérieur de ces particules nucléaires. Ces expériences ont montré que le neutron, bien qu'électriquement neutre dans l'ensemble, a des effets magnétiques et d'autres caractéristiques qui suggèrent qu'il y a des charges en lui, positive et négative, se contrebalançant d'une certaine manière, comme c'était le cas dans les atomes. On a également découvert que les protons avaient une taille finie, s'étendant sur une distance de l'ordre de 10^{-15} m. Une fois qu'il a été établi que les protons n'étaient pas des particules dites « ponctuelles », la question s'est posée de savoir comment la charge d'un proton se répartissait dans sa taille. Ces questions rappellent ce qui s'est passé des années auparavant dans le cas des atomes, et les réponses ont été apportées par des expériences similaires. Dans le cas de l'atome, le noyau nucléaire dur a été révélé par l'éparpillement de particules alpha ; dans le cas du proton, la réponse a été apportée par des faisceaux d'électrons à haute énergie.

C'est l'accélérateur linéaire d'électrons de 3 km de long de Stanford qui, en 1968, a permis de jeter le premier coup d'œil « propre » à l'intérieur du noyau atomique et de découvrir que les protons et les neutrons sont en fait de petites sphères de « quarks » qui grouillent dans tous les sens.

À des énergies supérieures à 10 GeV, les électrons peuvent sonder des distances de 10^{-16} m, soit dix fois plus petites que le proton dans son ensemble. Lorsqu'ils rencontrent le proton, les électrons sont violemment dispersés. Ce phénomène est analogue à ce qui s'est produit 50 ans plus tôt avec l'atome ; alors que la diffusion violente de particules alpha relativement peu énergétiques avait montré que l'atome possède un centre de charge dur, son noyau, la diffusion violente et inattendue de faisceaux d'électrons très énergétiques a montré que la charge d'un proton est concentrée sur des objets dits « ponctuels », les quarks (ponctuels dans le sens où nous ne sommes pas capables de discerner s'ils ont une sous-structure qui leur est propre). Dans les meilleures expériences que nous pouvons réaliser aujourd'hui, les électrons et les quarks semblent être les constituants de base de la matière brute.

4

Au cœur de la matière

Au cœur de la matière ordinaire, nous trouvons les quarks *up* et *down* et l'électron, tandis que la radioactivité révèle le fantomatique neutrino. Dans ce chapitre, nous verrons les rôles qu'ils jouent et comment leurs masses et autres propriétés sont essentielles à la création de la vie, de l'Univers, mais pas de tout. Les rayons cosmiques ont révélé l'existence de formes de matière extraterrestres qui n'existent pas à l'état naturel sur Terre. Parallèlement, le Soleil et les étoiles produisent de grandes quantités de neutrinos, ce qui inspire une nouvelle science : l'astronomie des neutrinos.

Nous avons décrit comment la découverte, il y a un siècle, de la structure atomique et du proton s'est faite grâce à la dispersion de faisceaux de particules de haute énergie à partir de ces atomes. Cependant, dans le cas des atomes et des protons, les premiers indices de l'existence d'une sous-structure sont apparus plus tôt, lors de la découverte des spectres.

Le premier indice de l'existence d'électrons dans les atomes a été la découverte que les éléments atomiques émettent de la lumière avec des longueurs d'onde discrètes qui se manifestent, par exemple, par des couleurs discrètes plutôt que par l'éventail complet de l'arc-en-ciel, ce que l'on appelle les raies spectrales. Nous savons aujourd'hui que la mécanique

quantique limite les états de mouvement des électrons à l'intérieur des atomes à un ensemble discret, dont chaque membre possède une énergie spécifique. La configuration dans laquelle un atome a l'énergie totale la plus faible est appelée « état fondamental » ; toutes les autres configurations ont des énergies plus importantes et sont appelées « états excités ». Les spectres atomiques sont dus à la lumière émise ou absorbée lorsque les électrons passent d'un état excité à un autre, ou d'un état excité à l'état fondamental. L'énergie est globalement conservée ; la différence d'énergie entre les deux états atomiques est égale à l'énergie du photon qui a été émis ou absorbé au cours du processus. Ce sont les spectres de ces photons qui ont révélé les différences entre les niveaux d'énergie de l'atome, et une image des niveaux d'énergie a pu être déduite à partir de l'ensemble de ces données. Par la suite, le développement de la mécanique quantique a permis d'expliquer comment le schéma des niveaux d'énergie émerge : il est déterminé par la nature des forces électriques et magnétiques qui lient les électrons autour du noyau central – en particulier, pour l'atome le plus simple, l'hydrogène, qui est intimement lié au fait que l'intensité de la force électrique entre son électron et son proton diminue comme le carré de la distance qui les sépare.

Des circonstances analogues se sont produites dans le cas du proton. Les expériences menées dans les années 1950 et 1960 avec les premiers « briseurs d'atomes » ont permis de découvrir de nombreux frères et sœurs plus lourds du proton et du neutron, connus sous le nom de « résonances », dont la durée de vie est très courte. Une panoplie d'états est apparue et, avec le recul, il est évident, même si ce n'était pas le cas à l'époque, que le proton et le neutron sont des systèmes composites constitués, comme nous le savons aujourd'hui, de quarks. C'est le mouvement de ces quarks qui donne sa taille au proton et au neutron, de la même manière que le mouvement des

électrons détermine la taille des atomes. Ce sont les quarks qui confèrent la charge électrique et les propriétés magnétiques d'un proton ou d'un neutron. Bien que la somme des charges électriques des quarks qui forment un neutron soit nulle, leurs magnétismes individuels ne s'annulent pas, ce qui conduit au moment magnétique du neutron. C'est lorsque les quarks sont dans l'état d'énergie le plus bas que les configurations que nous appelons proton et neutron apparaissent : excitez un ou plusieurs quarks à un niveau d'énergie plus élevé dans le potentiel qui les lie et vous formez une résonance de courte durée avec une énergie au repos, ou une masse, plus importante. La spectroscopie des états de résonance de courte durée est donc due à l'excitation des quarks constitutifs.

Cette situation s'apparente à celle des atomes. Cependant, il existe des différences importantes. Lorsque les électrons d'un atome reçoivent de plus en plus d'énergie, ils atteignent des niveaux d'énergie de plus en plus élevés, jusqu'à ce qu'ils soient éjectés de l'atome ; dans ce type de scénario, on dit que l'atome est « ionisé ». Dans le chapitre 2, nous avons vu qu'une température de 10^4 K fournit suffisamment d'énergie pour ioniser les atomes, comme c'est le cas dans le Soleil. Dans le cas du proton, lorsqu'il est soumis à des énergies de plus en plus élevées, ses quarks sont élevés à des niveaux supérieurs et des résonances de courte durée apparaissent. Cette énergie est rapidement libérée en émettant des photons ou, comme nous le verrons, d'autres particules, et l'état de résonance se désintègre à nouveau en proton ou en neutron. Personne n'a jamais ionisé un proton et libéré l'un des quarks qui le composent de manière isolée : les quarks semblent être confinés en permanence dans une région d'environ 10^{-15} m, c'est-à-dire de la « taille » du proton. À part cela, qui est une conséquence de la nature des forces entre les quarks, l'histoire est qualitativement similaire à celle des électrons dans les atomes. Les niveaux excités ont une courte durée de vie et libèrent l'énergie

excédentaire, généralement sous forme de photons de rayons gamma, et ensuite retournent à l'état fondamental (proton ou neutron). Inversement, on peut exciter ces états de résonance en diffusant les électrons des protons et des neutrons.

La dernière pièce de l'analogie est apparue vers 1970. Des faisceaux d'électrons, qui avaient été accélérés à des énergies de plus de 20 GeV, ont été diffusés à partir de flux de protons à Stanford, en Californie. De la même manière que Rutherford un demi-siècle plus tôt, on a observé que les électrons se dispersaient sous de grands angles. Il s'agissait d'une conséquence directe de la collision des électrons avec les quarks, les particules fondamentales ponctuelles qui composent le proton.

Ces expériences ont été étendues à des énergies plus élevées, notamment avec l'accélérateur HERA à Hambourg, en Allemagne. Les images à haute résolution du proton qui en résultent ont permis d'acquérir des connaissances fondamentales sur la nature des forces qui lient les quarks entre eux. Cela a donné naissance à la théorie des quarks connue sous le nom de chromodynamique quantique, sur laquelle nous reviendrons dans le chapitre 7. Sa capacité à décrire les interactions des quarks et des gluons à des distances inférieures à 10^{-16} m a passé tous les tests expérimentaux.

DES QUARKS AUX SAVEURS DISTINCTIVES

Trois quarks regroupés suffisent à fabriquer un proton ou un neutron. Il existe deux variétés différentes (ou « saveurs ») de quarks nécessaires à la fabrication d'un proton et d'un neutron, appelées *up* et *down* (traditionnellement résumées par leurs premières lettres, *u* et *d*, respectivement). Deux *up* et un *down* donnent naissance à un proton ; deux *down* et un *up* produisent un neutron.

Les quarks sont chargés électriquement. Un quark *up* porte une fraction de 2/3 de la charge (positive) d'un proton, tandis qu'un quark *down* porte la fraction de -1/3 de la charge (il est à noter qu'elle est négative). Ainsi, comme la charge électrique totale d'un ensemble est la somme des charges individuelles, nous avons pour la charge d'un proton $p(uud) = 2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$, et pour celle d'un neutron $n(ddu) = -1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$.

Les particules ont un moment angulaire intrinsèque, appelé « spin ». La quantité de spin est mesurée en unités du quantum de Planck, h , divisé par 2π ; comme cette combinaison se retrouve dans toute la physique atomique et des particules, elle est désignée par le symbole $\hbar$. Le proton, le neutron et les quarks ont chacun une quantité $\hbar/2$, ce qui s'écrit habituellement, en abrégé, « spin $1/2$ ».

Quark	<i>up</i>	<i>down</i>
Charge	+ 2/3	- 1/3
m^2 (MeV)	$\simeq 2$	$\simeq 5$
Spin	1/2	1/2

Fig. 7 Propriétés des quarks *up* et *down*.

L'axe du spin peut être orienté vers le haut ou vers le bas, et on écrira :

- pour un quark $q\uparrow$ ou $q\downarrow$ respectivement,
- deux quarks avec un spin net de $1\uparrow\uparrow$ ou $0\uparrow\downarrow$,
- trois quarks avec un spin net de $3/2\uparrow\uparrow\uparrow$ ou $1/2\uparrow\downarrow\uparrow$.

Exemples :

$$\begin{pmatrix} uud \\ \uparrow\uparrow\uparrow \end{pmatrix} = \Delta^+$$

$$\begin{pmatrix} uuu \\ \uparrow\uparrow\uparrow \end{pmatrix} = \Delta^{++} \text{ avec un spin } 3/2,$$

$$\begin{pmatrix} uud \\ \uparrow\downarrow\uparrow \end{pmatrix} \text{ ou } \begin{pmatrix} uuu \\ \uparrow\uparrow\downarrow \end{pmatrix} \text{ avec un spin } 1/2 = \text{proton}.$$

Fig. 8 Spins des quarks et leurs combinaisons.

Les valeurs de spins s'additionnent ou se soustraient tant que le total n'est pas négatif. Ainsi, en combinant deux particules ayant chacune un spin de $1/2$, on obtient 0 ou 1. L'addition de trois particules donne un total de $1/2$ ou $3/2$. Le proton et le neutron ont un spin de $1/2$ car les trois quarks ont couplé leurs spins individuels à la première possibilité. Lorsque les quarks se combinent pour atteindre un total de $3/2$, ils ont une énergie totale légèrement supérieure, ce qui forme les particules à courte durée de vie connues sous le nom de « résonances Δ », avec une masse supérieure d'environ 30 % à celle du proton ou du neutron, et qui survivent pendant moins de 10^{-23} s avant de se désintégrer en neutron ou en proton plus stable (10^{-23} s est une durée trop courte pour être imaginée, mais elle correspond approximativement au laps de temps que met la lumière à traverser un seul noyau atomique). Les règles de la théorie quantique (en l'occurrence le « principe d'exclusion de Pauli ») n'autorisent que certaines corrélations entre les spins et les saveurs des quarks, et c'est ce qui interdit en fin de compte à trois quarks *up* « identiques » (ou trois *down*) de se combiner en un spin net $1/2$; il n'existe donc pas de frères du proton et du neutron avec une charge + 2 ou - 1, constitués respectivement de *uuu* et de *ddd*. En revanche, lorsque les trois quarks ont couplé leurs spins pour atteindre un total de $3/2$, trois « saveurs » identiques de quark sont autorisées à se regrouper. Il existe ainsi des exemples tels que $\Delta^{++}(uuu)$ et $\Delta^{-}(ddd)$ (les exposants désignant leurs charges électriques). Les détails de l'émergence de ces corrélations impliquent des propriétés des quarks qui régissent les forces interquarks fortes (voir chapitre 7), mais dépassent le cadre de cette brève introduction.

Les quarks individuels ont une masse environ dix fois supérieure à celle d'un électron. Comme les protons et les neutrons ont des masses similaires, et près de 2 000 fois

supérieures à celle d'un électron, deux questions se posent. La première : comment le proton et le neutron atteignent-ils une masse aussi importante ? La seconde : la masse de ces quarks peut-elle être considérée comme similaire à celle de l'électron, ce qui laisse entrevoir une unité plus profonde entre les constituants fondamentaux de la matière ?

Les quarks s'agrippent si étroitement les uns aux autres qu'ils sont à jamais emprisonnés dans des groupes, comme le trio qui forme l'entité que nous appelons le proton. Aucun quark n'a jamais été isolé d'une telle famille ; leur univers ne s'étend que sur le 10^{-15} m qui correspond à la taille du proton, et c'est ce confinement dans le « femto-univers » de 10^{-15} m que nous appelons le proton qui leur confère collectivement une énergie de ~ 938 MeV, ce qui correspond à la masse du proton. Nous avons vu comment la longueur et l'énergie sont liées, et que des distances de l'ordre de 10^{-15} m correspondent à une énergie d'environ 1 GeV. La correspondance précise qui nous intéresse ici implique les facteurs 2 et π , qui dépassent le cadre de cet ouvrage, ce qui fait qu'un quark *up* ou *down*, qui, s'il était libre, n'aurait qu'une masse de quelques MeV, a une énergie de quelque 200-300 MeV lorsqu'il est limité à un femto-univers de 10^{-15} m. Les quarks interagissent fortement entre eux (ce qui doit être le cas puisqu'ils ne s'échappent pas !), et les détails complets de la façon dont la masse du proton s'avère être précisément de 938,4 MeV sont au-delà de notre capacité à les déduire à partir de la théorie à l'heure actuelle.

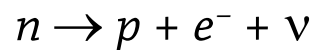
Le quark *down* est quelques MeV plus massif que le quark *up*. Nous ne savons pas pourquoi (en fait, nous ne savons pas pourquoi ces particules fondamentales, ainsi que l'électron, ont les masses qu'elles ont), mais cela explique pourquoi le neutron est légèrement plus massif que le proton. Des trios comme *uud* (proton) et *ddu* (neutron) ont chacun une masse

d'environ 1 GeV en raison de leur emprisonnement commun dans une région de 10^{-15} m. Il y aura des différences de l'ordre de 1 MeV du fait de deux caractéristiques : (i) par rapport au proton, le neutron possède un quark *down* supplémentaire au détriment d'un quark *up*, et la masse plus importante de ce quark *down* donne à l'ensemble formant le neutron une masse plus importante que le trio correspondant pour un proton ; (ii) les forces électrostatiques entre deux *up* et un *down* (comme dans un proton) seront différentes de celles entre deux *down* et un *up* (comme dans un neutron). Ces forces contribuent également à l'énergie totale à l'échelle du MeV. Ainsi, la différence de masse entre un neutron et un proton (expérimentalement 1,3 MeV) est due aux forces électrostatiques entre leurs quarks constitutifs et à la masse intrinsèque plus importante d'un quark *down* par rapport à un quark *up*.

Les quarks *up* et *down* sont frères dans la famille des quarks. L'électron n'est pas constitué de quarks et, pour autant que nous le sachions, il est lui-même fondamental, comme les quarks. En tant que tel, il appartient à une autre famille, celle des **leptons**. De même que les quarks *up* et *down* sont appariés, avec une différence d'une unité entre leurs charges électriques respectives (dans le sens où $+2/3 - (-1/3) = 1$), l'électron a un frère ou une sœur dont la charge électrique diffère de celle de l'électron d'une unité. Cette entité, sans charge électrique, est connue sous le nom de **neutrino**.

Les neutrinos sont produits lors de la désintégration radioactive de nombreux noyaux atomiques. Dans ces processus, ils apparaissent en même temps que leur frère, l'électron. Par exemple, tant qu'il n'est pas piégé dans un noyau, un neutron se transforme en proton en émettant un électron et un neutrino au cours du processus. C'est ce qu'on appelle

la désintégration bêta, où l'instabilité du neutron est due au fait qu'il a une masse légèrement supérieure à celle du proton. La nature cherche à atteindre l'état d'énergie le plus bas, ce qui se traduit dans ce cas par l'état de masse le plus bas. C'est le faible excès de masse d'un neutron qui le rend (légèrement) instable lorsqu'il est isolé. Si l'on dispose d'un grand échantillon de neutrons, chacun d'entre eux étant libre des autres, au bout d'une dizaine de minutes, la moitié se sera désintégrée par radioactivité bêta. Si nous désignons le neutron et le proton par les symboles n , p , et l'électron et le neutrino par e^- , ν , la désintégration bêta du neutron est résumée par l'expression suivante :



Le neutron n'a pas de charge électrique globale ; celle-ci est préservée dans la désintégration bêta, car le proton a une unité positive, contrebalançant ainsi l'électron négatif. Le proton, qui est l'état le plus léger composé de trois quarks, est stable (ou, du moins, si les protons sont instables, leur durée de vie moyenne est supérieure à 10^{32} ans !). Techniquement, un antineutrino est produit : voir plus loin la section Antiparticules.

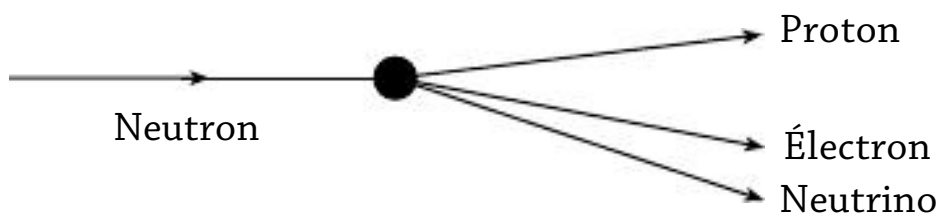


Fig. 9 ▸ Désintégration bêta d'un neutron.

LE NEUTRINO

Si on imagine que l'on retire la charge électrique de l'électron ainsi que (presque) toute sa masse, l'entité électriquement neutre qui en résulterait serait en fait un neutrino.

Dépourvu de charge électrique, le neutrino n'a pratiquement pas de masse et traverse presque tout. Les neutrinos, ignorant les forces électriques normales qui agissent au sein de la matière, sont difficiles à détecter. Il s'agit, au sens figuré, de la particule la plus nugatoire¹¹ qui soit.

Le neutrino est la première relique « fossile » du Big Bang et un messenger des premiers processus de l'Univers. Les neutrinos déterminent la vitesse d'expansion de ce dernier et peuvent déterminer son destin ultime. Dans les étoiles comme le Soleil, ils jouent un rôle essentiel dans la production des éléments lourds nécessaires à la vie. Le Soleil est alimenté par la fusion des protons près de son centre, qui se heurtent les uns aux autres, s'unissent et construisent les noyaux d'hélium.

Ce faisant, certains protons se transforment en neutrons par une forme de radioactivité bêta, et des neutrinos sont émis à cette occasion. L'effet est énorme : le Soleil produit des neutrinos à raison de 2×10^{38} par seconde. C'est 2 suivi de 38 zéros ; je ne peux même pas imaginer comment donner une idée de l'énormité de ce chiffre – c'est comme la taille relative de l'Univers entier par rapport à la taille d'un seul atome. Ces neutrinos s'envolent dans l'espace et nombre d'entre eux atteignent la Terre. Environ 400 milliards de neutrinos provenant du Soleil traversent chacun d'entre nous chaque seconde.

La radioactivité naturelle des éléments présents dans le sol, comme l'uranium, libère également des neutrinos : environ 50 milliards d'entre eux nous atteignent chaque seconde. Le Soleil en émet donc beaucoup : il en arrive huit fois plus

11. NDT. Peu usité, le terme anglais *nugatory*, qui est apparu pour la première fois au XVII^e siècle, signifie « bagatelles », **nugatoire** signifie « sans valeur, sans signification ».

par seconde, après s'être dispersés sur 100 millions de kilomètres dans l'espace, que sous nos pieds, ici, à la maison. Quant à nous, nous sommes radioactifs (principalement en raison de la désintégration du potassium présent dans nos os) et émettons quelque 400 neutrinos par seconde.

En somme, les neutrinos sont les particules les plus communes qui soient. Ils sont même plus nombreux à voler dans le cosmos que les photons, les particules de base de la lumière.

Les neutrinos provenant du Soleil traversent la matière presque sans contrôle, de sorte qu'il y en a autant qui traversent nos lits la nuit et qui brillent sur nos têtes le jour. Un de ces neutrinos pourrait traverser une année-lumière de plomb sans rien heurter. Cette propriété du neutrino est fréquemment mentionnée dans les articles de vulgarisation et soulève une question évidente : comment les détecter ? Deux solutions s'offrent à nous.

La première consiste à utiliser des sources de neutrinos très intenses, de sorte que le hasard fasse qu'un ou deux d'entre eux heurtent des atomes dans un détecteur et soient enregistrés. Bien qu'un seul neutrino ne puisse interagir qu'une fois par année-lumière, le Soleil en émet tellement que le hasard fait bien les choses. Vous ou moi n'avons pratiquement aucune chance de gagner à la loterie, mais il y a suffisamment de gens qui participent pour que quelqu'un gagne. Avec suffisamment de neutrinos qui nous éclairent et une grande quantité de matériel de détection, quelques-uns d'entre eux toucheront des atomes dans le détecteur et se révéleront. C'est ainsi qu'il a été possible de détecter des neutrinos provenant du Soleil, de la supernova SN1987A, ainsi que des neutrinos de très haute énergie provenant du cosmos. Une nouvelle science, l'astronomie des neutrinos, est en train de naître.

La deuxième propriété qui nous est utile est que leur « timidité » n'est vraie que pour les neutrinos de faible énergie, comme ceux émis par le Soleil. En revanche, les neutrinos de haute énergie (tels qu'ils sont produits dans certains processus cosmiques ou dans les accélérateurs de particules de haute énergie) ont une propension beaucoup plus grande à se révéler. C'est donc dans les accélérateurs à haute énergie que nous avons produit des neutrinos et que nous les avons étudiés en détail. C'est là que nous avons les premiers indices que les neutrinos ont une masse faible, mais non nulle. Ces données révèlent également que les neutrinos se présentent sous trois variétés distinctes, ou « saveurs » (voir chapitre 8). Pour l'instant, donc, par « neutrino », je désigne le neutrino le plus familier, celui associé à l'électron.

ANTIPARTICULES

Les quarks et les électrons sont les graines de base des atomes et de la matière telle que nous la connaissons. Mais ils ne sont pas tout ; ils existent également sous une forme miroir, connue sous le nom d'antiparticules, les graines de l'antimatière. Chaque variété de particules possède sa version « anti », une entité ayant la même masse, le même spin, la même taille et la même charge électrique qu'elle, mais avec le signe de cette charge inversé. Ainsi, l'électron chargé négativement a pour antiélectron une entité chargée positivement, connue sous le nom de positron, à ne pas confondre avec le proton. Un proton est près de 2 000 fois plus massif qu'un positron et possède sa propre antiversión, l'antiproton, qui a une charge négative.

Les forces qui permettent à un électron et à un proton de se combiner pour former un atome d'hydrogène permettent également à un positron et à un antiproton de former

un atome d’antihydrogène. Au CERN, il est possible de créer et de stocker des atomes d’antihydrogène. Cela permet de comparer leurs propriétés à celles de l’hydrogène. La découverte d’une différence entre ces deux formes de substance ébranlerait les fondements de la physique des particules. En 2023, aucune différence n’a été trouvée.

Nous pouvons résumer les charges des particules et antiparticules de base que nous avons rencontrées jusqu’à présent dans le tableau de la figure 10.

Particule	Charge	Antiparticule	Charge
électron e^-	- 1	positron e^+	+ 1
neutrino ν	0	antineutrino $\bar{\nu}$	0
quark <i>up</i> u	+ 2/3	<i>antiup</i> $\bar{u}$	- 2/3
quark <i>down</i> d	- 1/3	<i>antidown</i> $\bar{d}$	+ 1/3

Fig. 10 Particules fondamentales de la matière et leurs antiparticules.

De même qu’un proton est constitué de uud , l’antiproton est constitué des antiquarks correspondants ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$). Il est d’usage de désigner une antiparticule par le symbole de la particule correspondante, avec un trait au-dessus. Il en est ainsi sauf si la charge est spécifiée, auquel cas l’antiparticule est de charge opposée (par exemple le positron, qui est uniformément désigné par e^+ pour des raisons historiques). De même pour le neutron ddu , l’antineutron est constitué de $\bar{d}\bar{d}u$. Ainsi, bien qu’un neutron et un antineutron aient la même charge électrique, leur structure interne les distingue. Un neutrino et un antineutrino ont également la même charge, mais leur propriété distinctive est plus subtile. Lorsque les neutrinos interagissent avec une particule de matière, un neutron par exemple, ils se transforment en électrons et le neutron est converti en proton, préservant ainsi globalement la charge électrique :

$$\nu + n \rightarrow e^- + p$$

Pris dans ce sens, nous voyons que le neutrino a une affinité pour l'électron. Un antineutrino a une affinité analogue pour le positron. La conservation de la charge électrique empêche donc un antineutrino d'interagir avec un neutron pour réaliser un analogue de ce qui précède, mais s'il frappe un proton, il peut se révéler :

$$\bar{\nu} + p \rightarrow e^+ + n$$

Nous avons vu comment trois quarks s'unissent pour former des particules telles que le proton et le neutron (ces composés de trois quarks sont généralement appelés **baryons**). Les groupes de trois antiquarks sont alors connus collectivement sous le nom d'antibaryons. Il est possible de regrouper les quarks et les antiquarks ; un seul de chaque suffit. Ainsi, si nous utilisons q pour désigner u ou d , et $\bar{q}$ pour désigner les antiquarks, il est possible de créer quatre combinaisons d'amas $q\bar{q}$. De même qu'un amas de trois quarks est appelé baryon, cette combinaison de quark et d'antiquark est appelée **méson**. Comme pour le proton et le neutron, il existe également des états « résonnants » de plus haute énergie pour ces mésons.

L'une des propriétés les plus connues de l'antimatière est que lorsqu'elle rencontre la matière, les deux s'annihilent mutuellement dans un flash de rayonnement, comme les photons de lumière. Il n'est donc pas surprenant que les mésons ne vivent pas très longtemps. Un quark et un antiquark, limités au femto-univers de 10^{-15} m, s'annihilent mutuellement en un milliardième de seconde, voire moins. Malgré cela, ces mésons éphémères jouent un rôle dans la construction de notre Univers. La configuration la plus familière, et la plus légère, est celle des **pions**, tels que les $\pi^+(u\bar{d})$ et $\pi^-(d\bar{u})$, qui ont été prédits par le théoricien japonais Hideki Yukawa en 1935 comme étant des entités éphémères à l'intérieur des noyaux atomiques qui fournissaient la force

d'attraction forte maintenant les noyaux ensemble. Leur découverte en 1947 a brillamment confirmé cette théorie. Aujourd'hui, nous connaissons leur structure plus profonde et nous comprenons mieux les forces à l'œuvre sur les quarks et les antiquarks, qui constituent les mésons et les baryons et, finalement, les noyaux atomiques (voir chapitre 7).

Deux combinaisons neutres peuvent être formées : $u\bar{u}$ et $d\bar{d}$. Elles forment le pion électriquement neutre π^0 , et génèrent un autre méson, appelé **êta** électriquement neutre η . La raison pour laquelle un seul quark peut fixer un seul antiquark de cette manière, alors que trois quarks ou trois antiquarks sont réunis pour former des baryons ou des antibaryons, sera décrite au chapitre 7.

5

Les accélérateurs : cosmiques et anthropiques

On a recours depuis plus d'un siècle à des faisceaux de particules pour révéler la structure interne des atomes. La composition de ces faisceaux est passée des particules alpha et bêta naturelles, issues de la radioactivité naturelle, aux faisceaux intenses d'électrons, de protons et d'autres particules dans les accélérateurs modernes, en passant par les rayons cosmiques. En percutant une cible avec les faisceaux primaires, une partie de l'énergie peut être convertie en nouvelles particules, qui peuvent elles-mêmes être accumulées et transformées en faisceaux secondaires. Des faisceaux de pions et de neutrinos, ainsi que d'autres particules appelées kaons et muons, ont ainsi été produits, de même que des antiparticules telles que les positrons et les antiprotons. Il existe même des faisceaux d'ions lourds – des atomes dépouillés de leurs électrons – qui permettent d'étudier les violentes collisions entre noyaux lourds.

Les différentes particules sondent la matière de façons complémentaires. C'est en combinant les informations issues de ces différentes approches que nous avons pu nous faire une idée de la richesse de la matière. Pendant la majeure partie du XIX^e siècle, les faisceaux de particules étaient dirigés

vers des cibles statiques, mais depuis les années 1970, des faisceaux de plus en plus contrarotatifs ont été amenés à entrer en collision frontale. La stratégie consiste à créer des faisceaux contrarotatifs de particules et d'antiparticules, tels que des électrons et des positrons, ou des protons et des antiprotons, et à les faire entrer en collision. Des faisceaux d'électrons ou de positrons sont entrés en collision avec des faisceaux de protons à l'HERA¹² de Hambourg, ce qui a permis d'obtenir des images fines de la structure interne des protons. Les exemples extrêmes de collisions de faisceaux se trouvent au Grand collisionneur de hadrons (le LHC) du CERN, où des protons ou des ions lourds entrent en collision à des énergies supérieures à 1 TeV, soit 1 000 GeV. Ces techniques permettent d'étudier des questions qui seraient autrement impossibles, comme nous le verrons plus loin.

Les rayons cosmiques suscitent également un regain d'intérêt : la nature fournit des particules à des énergies bien supérieures à tout ce que nous pouvons envisager sur Terre. Le problème est que ces rayons arrivent au hasard et sont beaucoup moins intenses que les faisceaux produits par les accélérateurs. C'est le désir de reproduire les rayons cosmiques dans des conditions contrôlées qui, dans les années 1950, a inspiré le développement de la physique des hautes énergies dans les accélérateurs. Aujourd'hui, nous reconnaissons que le Big Bang a pu produire des particules exotiques, bien plus massives que celles que nous ne pourrions jamais produire sur Terre, mais qui pourraient arriver occasionnellement dans les rayons cosmiques. Nous avons

12. NDT. HERA, en anglais **Hadron-Electron Ring Accelerator**, est un accélérateur de particules qui a fonctionné de 1992 au 30 juin 2007. Cet équipement bénéficiait d'un financement international, avec plus de 45 établissements de recherche et 320 sociétés qui ont participé et/ou contribué à sa construction.

découvert des particules étranges (voir chapitre 8) dans les rayons cosmiques, et les avons ensuite fabriquées sur commande dans le cadre d'expériences avec des accélérateurs ; il y a lieu d'espérer que nous connaîtrons la même fortune.

Les étoiles et les supernovæ émettent des neutrinos ; des laboratoires spéciaux ont été construits sous terre, conçus pour empêcher l'arrivée de toutes les particules à l'exception des plus pénétrantes, comme les neutrinos. L'astronomie des neutrinos est un nouveau domaine scientifique qui commence à fleurir. L'utilisation de la banquise de l'Antarctique comme détecteur naturel de neutrinos cosmiques en est un exemple.

Il s'agit d'exemples de ce que l'on appelle la physique sans accélérateur, où des processus naturels ont produit les particules et où nous en détectons les effets. Ici, sur Terre, nous pouvons produire des faisceaux intenses de particules de haute énergie dans des laboratoires équipés d'accélérateurs de particules. Dans ce chapitre, je me concentrerai sur le développement des accélérateurs et sur leur fabrication.

Les particules chargées électriquement sont accélérées par des forces électriques. Si l'on applique une force électrique suffisante à un électron, par exemple, celui-ci ira de plus en plus vite en ligne droite. Dans les années 1970, l'accélérateur linéaire de 3 km de long de Stanford, en Californie, pouvait accélérer les électrons jusqu'à des énergies de 50 GeV. C'était le plus grand accélérateur linéaire du monde, mais il n'est plus utilisé pour la physique des particules.

Sous l'influence d'un champ magnétique, la trajectoire d'une particule chargée s'incurve. En utilisant des champs électriques pour les accélérer et des champs magnétiques pour infléchir leur trajectoire, nous pouvons faire tourner les particules en rond, encore et encore. C'est l'idée de base des gigantesques anneaux tels que le Grand collisionneur de hadrons (27 km de long) du CERN à Genève.

DU CYCLOTRON VERS LE SYNCHROTRON

L'exploration de l'atome a commencé avec des faisceaux de particules alpha et bêta provenant de corps radioactifs. Mais les particules individuelles avaient une faible énergie et une capacité limitée à pénétrer dans l'environnement nucléaire. Ce sont les faisceaux de particules à haute énergie qui ont permis de changer la donne.

L'idée initiale était d'accélérer les particules à haute énergie par une série de petites poussées à partir de tensions d'accélération relativement faibles. Les particules traversent une série de cylindres métalliques distincts dans un tube sous vide. À l'intérieur des cylindres, il n'y a pas de champ électrique et les particules se déplacent simplement. Mais à travers les espaces entre les cylindres, des champs électriques sont créés au moyen de tensions alternatives, qui passent d'une valeur positive à une valeur négative. La fréquence de la tension alternative est adaptée à la longueur des cylindres, de sorte que les particules encaissent toujours un coup de fouet, et non un coup de frein, lorsqu'elles émergent dans les interstices. Les particules sont ainsi accélérées chaque fois qu'elles passent d'un cylindre à l'autre. C'est la base du fonctionnement des accélérateurs linéaires modernes. En général, ces « linacs » sont des machines courtes et à faible énergie, mais ils peuvent être à haute énergie et longs, comme l'accélérateur linéaire de Stanford en Californie. Ils sont le plus souvent utilisés dans les phases préliminaires de l'accélération dans les grands anneaux actuels, comme au Grand collisionneur de hadrons (voir à la page 81).

L'idée de créer un accélérateur en forme d'anneau a été lancée par Ernest Lawrence, qui a mis en œuvre un champ magnétique pour faire dévier les faisceaux de particules dans une orbite circulaire. Deux cavités métalliques semi-circulaires creuses, ou « D », ont été placées l'une en face de l'autre

pour former un cercle, avec un petit intervalle entre les deux faces plates des Dés. L'ensemble de la construction ne mesurerait qu'environ 20 cm de diamètre et Lawrence l'a placé entre les pôles nord et sud circulaires d'un électro-aimant, afin de faire pivoter les particules autour de la courbe, tandis qu'un champ électrique dans l'intervalle leur impulsait de la vitesse. Après avoir été accélérées par le champ électrique dans la fente, les particules décrivent une trajectoire circulaire jusqu'à ce qu'elles rencontrent la fente une demi-orbite plus tard. Grâce à ce dispositif, ils peuvent traverser plusieurs fois la même fente en accélérant, plutôt qu'emprunter une succession de fentes. Elles tournent en spirale vers l'extérieur à mesure que leur vitesse augmente, mais les intervalles de temps entre les passages successifs restent constants.

Pour accélérer les particules de manière continue, le champ électrique dans la fente doit passer d'un côté à l'autre à la même fréquence que celle à laquelle les particules parcourent le circuit. Les particules provenant d'une source située au centre de l'appareil tourbillonnant s'échappent alors en spirale vers le bord et en ressortent avec une énergie considérablement accrue.

Cet appareil, connu sous le nom de « cyclotron », fonctionnait selon le principe que les particules mettaient toujours le même temps pour boucler un circuit. Dans la pratique, ce principe n'est qu'approximativement vrai. À mesure que l'énergie des particules augmente, les effets de la relativité restreinte jouent un rôle de plus en plus important. En particulier, on observe une résistance croissante à l'accélération, selon laquelle il faut plus de force pour obtenir la même accélération lorsque la vitesse se rapproche de celle de la lumière. Les particules accélérées mettent plus de temps à parcourir un circuit et arrivent finalement trop tard à la fente pour capter la tension alternative pendant la phase d'accélération de son cycle.

La solution a consisté à ajuster la fréquence de la tension appliquée de manière à ce qu'elle reste en phase avec les particules qui mettent plus de temps à circuler. Mais il y a un hic : une machine fonctionnant à fréquence variable ne peut plus accélérer un flux continu de particules, comme le faisait le cyclotron. Changer la fréquence pour rester en phase avec les particules à haute énergie signifierait que toutes les particules encore à basse énergie seraient déphasées. Au lieu de cela, le « synchrocyclotron » prélève les particules de la source par paquets et les accélère jusqu'au bord de l'aimant.

Le synchrocyclotron a pu accélérer des protons à des énergies suffisantes pour que les collisions avec les noyaux produisent des pions, les particules les plus légères qui, nous le savons maintenant, sont constituées d'un seul quark et d'un antiquark. Cependant, la machine mesurait près de 5 m de diamètre et il n'était pas possible d'atteindre des énergies plus élevées, telles que celles nécessaires pour produire les particules étranges les plus massives.

La solution a consisté à augmenter continuellement l'intensité du champ magnétique au fur et à mesure que les particules encerclées gagnent en énergie, ce qui leur permet de rester sur la même orbite au lieu de s'éloigner en spirale. En outre, l'énorme aimant unique du cyclotron peut être remplacé par un anneau en forme de beignet composé d'aimants plus petits, qui est la forme familière des anneaux des accélérateurs modernes. Les particules se déplacent dans un tube circulaire sous vide maintenu par la seule force magnétique des aimants ; elles sont accélérées à chaque tour par une tension alternative de fréquence variable, appliquée en un ou plusieurs endroits de l'anneau ; elles sont maintenues sur leur trajectoire circulaire dans le tube par l'augmentation constante de l'intensité du champ magnétique. Une telle machine est appelée synchrotron. Les premiers grands synchrotrons ont

été construits à Brookhaven, aux États-Unis, et au CERN, à Genève, avec des énergies atteignant 30 GeV en 1960.

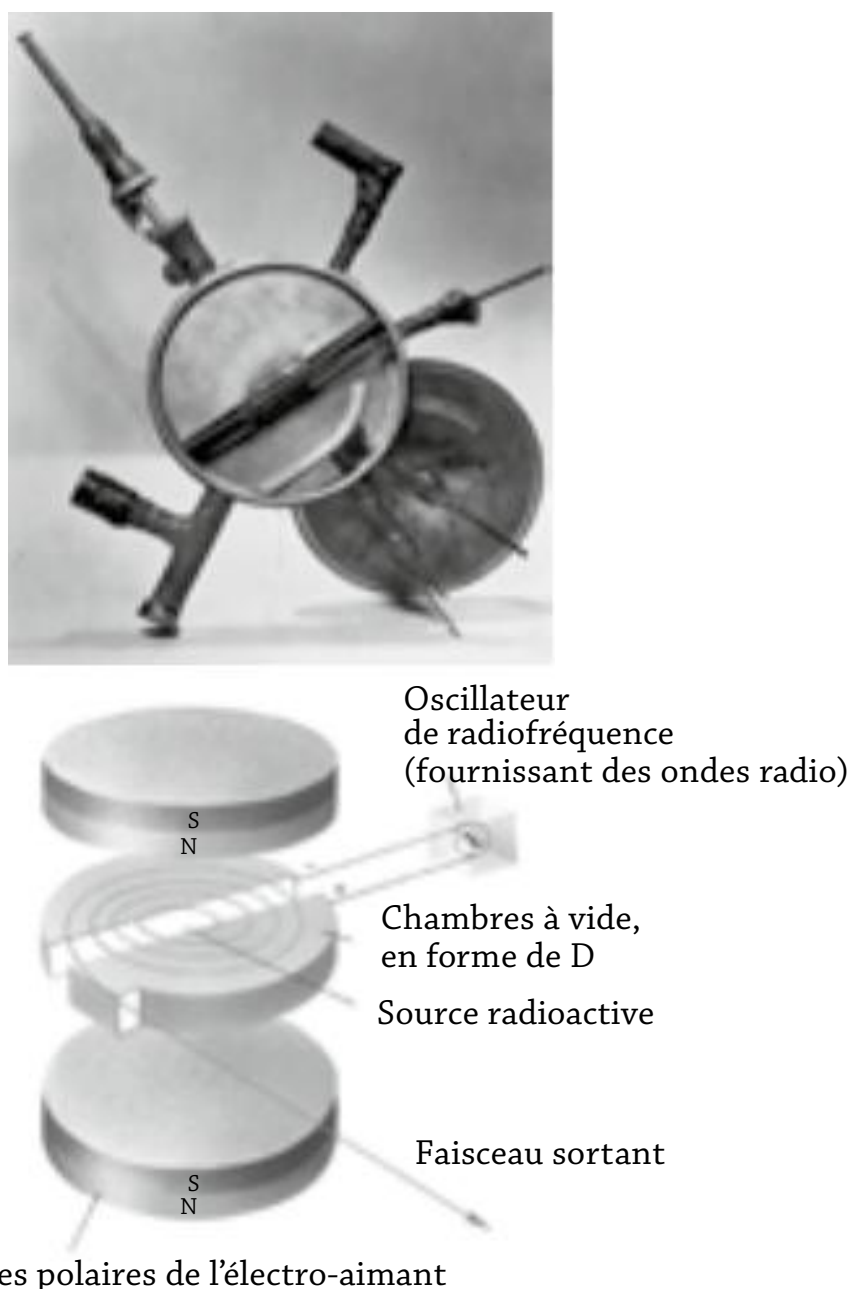


Fig. 11 ► Premier cyclotron réussi, construit en 1930. Le cyclotron original de Lawrence ne mesurait que 13 cm de diamètre. Le champ magnétique qui oriente les particules sur une trajectoire circulaire est fourni par deux électro-aimants. Ceux-ci génèrent un champ vertical nord-sud sur la trajectoire des particules, qui sont contenues dans un plan horizontal. Elles sont accélérées par un champ électrique qui traverse un espace entre deux chambres à vide métalliques creuses en forme de D. Une source radioactive située au centre fournit un champ électrique à l'intérieur de la chambre à vide. Une source radioactive située au centre fournit les particules. Les particules s'enroulent dans le champ magnétique du cyclotron, mais au fur et à mesure que leur énergie augmente, elles s'enroulent moins et partent en spirale vers l'extérieur jusqu'à ce qu'elles sortent de la machine.

Dans les années 1960, l'idée des quarks est apparue et, avec elle, le défi d'atteindre des énergies supérieures à 100 GeV dans l'espoir, hélas vain, d'extraire par la force les quarks des protons. Les progrès technologiques ont permis d'obtenir des aimants plus puissants et, en les plaçant dans un anneau de plus d'un kilomètre de diamètre, au milieu des années 1970, le Fermilab, près de Chicago (États-Unis), et le CERN avaient atteint des énergies de protons de quelque 500 GeV. En 1982, le Fermilab a atteint 1 000 GeV, ou 1 TeV, et est devenu le « Tevatron ».

Aujourd'hui, les aimants supraconducteurs permettent d'obtenir des champs magnétiques encore plus puissants. Au Fermilab, à côté du Tevatron, se trouve un anneau plus petit appelé injecteur principal. L'une des tâches de l'injecteur principal est de diriger des protons à 120 GeV sur des cibles afin de créer des faisceaux secondaires de particules pour les expériences. Les protons extraits frappent des cibles spéciales de carbone ou de béryllium pour produire des pluies de pions et de kaons. Les pions peuvent se désintégrer pour produire un faisceau de neutrinos, tandis que les kaons peuvent être séparés pour former un faisceau de kaons pour les expériences. Différentes particules ayant des propriétés différentes permettent de sonder différentes caractéristiques de la cible et obtenir une image plus riche de sa composition.

L'injecteur principal dirige également des protons de 120 GeV sur une cible spéciale en nickel à des énergies suffisantes pour produire d'autres protons et antiprotons à un rythme pouvant atteindre 200 milliards d'antiprotons en une heure. Les antiprotons, versions antimatière des protons, ont une charge électrique négative plutôt que positive, ce qui signifie qu'ils peuvent se déplacer dans l'anneau d'aimants supraconducteurs du Tevatron en même temps et à la même vitesse que les protons, mais dans la direction

opposée. Une fois que les particules sont à 1 000 GeV, soit 1 TeV, les deux faisceaux peuvent entrer en collision frontale et le Tevatron a atteint son objectif final : des collisions de protons et d'antiprotons à des énergies qui recréent les conditions de l'Univers lorsqu'il était âgé de moins d'un trillième¹³ de seconde.



Fig. 12 ▶ Le cosmotron au Laboratoire national de Brookhaven, New York. Il s'agit du premier synchrotron à protons à avoir été mis en service, en 1952, qui accélérât des protons à une énergie de 3 GeV. L'anneau magnétique était divisé en quatre sections (la plus proche est clairement visible ici), chacune constituée de 72 blocs d'acier d'environ 2,5 m × 2,5 m avec une ouverture de 15 cm × 35 cm pour le passage du faisceau. La machine a cessé de fonctionner en 1966.

Le Tevatron était l'accélérateur le plus puissant au monde jusqu'à la mise en service du Grand collisionneur de hadrons (le LHC) au CERN en 2008. Dans le LHC, un anneau d'aimants de 27 km dirige deux faisceaux contrarotatifs de protons, ou de noyaux atomiques, qui se rencontrent à des énergies allant jusqu'à 7 TeV. Il s'agit actuellement du summum de la technologie des collisions de faisceaux.

13. NDT. Un **trillième** est une fraction de nombre naturel, qui vaut 1×10^{-18} (1 sur 1 000 000 000 000 000 000).

LES ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES

Dans les années 1960, l'accélérateur linéaire de Stanford est devenu le plus long linac du monde. Il a accéléré des électrons jusqu'à une énergie de 50 GeV en seulement 3 km, alors que dans les années 1990, au LEP, un accélérateur circulaire, ils ont atteint 100 GeV mais ont nécessité un anneau d'une circonférence de 27 km. Pourquoi cette différence et qu'est-ce qui détermine le choix d'un accélérateur linéaire ou circulaire ?

Les synchrotrons à électrons fonctionnent parfaitement bien, à l'exception d'un problème fondamental : les électrons à haute énergie rayonnent de l'énergie lorsqu'ils se déplacent sur une trajectoire circulaire. Ce rayonnement, appelé rayonnement synchrotron, est d'autant plus important que le rayon de l'orbite est petit et que l'énergie de la particule est élevée. Les protons émettent également un rayonnement synchrotron, mais comme ils sont 2 000 fois plus massifs que les électrons, ils peuvent atteindre des énergies beaucoup plus élevées avant que la quantité d'énergie perdue ne devienne significative. Mais même à quelques GeV, les électrons circulant dans un synchrotron émettent une grande quantité d'énergie, qui doit être compensée par un apport supplémentaire d'énergie par le biais des ondes radio dans les cavités accélératrices. C'est pour ces raisons que, jusqu'à récemment, les accélérateurs d'électrons à haute énergie étaient linéaires. En effet, les électrons n'ont été utilisés dans des machines circulaires qu'en raison des avantages particuliers qui peuvent en découler. En particulier, les collisions frontales permettent une utilisation plus efficace de l'énergie que lorsqu'une cible statique est touchée. Le deuxième avantage majeur est la possibilité de sonder d'une manière qui s'avérerait autrement impossible, comme au LEP – le Grand collisionneur électron-positron au CERN – où les

électrons s'annihilent avec les positrons, et où les faisceaux contrarotatifs étaient le seul moyen efficace d'atteindre la haute intensité requise.



Fig. 13 ▶ Vue de l'intérieur du tunnel circulaire de 27 km du Grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN, Genève. Deux faisceaux de protons circulent en sens inverse à travers les champs de centaines d'aimants spécialement conçus, à des énergies allant jusqu'à 6,5 TeV.

Le LEP était une machine circulaire dans un tunnel de 27 km de long. Cela témoigne des problèmes posés par les électrons légers et les positrons circulant en cercle : une telle distance est nécessaire pour leur permettre d'atteindre 100 GeV sans gaspiller trop d'énergie sous forme de rayonnement. Pour porter les électrons à des énergies de plusieurs centaines de GeV sur des orbites circulaires, il faudrait des distances de plusieurs centaines de kilomètres, ce qui n'est pas réalisable. C'est pourquoi les projets à long terme pour les accélérateurs de très haute énergie d'électrons et de positrons se concentrent sur les collisionneurs linéaires.



Fig. 14 L'accélérateur linéaire de 3 km de long du Stanford Linear Accelerator Center (SLAC). Les électrons partent d'un « canon » de l'accélérateur où ils sont libérés par un filament chauffé à l'extrémité de la machine, en bas à gauche de l'image. Les électrons *surfent* alors sur des ondes radio installées dans une chaîne de 100 000 « cavités » cylindriques en cuivre, d'un diamètre d'environ 12 cm. La machine est alignée à 0,5 mm près sur toute sa longueur et se trouve dans un tunnel à 8 m sous terre. Les bâtiments de surface qui délimitent la ligne du linac contiennent les klystrons qui fournissent les ondes radio.

Pour avoir une chance raisonnable de collision dans un accélérateur linéaire, où les faisceaux ne se rencontrent qu'une seule fois, il faut des faisceaux de haute intensité dont le diamètre est inférieur à un micron (10^{-6} m). En réalité on rate la cible plus souvent qu'on ne la touche. Comme les charges similaires de chaque faisceau se repoussent, la production et le contrôle de faisceaux aussi étroitement focalisés constituent un défi technologique. Si les faisceaux étaient réglés pour avoir chacun une énergie de 62,5 GeV, soit la moitié de la masse (énergie au repos) d'un boson de Higgs, il serait possible de produire un boson de Higgs au repos. Il pourrait s'agir d'une stratégie clé pour une « usine de Higgs » dédiée, produisant par conséquent un grand nombre de bosons de Higgs pour des études de précision.

LES COLLISIONNEURS

Dans un accélérateur linéaire visant une cible statique, les débris de la collision sont propulsés vers l'avant, tout comme une voiture à l'arrêt est projetée vers l'avant lorsqu'une autre voiture la percute à l'arrière. Lorsqu'un faisceau frappe une cible immobile, l'énergie durement gagnée par les particules du faisceau est transférée en grande partie en énergie de mouvement, c'est-à-dire en particules en mouvement dans la cible, et elle est effectivement perdue. Ce problème est résolu si l'on peut amener les particules à entrer en collision frontale, de sorte que leur énergie puisse être dépensée totalement dans l'interaction entre elles. Lors d'une telle collision, les débris s'envolent dans toutes les directions et l'énergie est redistribuée avec eux – rien n'est « gaspillé » dans la mise en mouvement de masses stationnaires.

Ces arguments étaient déjà clairs pour les constructeurs d'accélérateurs dans les années 1940, mais il a fallu 20 ans pour que les collisionneurs de particules prennent forme, et 15 ans de plus pour qu'ils deviennent la forme dominante d'accélérateur de particules.

Les protons sont des groupes de quarks et les antiprotons sont également constitués d'antiquarks. Avec une masse de près de 2000 fois celle d'un électron, les protons et les antiprotons souffrent moins du rayonnement synchrotron et sont plus puissants. Ils constituent donc un choix de premier ordre lorsqu'il s'agit d'atteindre des énergies supérieures encore inexplorées. Ce fut le cas en 1983, lorsque des collisions frontales entre protons et antiprotons au CERN ont conduit à la découverte des porteurs $W^\pm$ et Z^0 des forces faibles (voir chapitre 7).

L'énergie du proton est partagée entre ses quarks, et il n'est pas certain que l'énergie d'un seul quark qui rencontre

un antiquark corresponde à celle requise pour former un Z^0 ou un $W^\pm$. Néanmoins, ils sont apparus comme un cas particulier sur un million dans la collection d'images des collisions. Le défi consistait donc à produire régulièrement un Z^0 sans ce vaste arrière-plan indésirable et déroutant. Pour ce faire, on a réglé un faisceau d'électrons et de positrons sur l'énergie requise. C'est ainsi qu'est né le Grand collisionneur électron-positron. Les défis techniques posés par la réalisation d'expériences avec de telles machines peuvent être illustrés par l'exemple du LEP.

Lorsque le LEP a commencé à fonctionner, dans les années 1990, des paquets d'électrons et de positrons semblables à des aiguilles se croisaient au cœur des détecteurs toutes les 22 microsecondes (22 milliardièmes de seconde). Bien qu'il y ait quelques millions de millions de particules dans chaque paquet, les particules étaient finement dispersées, de sorte que les interactions entre elles étaient rares. Une collision intéressante, ou « événement », ne se produit qu'une fois sur 40 environ où les paquets se croisent. Le défi consistait à identifier et à collecter les événements intéressants, et à ne pas les manquer en enregistrant quelque chose de plus banal. Un « déclencheur » électronique réagissait aux premiers signaux d'une collision pour « décider » dans les 10 microsecondes si quelque chose d'intéressant s'était produit. Si c'était le cas, le processus de lecture et de combinaison des informations provenant de toutes les pièces du détecteur commençait, et un affichage sur un écran d'ordinateur recréait le schéma des trajectoires des particules et montrait où l'énergie avait été déposée dans le détecteur. Le LEP a été fermé en 2000 pour faire place au Grand collisionneur de hadrons (LHC).

De 1992 à 2007, il y avait à Hambourg un collisionneur asymétrique unique en son genre, dans lequel un faisceau de protons entrait en collision avec un faisceau d'électrons

ou de positrons. Les collisions résultantes ont permis de sonder la sous-structure du proton et celle de ses quarks à des distances allant jusqu'à 10^{-19} m. Les informations obtenues sur la structure des quarks et des gluons à l'intérieur d'un proton se sont avérées essentielles pour planifier des expériences avec des protons au LHC.

LE LHC¹⁴ – LE GRAND COLLISIONNEUR DE HADRONS

Le LHC au CERN, mis en service en 2008, est l'aboutissement de décennies de développement des accélérateurs. Pour faire entrer en collision des faisceaux de protons à des énergies de 7 TeV, il faut toute une série d'accélérateurs. L'histoire commence avec une bouteille d'hydrogène gazeux, de la taille d'un extincteur. Cette bouteille contient suffisamment de protons pour faire fonctionner le LHC pendant des décennies, mais pour des raisons de sécurité, elle est réapprovisionnée deux fois par an.

Tout d'abord, des atomes d'hydrogène sont introduits dans un accélérateur linéaire. Des champs électriques intenses enlèvent du proton de l'atome d'hydrogène l'électron qui l'entoure. Les protons sont ensuite accélérés à une vitesse d'environ un tiers de celle de la lumière. Lorsqu'un nombre soigneusement contrôlé a été collecté, le paquet est automatiquement injecté dans un accélérateur d'appoint et sa vitesse est portée à environ 90 % de celle de la lumière. L'accélération directe n'étant plus possible, des aimants poussent les faisceaux autour d'un cercle d'environ 160 m de circonférence, tandis que des champs électriques les poussent par impulsions régulières, un peu comme on pousse un enfant sur une balançoire.

14. En anglais, Large Hadron Collider.

Ils entrent ensuite dans un synchrotron à protons. D'une circonférence de 630 m, ce synchrotron était l'accélérateur de pointe du CERN dans les années 1960. Les protons sortent de ce synchrotron avec une énergie d'environ 25 GeV et entrent dans un synchrotron plus grand qui porte leur énergie à environ 450 GeV. Cette machine, qui a permis de découvrir les bosons W et Z en 1983, est aujourd'hui la rampe de lancement du LHC.

Le LHC comporte deux tubes à vide, un pour chaque faisceau de protons. Un faisceau circule dans le sens des aiguilles d'une montre, l'autre dans le sens inverse, autour de l'anneau de 27 km, 11 000 fois par seconde. En quatre points de l'anneau, les faisceaux se croisent.

Chaque faisceau est constitué de paquets de protons espacés d'environ 7 m et regroupés en grappes minces comme un crayon d'environ 60 cm de long. En d'autres termes, à tout moment, la majeure partie du tube est constituée d'espace vide. L'électronique est réglée de manière à ce que ces paquets tournant en sens inverse atteignent les points de croisement avec une précision supérieure à un dixième de milliardième de seconde.

Leur énergie est portée à 6 TeV. Les collisions produisent parfois des bosons de Higgs. Chaque point de collision est entouré de cylindres d'électronique sophistiquée pour détecter les résultats des collisions et extraire des preuves de la présence de bosons de Higgs et d'autres particules transitoires.

LES « USINES À PARTICULES »

L'énigme de la différence entre la matière et l'antimatière a été mise en lumière ces dernières années. Cela a conduit à un intérêt intense pour les propriétés des particules et

antiparticules étranges – les kaons – où une asymétrie subtile a été découverte il y a près de 50 ans, et leurs analogues inférieurs (voir p. 127), où une grande asymétrie a été prédite. C'est ainsi qu'est né le concept d'« usines à particules », capables de produire autant de kaons ou de mésons B que possible.

L'idée est de faire entrer en collision des électrons et des positrons à des énergies spécifiques, « réglées » pour produire des kaons ou des mésons B respectivement, de préférence à d'autres types de particules.

Une « usine B » produit des collisions électron-positron à une énergie totale d'environ 10 GeV, optimisée pour produire des mésons B et leurs antiparticules $\bar{B}$ (prononcé B-barre) ensemble. Le défi est si important que deux machines ont été construites à la fin des années 1990 : le PEP2 à Stanford en Californie, dont la construction a pris fin en 2008, et le KEKB au laboratoire KEK au Japon, qui a été remplacé par SuperKEKB.

Les usines B diffèrent des collisionneurs électron-positron précédents d'une manière fascinante. Dans un collisionneur électron-positron standard, les faisceaux se déplacent dans des directions opposées mais à la même vitesse, de sorte que lorsque les particules se rencontrent, leur mouvement s'annule exactement. L'« explosion » qui résulte de l'annihilation mutuelle des électrons et des positrons est au repos, et les particules de matière et d'antimatière nouvellement créées émergent assez uniformément dans toutes les directions. Dans les usines B, les faisceaux en collision se déplacent à des vitesses différentes – dans le SuperKEKB, les électrons ont une énergie de 7 GeV tandis que les positrons sont à 4 GeV – de sorte que l'explosion qui en résulte est elle-même en mouvement.

En raison de cette collision asymétrique, la matière et l'antimatière qui émergent ont tendance à être éjectées dans la direction du faisceau initial le plus rapide, et à des vitesses

plus élevées que dans le cas d'une annihilation au repos. Il est ainsi plus facile d'observer non seulement les particules créées, mais aussi leur descendance produite lorsqu'elles meurent, grâce à un effet de la relativité restreinte (dilatation du temps) selon lequel les particules survivent plus longtemps et voyagent plus loin (environ 1 mm) lorsqu'elles se déplacent à grande vitesse. Ces astuces sont essentielles, car un méson B au repos ne vit qu'une picoseconde, un millionième de millionième de seconde (10^{-12} s), ce qui est proche (voire au-delà) de la limite du mesurable.

Des sources intenses de neutrinos peuvent permettre d'étudier ces particules énigmatiques. Leurs masses sont trop faibles pour être mesurées, mais des mesures indirectes de leurs différences de masse peuvent être obtenues. Il est même possible que les neutrinos et les antineutrinos se transforment l'un en l'autre, une forme de transformation de la matière en antimatière qui pourrait avoir des implications importantes pour notre compréhension de cette profonde asymétrie. L'étude des neutrinos est un domaine très riche qui est décrit dans les chapitres 9 et 10.

Enfin, la découverte en 2012 du boson de Higgs, d'une masse de 125 GeV, parmi les débris des collisions entre protons au Grand collisionneur de hadrons du CERN, a suscité l'intérêt pour la production d'un grand nombre de ces bosons dans des conditions plus contrôlées. Les Chinois ont proposé de construire un tunnel de 100 km de long abritant un collisionneur électron-positron capable de produire des millions de bosons de Higgs. Les projets d'une « usine de Higgs » sont encore sujets à discussion et il est peu probable qu'ils voient le jour avant plusieurs décennies.

6

Les détecteurs : caméras et machines à remonter le temps

LES PREMIÈRES MÉTHODES EMPLOYÉES

Les méthodes de détection des particules subatomiques sont plus familières qu'on ne le pense. Le crépitement d'un compteur Geiger et la lumière émise lorsque des particules chargées électriquement, telles que les électrons, frappent des matériaux spécialement conçus pour former l'image d'un écran de télévision classique n'en sont que deux exemples.

Rutherford a découvert le noyau atomique par son effet sur des faisceaux de particules alpha ; celles-ci s'étaient dispersées avec de grands angles. Il a utilisé des matériaux scintillants pour les révéler lorsqu'elles se répandent à partir du noyau atomique. Rutherford et ses collègues devaient utiliser leurs propres yeux pour voir et compter les éclairs ; dans les années 1950, des composants électroniques ont automatisé le processus de comptage des éclairs émis par les scintillateurs modernes.

Lorsqu'une particule chargée traverse un gaz, elle laisse derrière elle une traînée d'atomes ionisés. Toute une gamme de détecteurs de particules, de la chambre à nuages à la chambre à étincelles, fonctionnait avec la détection de cette traînée d'ionisation d'une manière ou d'une autre.

C'est ainsi qu'il y a près d'un siècle, Rutherford a pu détecter les particules alpha émises par le radium ou le polonium, l'une après l'autre.

La caractéristique essentielle du détecteur est qu'il pouvait amplifier considérablement l'infime quantité d'ionisation provoquée par le passage d'une seule particule alpha. Il se composait d'un tube en laiton, vidé à une très basse pression, au centre duquel passait un fil fin. Le fil et le tube étaient reliés par une tension de 1000 volts, ce qui créait un champ électrique. Dans cette configuration, lorsqu'une particule chargée traverse le gaz raréfié, des ions sont créés. Ils sont attirés vers le fil et, en accélérant, ils ionisent davantage de gaz, amplifiant ainsi l'effet initial. Un ion peut en engendrer des milliers, qui aboutissent tous au fil central, produisant une impulsion de charge électrique suffisamment importante pour être détectée par un électromètre sensible connecté au fil.

Dans le « compteur Geiger », le champ électrique au niveau du fil est si élevé qu'un seul électron, n'importe où dans le compteur, peut déclencher une avalanche d'ionisation, de sorte que la plus petite quantité d'ionisation produira un signal.

Bien que cela révèle la présence d'un rayonnement, c'est très éloigné de ce qui est nécessaire pour détecter les particules dans les expériences modernes à haute énergie. Voyons comment la détection a évolué.

Le premier détecteur capable de révéler des traînées de particules chargées a été la chambre à nuages, une chambre en

verre munie d'un piston et remplie de vapeur d'eau. Lorsque l'on retire rapidement le piston, l'expansion soudaine refroidit le gaz et un brouillard se forme dans l'atmosphère froide et humide. Lorsque les particules alpha et bêta de la radioactivité passent, elles ionisent les atomes de la vapeur, et des gouttes de nuage se forment instantanément autour de leur trace. Lorsqu'elles sont éclairées, les traces ressortent comme des grains de poussière dans un rayon de soleil.

Historiquement, principalement dans la première moitié du XX^e siècle, la chambre à nuages a été utilisée pour détecter les particules dans les rayons cosmiques, et son efficacité a été améliorée en la combinant avec le compteur Geiger. Placez un compteur Geiger au-dessus et un autre en dessous de la chambre à nuages. Si les deux s'allument simultanément, il est très probable qu'un rayon cosmique les a traversés et, par conséquent, a traversé la chambre. Reliez les compteurs Geiger à un mécanisme de relais de sorte que l'impulsion électrique de leurs décharges concomitantes déclenche l'expansion de la chambre à nuages, et qu'un flash lumineux permette de capturer les traces sur pellicule.

Le premier exemple d'antiparticule, le positron – et d'autres particules étranges – a été découvert dans les rayons cosmiques à l'aide de la chambre à nuages. Cependant, ces techniques ont été remplacées par l'utilisation d'émulsions.

LES ÉMULSIONS

Les plaques photographiques ont joué un rôle dans les tout premiers travaux sur la radioactivité ; en effet, c'est grâce à l'obscurcissement des plaques que les rayons X et la radioactivité ont été découverts.

À la fin des années 1940, des émulsions photographiques de haute qualité sont devenues disponibles. Transportées à

haute altitude par des ballons, elles ont produit les premières belles images des interactions des rayons cosmiques.

Ces émulsions étaient particulièrement sensibles aux particules de haute énergie ; tout comme le fait une lumière intense, le passage de particules chargées assombrit également les plaques photographiques. Nous pouvons détecter la trajectoire d'une particule unique par la ligne de taches sombres qu'elle forme sur l'émulsion développée. La particule prend littéralement sa propre photo. Un ensemble de plaques recouvertes d'émulsion suffit pour collecter les traces de particules ; une chambre à nuages, en revanche, est un appareil complexe, nécessitant des pièces mobiles pour que la chambre puisse être continuellement mise en sous-pression, puis recomprimée. Les émulsions sont donc devenues un moyen utile de détecter et d'enregistrer les traces de particules chargées.

LA CHAMBRE À BULLES

L'avènement des accélérateurs a produit des particules de haute énergie, ce qui a créé de nouveaux défis en matière de détection. Les particules énergétiques traversent une chambre à nuages sans interagir avec les atomes du fin nuage de gaz de la chambre. Par exemple, pour enregistrer toute la vie d'une particule étrange, de sa production à sa désintégration, à des énergies de quelques GeV, il aurait fallu une chambre à nuage de 100 m de long ! En outre, les chambres à nuages s'avèrent lentes : le cycle de recompression après une expansion peut prendre jusqu'à une minute ; dans les années 1950, les accélérateurs de particules délivraient des impulsions de protons toutes les deux secondes.

Ce qu'il fallait, c'était un détecteur capable de capter les longues trajectoires des particules de haute énergie et

de fonctionner rapidement. Les gaz étant beaucoup trop ténus pour ce travail, les liquides convenaient mieux, car leur densité beaucoup plus élevée signifie qu'ils contiennent beaucoup plus de noyaux avec lesquels les particules à haute énergie peuvent interagir. Cela nous amène à la chambre à bulles. L'idée de base découle de ce qui se passe lorsque l'on maintient un liquide sous pression, très près de son point d'ébullition. Si vous diminuez la pression dans ces circonstances, le liquide commence à bouillir, mais si vous diminuez la pression très brusquement, le liquide restera liquide même s'il est alors au-dessus de son point d'ébullition. Cet état est connu sous le nom de « liquide surchauffé » et, puisqu'il est instable, il ne peut être maintenu que tant qu'aucune perturbation ne se produit dans le liquide.

Relâchez la pression et rétablissez-la immédiatement. Les particules qui pénètrent dans le liquide pendant les moments critiques de basse pression créent une perturbation et déclenchent le processus d'ébullition en ionisant les atomes du liquide sur leur passage. Pendant une fraction de seconde, une traînée de bulles se forme au passage de la particule et peut être photographiée. Le rétablissement immédiat de la pression signifie que le liquide se trouve à nouveau juste en dessous du point d'ébullition, et l'ensemble du processus peut être répété assez rapidement.

Le fonctionnement d'une chambre à bulles est toujours intimement lié au cycle de fonctionnement de l'accélérateur qui l'alimente. Les particules entrent dans la chambre lorsque le piston est complètement retiré, que la pression est à son minimum et que le liquide est surchauffé. Puis, environ une milliseconde plus tard, un arc lumineux éclaire les traînées de bulles formées par les particules chargées. Le délai entre la pression minimale et le flash permet aux bulles de les grossir suffisamment pour apparaître sur les photographies.

Pendant ce temps, le piston est revenu vers la chambre, augmentant à nouveau la pression, et la pellicule des appareils photo avance automatiquement pour l'image suivante. Il faut ensuite environ une seconde pour que la chambre « récupère » et soit prête pour l'expansion suivante. La chambre à bulles montre ainsi où passent les particules, ce qui permet d'étudier leur comportement à loisir.

Dans un champ magnétique, la trajectoire d'une particule chargée s'incurve, la direction prise révélant si la particule était chargée positivement ou négativement, et le rayon de la courbe révélant son énergie cinétique. On peut donc en déduire la charge et la quantité de mouvement ; si l'on connaît la quantité de mouvement et la vitesse d'une particule, on peut calculer sa masse et donc son identité.

Une méthode permettant de déterminer avec précision la vitesse utilise deux « compteurs » à scintillation, qui produisent un éclair de lumière chaque fois qu'une particule chargée passe à travers eux. Chaque minuscule éclat de lumière est converti en une impulsion électrique, qui est ensuite amplifiée pour produire un signal. De cette manière, deux ou plusieurs compteurs à scintillation peuvent révéler la trajectoire d'une particule en produisant des éclairs dans chaque compteur et, à partir du temps nécessaire pour passer d'un compteur à l'autre, il est possible de déterminer la vitesse de la particule.

Toutefois, ces techniques n'ont pas permis de résoudre l'énigme de l'identification dans le cas d'une photo prise dans une chambre à bulles. Souvent, la seule solution consistait à attribuer des identités aux différentes pistes, puis à additionner l'énergie cinétique de toutes les particules émergeant d'une interaction. Si elles ne correspondent pas aux valeurs connues avant l'interaction, les identités supposées doivent être erronées et d'autres doivent, par conséquent, être

testées, jusqu'à ce qu'une image cohérente soit trouvée. Cela prenait beaucoup de temps, mais c'était l'état de l'art vers 1960. L'identification des particules par de tels calculs d'essais et de telles erreurs est typique du travail répétitif pour lequel les ordinateurs excellent, et aujourd'hui les chambres à bulles ont été remplacées par des détecteurs électroniques qui se prêtent mieux à l'analyse directe par l'ordinateur.



Fig. 15 ● Particules subatomiques observées dans la chambre à bulles du CERN. Les rayons cosmiques ont permis aux physiciens d'entrevoir pour la première fois de nouvelles particules subatomiques, qui ont ensuite été étudiées en détail lors d'expériences menées dans des accélérateurs de particules. Positrons, muons, pions et kaons figurent sur cette photographie prise dans la chambre à bulles de 2 m du laboratoire du CERN.

DE LA CHAMBRE À BULLES À LA CHAMBRE À ÉTINCELLES

Une chambre à bulles peut fournir une image complète d'une interaction, mais elle présente de nombreuses limitations. Elle n'est sensible que lorsque son contenu est surchauffé, après l'expansion rapide. Les particules doivent pénétrer dans la chambre pendant cette période cruciale de quelques millisecondes, avant que la pression ne soit réappliquée pour « geler » la croissance de la bulle.

L'étude d'un grand nombre d'interactions rares nécessitait une technique plus sélective. Dans les années 1960, la chambre à étincelles s'est avérée être le compromis idéal.

La chambre à étincelles de base est constituée de feuilles de métal parallèles séparées de quelques millimètres et immergées dans un gaz inerte (moins réactif) tel que le néon. Lorsqu'une particule chargée traverse la chambre, elle laisse une trace ionisée dans le gaz, comme dans une chambre à nuages. Une fois la particule passée, on applique une haute tension à des plaques alternées dans la chambre à étincelles. Sous l'effet du champ électrique, des étincelles se forment le long des traînées ionisées. Ce processus ressemble à un éclair dans un orage. Les traînées d'étincelles peuvent être photographiées, ou leur position peut même être enregistrée en chronométrant l'arrivée des grésillements qui les accompagnent dans les microphones électroniques. Dans tous les cas, une image des traces de particules peut être construite pour une analyse informatique ultérieure.

L'intérêt de la chambre à étincelles est qu'elle possède une « mémoire » et qu'elle peut être déclenchée. Les compteurs à scintillation situés à l'extérieur de la chambre, qui réagissent rapidement, peuvent être utilisés pour localiser les particules chargées qui traversent la chambre. Si tout cela se produit

en l'espace d'un dixième de microseconde, les ions présents dans les interstices de la chambre à étincelles seront toujours là et l'impulsion haute tension révélera les traces.

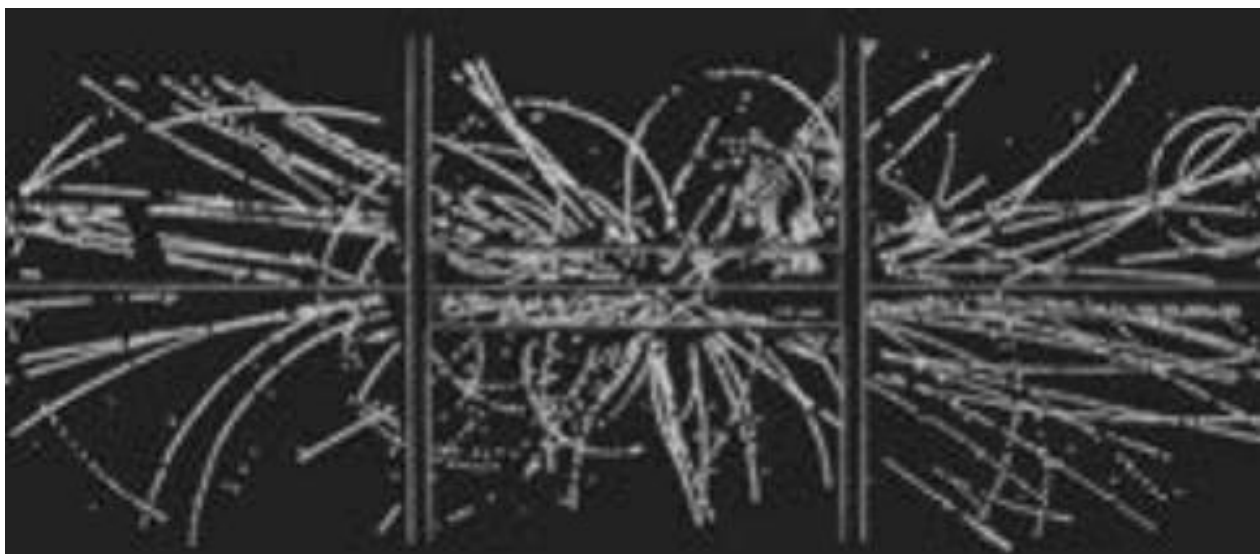


Fig. 16 ■ Image de l'une des premières observations de la particule W – vecteur chargé de la force faible – capturée par le détecteur UA1 au CERN en 1982. UA1 a détecté les collisions frontales de protons et d'antiprotons qui, dans cette vue, sont venus de la gauche et de la droite pour entrer en collision au centre du détecteur. L'écran d'ordinateur montre la partie centrale de l'appareil, qui révèle les traces des particules chargées tout au long de l'ionisation, captées par des milliers de fils. Chaque point de l'image correspond à un fil qui a enregistré une impulsion d'ionisation. Pas moins de 65 traces ont été produites, dont une seule révèle la désintégration d'une particule W créée fugitivement lors de la collision proton-antiproton. La trace blanche (fléchée) est due à un électron de haute énergie. En additionnant les énergies de toutes les autres particules, on constate qu'une quantité relativement importante d'énergie a disparu dans la direction opposée à l'électron, vraisemblablement emportée par un neutrino invisible. Ensemble, le neutrino et l'électron transportent une énergie équivalente à la masse de la particule W de courte durée.

Maintenant, on subdivise les plaques de la chambre à étincelles en feuilles de fils parallèles, espacées d'un millimètre environ. L'impulsion de courant associée à chaque étincelle n'est détectée que par le ou les fils les plus proches de l'étincelle. Ainsi, en enregistrant les fils qui ont détecté les

étincelles, vous savez à un millimètre près par où la particule est passée. Remarquez comment cela permet à la chambre à étincelles à fil de produire des informations prêtes à être digérées par un ordinateur sans autre traitement de ces données.

Les chambres à étincelles à fil pouvaient fonctionner jusqu'à 1000 fois plus vite que la plupart des chambres à bulles et s'adaptaient particulièrement bien aux techniques informatiques d'enregistrement des données développées dans les années 1960. Les signaux provenant de nombreux détecteurs – compteurs à scintillation, chambres à fils – pouvaient être introduits dans un petit ordinateur « en ligne », qui non seulement enregistrerait les données sur bande magnétique en vue d'une analyse ultérieure « hors ligne », mais pouvait également renvoyer des informations aux physiciens pendant le déroulement de l'expérience. Des ensembles de chambres avec des fils étalés dans trois directions différentes ont fourni suffisamment d'informations pour construire une image tridimensionnelle des trajectoires des particules. L'ordinateur pouvait calculer l'énergie et l'élan des particules et vérifier leur identification.

Dans les années 1960, les chambres à étincelles permettaient de collecter rapidement des données sur des interactions spécifiques ; les chambres à bulles, quant à elles, donnaient une image beaucoup plus complète des événements, y compris le point d'interaction, ou « sommet ». Les détecteurs « électroniques » et « visuels » étaient complémentaires et, ensemble, ils ont constitué un terrain de chasse idéal pour les chercheurs de particules inconnues jusqu'alors. Aujourd'hui, les chambres à étincelles en fonctionnement se trouvent principalement dans les musées scientifiques et les établissements d'enseignement pour rendre visible le passage des rayons cosmiques en particulier.

LES CHAMBRES À BULLES ÉLECTRONIQUES

À la fin du xx^e siècle, le nombre d'interactions dans les accélérateurs de particules est devenu énorme par rapport à l'époque des chambres à bulles et même des premières chambres à étincelles. La chambre proportionnelle multifilaire et la « chambre à dérive », qui fonctionnent beaucoup plus rapidement et avec plus de précision que les chambres à étincelles à fil, ont été mises au point.

Une chambre proportionnelle multifilaire ressemble superficiellement à une chambre à étincelles, puisqu'il s'agit d'un sandwich de trois plans de fils parallèles insérés dans une structure remplie de gaz, mais elle diffère par le fait que le plan central des fils est maintenu en permanence à un potentiel électrique d'environ 5 000 volts par rapport aux deux plans extérieurs. Les particules chargées déclenchent alors une avalanche d'électrons d'ionisation lorsqu'elles traversent le gaz. Une chambre dont les fils ne sont espacés que de 1 à 2 mm produit un signal quelques centièmes de microseconde après le passage d'une particule et peut traiter jusqu'à un million de particules par seconde passant par chaque fil, soit une amélioration d'un facteur mille par rapport à la chambre à étincelles.

L'inconvénient est que pour suivre les particules dans un grand volume, d'un mètre cube par exemple, il faut un grand nombre de fils, chacun équipé d'un système électronique pour amplifier les signaux. En outre, sa précision est limitée. Ces problèmes ont été résolus grâce à la « chambre à dérive », dont l'idée de base est de mesurer le temps – ce qui peut être fait très précisément avec l'électronique moderne – pour révéler la distance. La chambre est à nouveau constituée de fils parallèles tendus à travers un volume de gaz, mais certains de ces fils produisent des champs électriques qui divisent un grand volume en unités plus petites, ou « cellules ». Chaque cellule

agit comme un détecteur individuel, dans lequel le champ électrique dirige les électrons d'ionisation de la trajectoire d'une particule chargée vers un fil central « détecteur ». Le temps que mettent les électrons à atteindre ce fil donne une bonne mesure de la distance entre la trajectoire et le fil détecteur. Cette technique permet de localiser les trajectoires des particules avec une précision d'environ 50 microns (millionièmes de mètre).

LES MICROSCOPES À SILICIUM

Plusieurs particules exotiques ont une durée de vie d'environ 10^{-10} secondes, au cours desquelles elles peuvent se déplacer à une vitesse proche de celle de la lumière et couvrir quelques millimètres. Sur de telles distances, elles laissent des traces mesurables. Les particules contenant des quarks *charm* ou des quarks *bottom* ne vivent généralement pas plus de 10^{-13} s et ne peuvent parcourir que 300 micromètres. Pour les voir, il faut s'assurer que la partie du détecteur la plus proche du point de collision a une résolution aussi élevée que possible. Aujourd'hui, presque toutes les expériences sont dotées d'un détecteur « vertex » en silicium, qui peut révéler les courts coudes où les trajectoires divergent lorsque les particules à courte durée de vie se désintègrent au profit de celles qui ont une durée de vie plus longue. Les détecteurs ATLAS et CMS du grand collisionneur de hadrons (le LHC), par exemple, possèdent chacun plus de 100 mètres carrés de détecteurs en silicium.

Lorsqu'une particule chargée traverse le silicium, elle ionise les atomes et libère des électrons, qui peuvent alors conduire l'électricité. La technique la plus courante avec le silicium consiste à diviser sa surface lors de la fabrication en fines bandes parallèles espacées d'environ 20 microns (millionièmes de mètre), ce qui permet de mesurer les traces de particules avec une précision supérieure à 10 microns.

Les détecteurs à bandes de silicium se sont imposés dans les collisionneurs, en fournissant des « microscopes » à haute résolution pour voir en marche arrière dans le tube du faisceau, où les sommets de désintégration des particules peuvent se produire à proximité du point de collision. Ils se sont révélés particulièrement importants pour identifier les particules B qui contiennent le quark inférieur lourd *bottom*. Les quarks inférieurs préfèrent se désintégrer en quarks *charm*, qui à leur tour se désintégreront en quarks *strange*. Les particules contenant l'un ou l'autre de ces quarks se désintègrent en 10^{-12} s et ne parcourent que quelques millimètres, même lorsqu'elles sont créées dans les machines les plus énergétiques. Pourtant, les « microscopes » en silicium construits au cœur des détecteurs permettent souvent de repérer avec précision la séquence des désintégrations, du bas au charme en passant par les particules étranges. Au Tevatron du Fermilab, la capacité à « voir » les particules inférieures de cette manière a été déterminante pour la découverte du quark supérieur, recherché depuis longtemps, qui aime se désintégrer en quark inférieur. L'expérience LHCb au LHC du CERN à Genève s'appuie sur cette technologie pour isoler les sommets (vertex) de désintégration des particules *bottom*.

LA DÉTECTION DES NEUTRINOS

Il est très peu probable qu'un neutrino individuel interagisse avec la matière dans un détecteur, mais avec un nombre suffisant de neutrinos et de grands détecteurs, il est possible d'en attraper quelques-uns. L'idée de base pour détecter ces neutrinos rares est d'exploiter leur tendance à se transformer en leptons chargés électriquement, tels qu'un électron, lorsqu'ils entrent en contact avec la matière ; et l'électron, étant également chargé, est facile à détecter. C'est ainsi que nous avons beaucoup appris sur les neutrinos qui nous parviennent chaque seconde du Soleil.

Lorsque la lumière traverse un matériau, comme l'eau, elle voyage plus lentement que dans l'espace libre. Ainsi, bien que rien ne puisse aller plus vite que la lumière dans le vide, il est possible de voyager plus vite que la lumière à travers un matériau. Lorsqu'une particule traverse une substance plus rapidement que la lumière, elle peut créer une sorte d'onde de choc de lumière visible, connue sous le nom de rayonnement Cerenkov. Le rayonnement Cerenkov émerge avec un angle par rapport à la trajectoire de la particule, et plus la vitesse de la particule est grande, plus cet angle est important. L'expérience SuperKamiokande détecte les neutrinos lorsqu'ils interagissent dans l'eau pour former un électron ou un muon, selon le type de neutrino. Ces particules, contrairement au neutrino, sont chargées électriquement et, se déplaçant plus vite que la lumière dans l'eau, peuvent émettre un rayonnement Cerenkov. En analysant attentivement les modèles de lumière, on peut faire la distinction entre les muons et les électrons créés dans le détecteur, et donc entre les neutrinos muoniques et les neutrinos électroniques.

L'Observatoire de neutrinos de Sudbury (ONS) a été actif jusqu'en 2006. Il se trouvait à 2 070 mètres sous terre dans une mine de nickel à Sudbury, en Ontario, Canada. Son cœur était un récipient en acrylique rempli de 1 000 tonnes d'« eau lourde », appelée deutérium, dans laquelle un neutron se joint à l'unique proton de l'hydrogène ordinaire. Dans l'ONS, les neutrinos électroniques interagissent avec les neutrons du deutérium pour créer des protons et des électrons, et les électrons qui se déplacent rapidement émettent des cônes de rayonnement Cerenkov lorsqu'ils traversent l'eau lourde. La lumière Cerenkov forme des anneaux sur la surface intérieure du réservoir d'eau, où elle est captée par des milliers de phototubes disposés autour des parois.

Cependant, la principale caractéristique de l'ONS est qu'il peut également détecter les trois types de neutrinos (voir chapitre 8) grâce à une réaction propre au deutérium. Un neutrino, quel qu'il soit, peut diviser le noyau de deutérium, libérant ainsi le neutron, qui peut être capturé par un autre noyau. La capture est détectée lorsque le nouveau noyau gonflé se débarrasse de son énergie excédentaire en émettant des rayons gamma, lesquels à leur tour produisent des électrons et des positrons qui créent des motifs caractéristiques de la lumière Cerenkov dans l'eau environnante.

Ces expériences ont permis de compter les neutrinos provenant du Soleil. Elles ont confirmé que le Soleil est bien un moteur de fusion nucléaire. On soupçonnait depuis longtemps que c'est ainsi que les étoiles, comme le Soleil, brûlent, mais cela a finalement été prouvé en 2002.

LES DÉTECTEURS DANS LES COLLISIONNEURS

Les détecteurs électroniques ont produit leurs résultats les plus spectaculaires dans un environnement inaccessible aux chambres à bulles : les machines à faisceaux collisionnels, où les particules se rencontrent frontalement dans le tuyau du faisceau.

Ces pièces individuelles sont aujourd'hui combinées dans des détecteurs cylindriques qui entourent le point d'interaction dans un accélérateur à collision. La collision se produit sur l'axe central du détecteur. Lorsque les débris s'éparpillent, ils passent par une série de détecteurs différents, chacun ayant sa propre spécialité dans le domaine de la reconnaissance des particules.

Au Grand collisionneur de hadrons (le LHC), des paquets de particules se croisent 40 millions de fois par seconde, et chaque fois qu'ils se croisent, il y a plus de 50 collisions, soit

plus d'un milliard de collisions par seconde au total. Le taux de collecte de données exigé des détecteurs équivaut au traitement de l'information de 20 conversations téléphoniques simultanées par chaque homme, femme et enfant sur Terre.

D'énormes détecteurs sont installés aux points de collision. CMS (Compact Muon Solenoid) et ATLAS (A Toroidal LHC ApparatuS) explorent la nouvelle région énergétique à la recherche de toutes sortes de nouveaux effets, attendus ou inattendus. Le détecteur ATLAS est haut de 5 étages (20 m) et peut mesurer les trajectoires des particules avec une précision de 0,01 mm.

CMS et ATLAS suivent chacun la structure traditionnelle des détecteurs de particules modernes. Tout d'abord, le logiquement nommé « tracker interne », qui enregistre les positions des particules chargées électriquement avec une précision d'environ un centième de millimètre, ce qui permet aux ordinateurs de reconstituer leurs trajectoires au fur et à mesure qu'elles se courbent dans les champs magnétiques intenses. La couche suivante est un calorimètre en deux parties, conçu pour capter toute l'énergie de nombreux types de particules. La partie intérieure est le calorimètre électromagnétique, qui piège et enregistre l'énergie des électrons, des positrons et des photons.

Le verre au plomb de haute qualité, comme le cristal de la vaisselle en verre taillé, est souvent utilisé comme détecteur parce que le plomb dans le verre fait en sorte que les électrons et les positrons émettent des photons et que les photons se convertissent en paires électron-positron. L'effet net est une avalanche miniature d'électrons, de positrons et de photons, qui se poursuit jusqu'à ce que toute l'énergie de la particule d'origine ait été dissipée. Les électrons et les positrons se déplacent dans le verre plus rapidement que la lumière et émettent de la lumière Cerenkov, qui est captée

par des phototubes sensibles à la lumière. La quantité de lumière recueillie indique l'énergie de la particule originale entrée dans le bloc.

Des milliers de tonnes de fer sont intercalées avec des tubes remplis de gaz pour capter les protons, les pions et d'autres hadrons – des particules construites à partir de quarks. Il s'agit du « calorimètre à hadrons », ainsi appelé parce qu'il mesure l'énergie des hadrons, tout comme les calorimètres d'autres branches scientifiques mesurent l'énergie thermique. Le fer du calorimètre a une double fonction : en plus de ralentir et de piéger les hadrons, il fait partie de l'électro-aimant utilisé pour courber les trajectoires des particules chargées, révélant ainsi leur charge et permettant de les identifier.

Une couche externe est constituée de chambres à muons spéciales, qui traquent les muons, les seules particules chargées électriquement qui peuvent pénétrer aussi loin. L'ensemble des composants du détecteur forme un système hermétique conçu pour piéger autant de particules que possible lorsqu'elles émergent des collisions au centre. En principe, seuls les insaisissables neutrinos peuvent s'échapper complètement et ne laisser aucune trace dans les composants du détecteur. Mais même les neutrinos ont laissé une « carte de visite », car ils se sont échappés avec de l'énergie et de la quantité de mouvement, deux éléments qui doivent être conservés dans toute interaction.

L'ensemble de ce détecteur est conçu pour enregistrer les débris de collisions qui se produisent un milliard de fois par seconde. On est loin des premières chambres à nuages, qui ne pouvaient enregistrer qu'une fois par minute, ou même des chambres à bulles, qui n'enregistraient qu'une fois par seconde. Parmi les débris produits lors de ces collisions, à des énergies dépassant tout ce qui a pu être mesuré dans un accélérateur

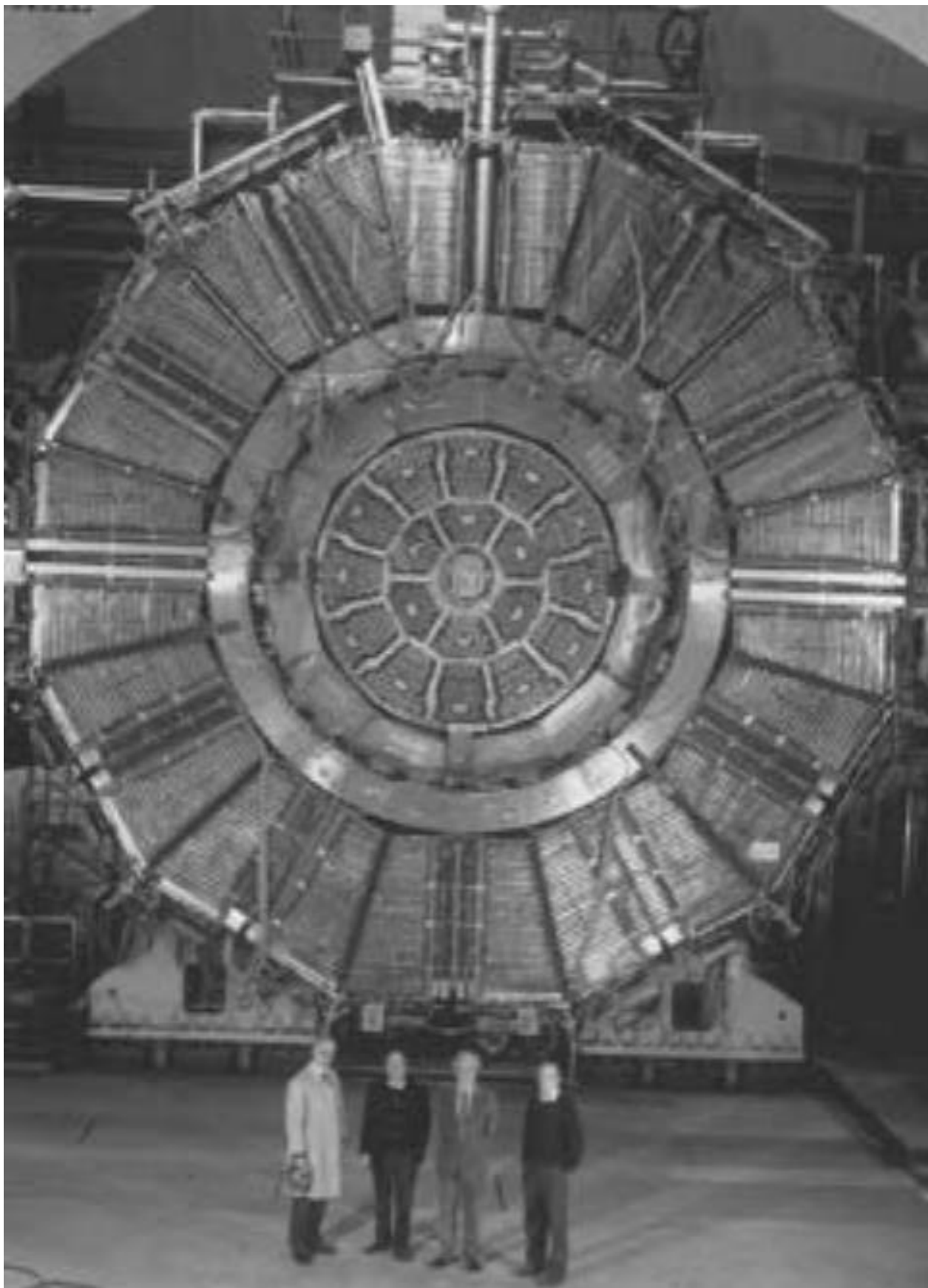


Fig. 17 ● Un détecteur LEP avec quatre scientifiques qui indiquent l'échelle de l'installation.

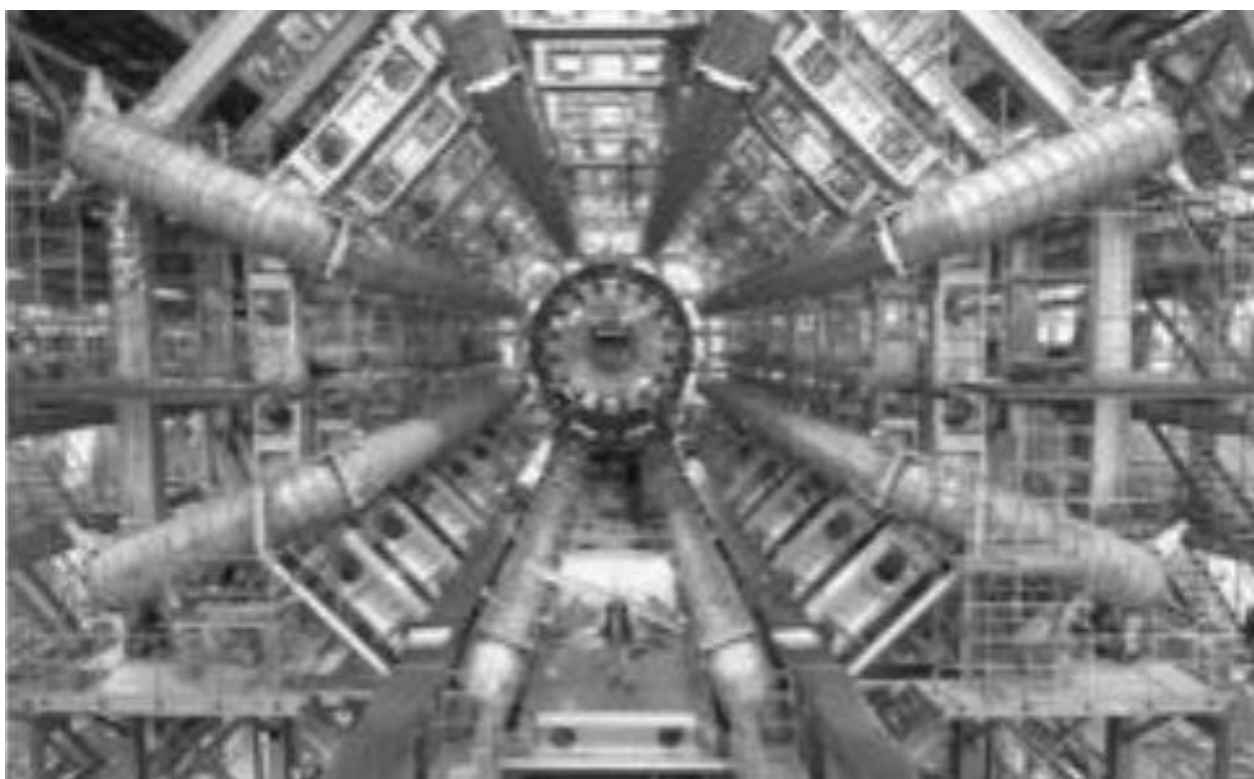


Fig. 18 ▶ Huit aimants toriques du détecteur ATLAS au Grand collisionneur de hadrons.

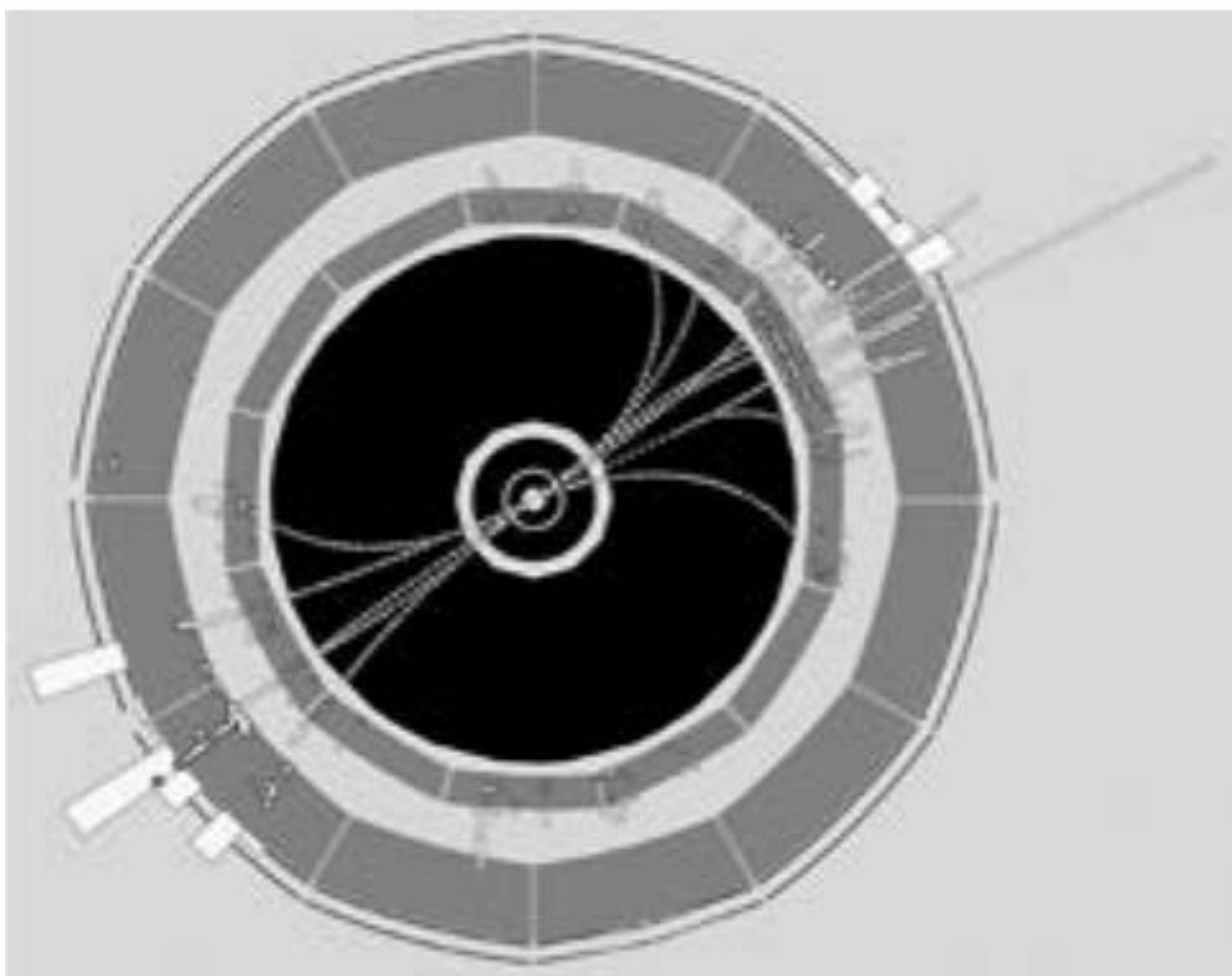


Fig. 19 ▶ Trajectoires de particules et d'antiparticules telles qu'elles apparaissent sur l'écran de l'ordinateur. Comparez la vue de l'ordinateur avec la vue de l'extrémité du détecteur de la figure 17.

de particules existant, le joyau sera un phénomène inattendu. La découverte majeure annoncée en juillet 2012 a été celle du boson de Higgs (voir chapitres 7 et 10). Cette particule, d'une masse de 125 GeV, n'est produite en moyenne qu'une fois tous les 20 millions de millions de collisions. Cela signifie qu'avec jusqu'à un milliard de collisions par seconde, un boson de Higgs est apparu environ une fois par jour dans chaque expérience au LHC, même si l'amélioration de l'intensité des faisceaux du LHC permettra d'augmenter ce taux à l'avenir. Il a été suggéré qu'il était plus facile de trouver une aiguille dans une botte de foin que d'apercevoir un boson de Higgs parmi cent mille milliards d'autres événements. Un défi informatique a consisté à reconnaître le Higgs et à n'enregistrer sur bande magnétique que les données sélectionnées.

Tout ceci illustre comment notre capacité à apprendre sur les origines et la nature de la matière s'est appuyée sur des progrès réalisés sur deux fronts : la construction d'accélérateurs de plus en plus puissants et le développement de moyens sophistiqués d'enregistrement des collisions.

7

Les forces de la nature

Quatre forces fondamentales régissent l'Univers : la **gravité**, la **force électromagnétique** et deux autres forces, dites **forte** et **faible**, qui agissent à l'intérieur et autour du noyau atomique. Ces deux dernières forces agissent sur des distances plus petites que les atomes et sont donc moins familières à nos sens macroscopiques que les effets de la gravité et des aimants. Cependant, ils sont essentiels à notre existence, car ils permettent au Soleil de brûler et de fournir la chaleur indispensable à la vie.

La gravité est le phénomène qui nous est le plus familier. Entre les atomes individuels ou leurs particules constitutives, les effets de la gravité sont quasi nuls. L'intensité de la gravité entre les particules individuelles est extrêmement faible, si faible que dans les expériences de physique des particules, nous pouvons l'ignorer en toute sécurité. C'est parce que la gravité attire tout vers tout que ses effets s'additionnent jusqu'à devenir puissants, agissant sur des distances cosmiques.

Les forces électriques fonctionnent selon le principe bien connu « les charges semblables se repoussent, les charges différentes s'attirent ». Ainsi, les électrons chargés négativement sont maintenus sur leur trajectoire dans les atomes

par l'attraction électrique exercée par le noyau central chargé positivement.

Les charges en mouvement produisent des effets magnétiques. Les pôles nord et sud d'un barreau aimanté sont le résultat des mouvements électriques des atomes agissant de concert.

La force électromagnétique est intrinsèquement beaucoup plus puissante que la gravité ; mais la concurrence entre les attractions et les répulsions neutralise ses effets sur de grandes distances, laissant la gravité comme effet dominant à grande échelle. Cependant, les effets des charges électriques tourbillonnantes dans le cœur en fusion de la Terre provoquent des fuites de champs magnétiques dans l'espace. L'aiguille d'une boussole indiquera le pôle Nord magnétique, qui peut se trouver à des milliers de kilomètres de distance du vrai pôle, en raison de ces effets.

C'est la force électromagnétique qui maintient les atomes et les molécules ensemble, formant ainsi la matière. Vous, moi et toute chose sommes maintenus ensemble par la force électromagnétique. Lorsque la pomme est tombée de l'arbre devant Isaac Newton, c'est la gravité qui l'a guidée, mais c'est la force électromagnétique – responsable de la solidité du sol – qui l'a empêchée de continuer à descendre jusqu'au centre de la Terre. Une pomme peut tomber pendant plusieurs secondes d'une grande hauteur, accélérée par la force de gravité. Mais lorsqu'elle touche le sol, elle est arrêtée et réduite en bouillie en un instant : c'est la force électromagnétique qui est à l'œuvre.

Voici une idée de l'intensité relative de ces deux forces. Dans un atome d'hydrogène se trouvent un électron chargé négativement et un proton chargé positivement. Ils s'attirent mutuellement par leur gravité ; ils ressentent également l'attraction de charges électriques opposées. Cette dernière

est 10^{40} fois plus forte que leur gravité mutuelle. Pour donner une idée de l'ampleur de ce phénomène, considérons le rayon de l'univers visible : il s'est étendu à une fraction de la vitesse de la lumière, soit environ 10^{16} mètres par an, pendant quelque 10^{10} ans depuis le Big Bang, de sorte que l'Univers dans son ensemble mesure tout au plus 10^{25} mètres. Le diamètre d'un proton est d'environ 10^{-15} mètre. Ainsi, 10^{40} est encore plus grand que la taille de l'Univers comparée à la taille d'un seul proton. Il est clair que nous pouvons ignorer la gravité pour les particules individuelles aux énergies actuelles.

L'attraction des opposés maintient les électrons dans des trajectoires atomiques autour du noyau chargé positivement, mais la répulsion des charges similaires crée un paradoxe pour l'existence du noyau lui-même. Le noyau est compact et sa charge électrique positive est due aux nombreux protons chargés positivement qu'il contient. Comment ces protons, soumis à une répulsion électrique aussi intense, peuvent-ils survivre ?

Le fait qu'ils y parviennent donne un indice immédiat de l'existence d'une force d'attraction « forte », ressentie par les protons et les neutrons et qui est suffisamment puissante pour les maintenir en place et pour résister à la perturbation électrique. Cette force forte est l'une des deux forces qui agissent à l'intérieur et autour du noyau atomique. Connues sous le nom de **force forte** et de **force faible**, leurs noms faisant référence à leur puissance respective par rapport à celle de la force électromagnétique à l'échelle nucléaire, ce sont des forces à courte portée qui ne sont pas immédiatement familières à nos sens grossiers, mais qui sont essentielles à notre existence.

La stabilité des noyaux des éléments atomiques peut être un équilibre délicat entre l'attraction forte et la répulsion

électrique. Il ne faut pas mettre trop de protons ensemble, sinon la perturbation électrique rendra le noyau instable. Ce phénomène peut être à l'origine de certaines désintégrations radioactives, où un noyau se divise en fragments plus petits. Les neutrons et les protons ressentent la force forte de la même manière ; seuls les protons ressentent la répulsion électrique. C'est pourquoi les noyaux de tous les éléments autres que l'hydrogène contiennent non seulement des protons, mais aussi des neutrons pour renforcer la stabilité de la force d'attraction de l'ensemble. Par exemple, l'uranium 235 est appelé ainsi parce qu'il contient 92 protons (qui le définissent comme de l'uranium en raison des 92 électrons qui neutralisent l'atome) et 143 neutrons, soit un total de 235 protons et neutrons.

À ce stade, on peut se demander pourquoi les noyaux privilégient les protons, puisqu'un excès de neutrons ne semble pas conduire à l'instabilité. La réponse dépend en détail d'effets de mécanique quantique qui dépassent le cadre de ce livre, mais elle est due en grande partie à la masse supplémentaire d'un neutron par rapport à un proton. Comme nous l'avons vu précédemment, cela sous-tend une instabilité intrinsèque des neutrons, par laquelle ils peuvent se désintégrer, se transformer en protons et éjecter un électron – la particule « bêta » de la « radioactivité bêta ».

La force qui détruit un neutron est la force faible, ainsi appelée parce qu'elle semble faible par rapport à la force électromagnétique et forte à température ambiante. La force faible perturbe les neutrons et les protons, provoquant la transmutation du noyau d'un élément atomique en un autre par le biais de la radioactivité bêta. Elle joue un rôle important en aidant à convertir les protons – les graines du combustible hydrogène du Soleil – en hélium (le processus par lequel l'énergie est libérée, émergeant finalement sous forme de lumière solaire).

Les attractions gravitationnelles entre les nombreux protons du Soleil attirent ceux-ci vers l'intérieur jusqu'à ce qu'ils se touchent presque. Parfois, deux protons se déplacent suffisamment vite pour surmonter momentanément leur répulsion électrique, et ils se heurtent l'un l'autre. La force faible transmute un proton en neutron, la force forte regroupe ensuite ces neutrons avec les protons, après quoi ils construisent un noyau d'hélium. La force électromagnétique libère et rayonne de l'énergie. C'est la présence de ces quatre forces, avec leurs caractéristiques et leurs forces différentes, qui permet au Soleil de brûler à un rythme suffisant pour que nous soyons là, que nous existions.

Dans la matière ordinaire, la force forte n'agit que dans le noyau et elle est fondamentalement due à la présence des quarks, les particules de base ultimes à partir desquelles les protons et les neutrons sont formés. De même que les forces électriques et magnétiques sont des effets découlant des charges électriques, la force forte est due en fin de compte à une nouvelle variété de charges, qui sont portées par les quarks mais pas par les leptons. Par conséquent, les leptons, tels que l'électron, sont aveugles à la force forte ; à l'inverse, les particules telles que les protons et les neutrons, qui sont constituées de quarks, ressentent la force forte.

Les lois qui la régissent sont fondamentalement similaires à celles de la force électromagnétique. Les quarks portent la nouvelle charge dans ce que nous pouvons définir comme la forme positive, et les antiquarks porteront la même quantité mais avec une charge négative. L'attraction des opposés rapproche alors un quark et un antiquark : d'où les états liés $q\bar{q}$ que nous appelons mésons. Mais comment se forment les baryons, composés de trois quarks ?

Il s'avère qu'il existe trois variétés distinctes de charges fortes, que nous appelons rouge (R), bleu (B) et vert (G¹⁵). En tant que telles, elles sont connues sous le nom de charges de couleur, bien que cela n'ait rien à voir avec la couleur dans son sens familier – il s'agit simplement d'un nom. Comme les couleurs différentes s'attirent et les couleurs semblables se repoussent, deux quarks portant chacun une charge de couleur rouge, par exemple, se repousseraient mutuellement. En revanche, un rouge et un vert s'attirent, tout comme trois couleurs différentes, RGB. Si l'on approche un quatrième quark d'un tel trio, il sera attiré par deux quarks et repoussé par le troisième qui porte la même charge de couleur. La répulsion équilibre l'attraction nette, de sorte que le quatrième quark se trouve dans une sorte d'incertitude ; toutefois, s'il trouve deux autres quarks, portant chacun l'une des deux autres charges de couleur, ce trio peut également se lier étroitement. Ainsi, nous commençons à voir que l'attraction des trios, comme lors de la formation des protons et des neutrons, est due à la triple nature des charges de couleur. De même que la présence de charges électriques dans les atomes conduit à leur regroupement pour former des molécules, les charges de couleur des protons et des neutrons conduisent aux regroupements que nous connaissons sous le nom de noyaux.

La similitude sous-jacente des règles d'attraction et de répulsion donne un comportement similaire aux forces électromagnétiques et aux forces fortes à des distances bien inférieures à la taille d'un proton ou d'un neutron individuel ; cependant, la triple richesse des charges de couleur positives ou négatives par rapport à leurs homologues électriques singulières entraîne un comportement différent de ces forces à des distances plus grandes. Les forces générées par la couleur saturent à des

15. NDT. G pour *green* (vert).

distances d'environ 10^{-15} mètre, la taille typique d'un proton ou d'un neutron, et sont très puissantes, mais seulement tant que les deux particules empiètent à l'intérieur de cette distance – elles se « touchent » figurativement l'une l'autre – c'est pourquoi les forces induites par la couleur n'agissent que sur les dimensions nucléaires. La force électromagnétique, en revanche, agit sur des dimensions atomiques de l'ordre de 10^{-10} mètre lors de la construction d'atomes stables, et peut même être ressentie sur des distances macroscopiques, comme dans les champs magnétiques entourant la Terre.

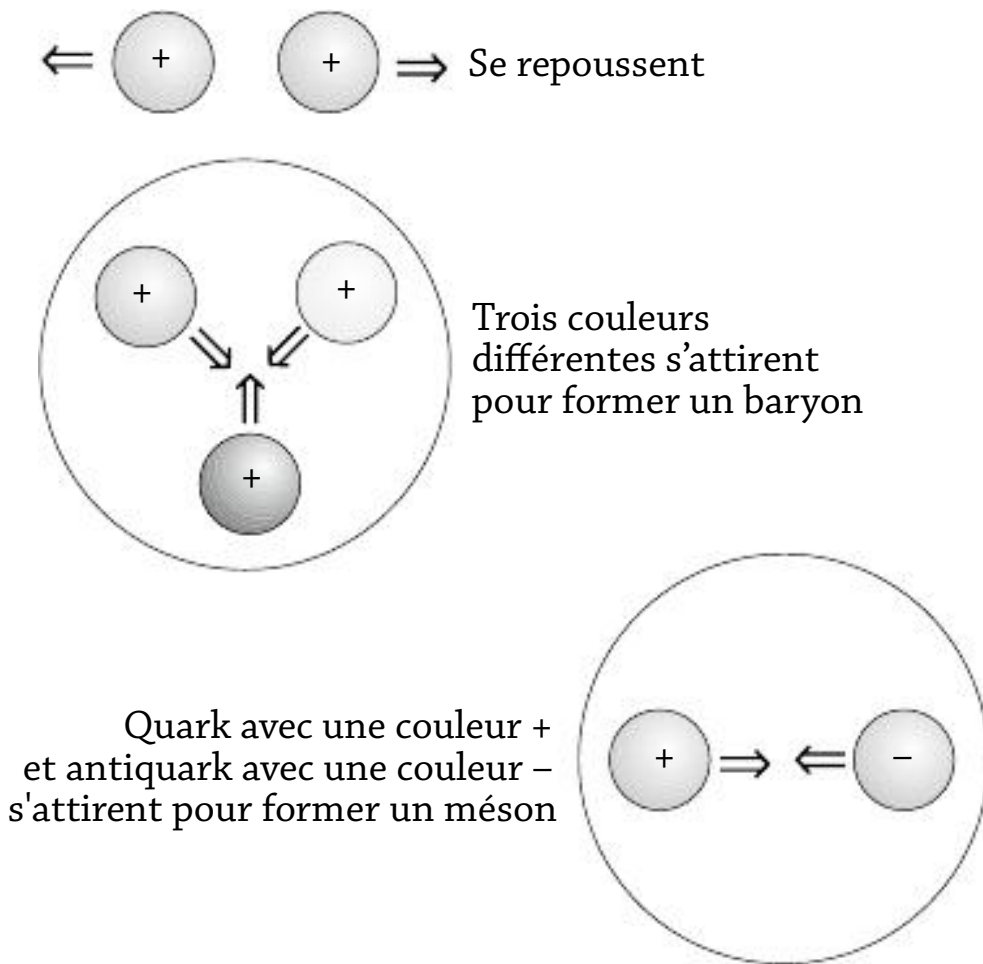


Fig. 20 Règles d'attraction et de répulsion des charges de couleur. Les couleurs semblables se repoussent ; les couleurs différentes s'attirent. Trois quarks portant chacun une couleur différente s'attirent pour former un baryon. Un quark et un antiquark portent des couleurs opposées et peuvent également s'attirer pour former un méson.

Cela nous amène naturellement à la question de savoir comment les forces répartissent leurs effets dans l'espace.

LES VECTEURS DE FORCES

Comment des forces, telles que la force électromagnétique, parviennent-elles à étendre leurs effets dans l'espace ? Comment un seul proton parvient-il à capturer un électron situé à 10^{-10} mètre et à former ainsi un atome d'hydrogène ? La théorie quantique implique l'action d'agents intermédiaires – l'échange de particules ; dans le cas de la force électromagnétique, il s'agit de photons, des paquets quantiques de radiations électromagnétiques, dont la lumière.

Les charges électriques peuvent émettre ou absorber un rayonnement électromagnétique et ses agents, les photons ; de même, les charges de couleur peuvent également émettre et absorber un rayonnement dont les agents sont connus sous le nom de gluons. Ce sont ces gluons qui « collent » les quarks les uns aux autres pour former les protons, les neutrons et les noyaux atomiques. La force faible implique de manière analogue des vecteurs de force appelés bosons W ou Z. Le photon, les bosons W et Z sont des vecteurs de force.

Le photon, les bosons W et Z et les gluons sont connus sous le nom de « bosons de jauge » en jargon de la physique des particules désignant les porteurs de forces fondamentales qui sont décrits par une structure mathématique commune nommée « théorie de jauge ». Les bosons de jauge portent une unité de spin, ce qui en fait des particules « vectorielles ». (Le boson de Higgs n'est pas un « boson de jauge » ; il n'a pas de spin, ce qui est unique parmi les particules fondamentales connues à ce jour.)

Le boson W diffère du photon sur deux points importants : il a une charge électrique et une masse importante. Ainsi, un neutron neutre se transforme en proton chargé positivement lorsqu'un W^- est émis ; c'est la source de la désintégration bêta des neutrons, le W^- se transformant en électron et en antineutrino. La masse du W est environ

80 fois supérieure à celle d'un proton ou d'un neutron. Si vous étiez dans une voiture pesant une tonne et que 80 tonnes étaient soudainement éjectées, vous vous plaindriez que quelque chose ne va pas ! Mais dans le monde quantique, ce genre de chose peut se produire. Toutefois, cette violation de l'équilibre énergétique est éphémère, limitée dans le temps, de sorte que le produit du déséquilibre, Delta-E (ΔE), et le temps qu'il peut durer, Delta-t (Δt), ne peuvent pas dépasser le quantum h de Planck, ou numériquement $\Delta E \times \Delta t < 6 \times 10^{-25}$ GeV-secondes. Cette restriction est une forme du « principe d'incertitude d'Heisenberg ».

Cela signifie que pendant une seconde, il est possible de mettre le compte d'énergie à découvert, ou d'« emprunter » la quantité insignifiante de 10^{-25} GeV. L'emprunt de 80 GeV (l'énergie minimale pour fabriquer un seul W) peut se produire pendant environ 10^{-24} s, période pendant laquelle même la lumière ne peut parcourir plus d'un dixième de la distance d'un proton. Par conséquent, la distance sur laquelle le W peut transmettre la force est considérablement inférieure à la taille d'un seul proton. La courte portée de la force faible est donc due à la masse excessivement élevée de sa particule vectrice. Il ne s'agit pas de dire que la force existe jusqu'à un certain point et qu'elle s'éteint soudainement ; au contraire, elle s'éteint et sa force diminue radicalement à des distances de l'ordre de la taille d'un proton. C'est à de telles distances que la désintégration bêta se manifeste, et c'est ainsi que la force a été qualifiée de « faible ».

En 1865, James Clerk Maxwell avait réussi à unifier les phénomènes disparates de l'électricité et du magnétisme en ce que nous appelons aujourd'hui l'électromagnétisme. Un siècle plus tard, Glashow, Salam et Weinberg ont réuni la force électromagnétique et la force faible dans ce qui est devenu la théorie électrofaible. Cette théorie expliquait la faiblesse apparente de la composante « faible » de cette force

unifiée par la masse importante du W , alors que le photon de la force électromagnétique n'a pas de masse. Leur théorie impliquait qu'en plus des W^+ et W^- chargés électriquement, il existait un partenaire neutre lourd, le Z^0 , d'une masse d'environ 90 GeV. L'une des implications de leurs travaux était que si l'on pouvait fournir suffisamment d'énergie, de l'ordre de 100 GeV ou plus, pour que le W ou le Z puisse être produit directement en laboratoire, on verrait que la force a une intensité comparable à celle de l'électromagnétisme et qu'elle n'est pas excessivement faible après tout. De telles expériences ont été réalisées et ont confirmé ce phénomène.

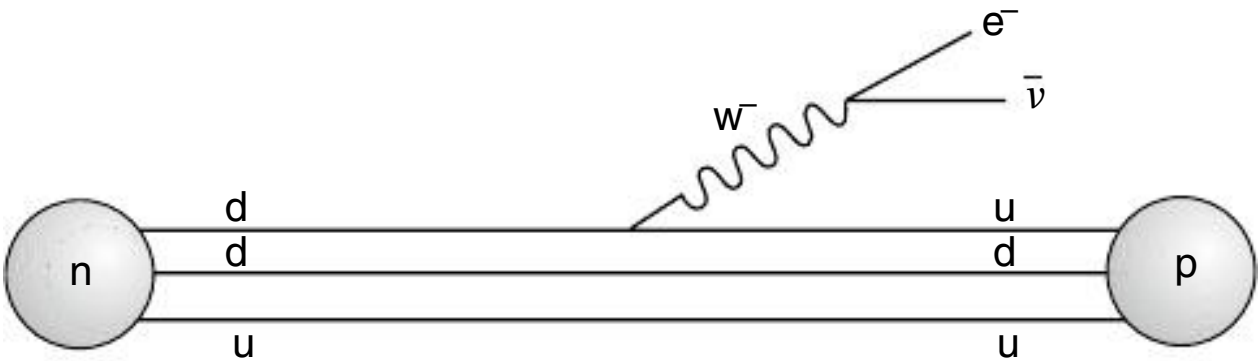


Fig. 21 ➤ Désintégration bêta par W . Un neutron se transforme en proton en émettant un W , qui se transforme ensuite en électron et en neutrino.

Forces	Intensité	Vecteur	Exemple
forte	1	gluon	noyau atomique
électromagnétique	$\sim 10^{-2}$	photon	atomes
faible	$\sim 10^{-5}$	W^+, W^-, Z^0	neutrinos
gravitation	$\sim 10^{-42}$	graviton	galaxies, planètes

Fig. 22 ➤ L'intensité relative des différentes forces lorsqu'elles agissent entre des particules fondamentales à des énergies faibles, typiques de la température ambiante. À des énergies supérieures à 100 GeV, les forces faibles et électromagnétiques deviennent similaires. Les vecteurs des forces sont représentés : le gluon, le photon et le graviton sont tous sans masse ; le W^+ , le W^- et le Z^0 sont massifs. Des exemples d'entités ayant une affinité particulière pour les différentes forces sont également présentés.

Les particules W et le Z ont été découvertes au CERN en 1983-1984, où ils ont été produits de manière fugace parmi les débris issus des collisions frontales à haute énergie entre protons et antiprotons. Ces collisions produisent un grand nombre de pions, et il est rare qu'un seul W ou Z soit produit. C'est ce qui a conduit à la création d'un accélérateur dédié, le LEP, où des faisceaux contrarotatifs d'électrons et de positrons ont été mutuellement annihilés, accordés sur une énergie totale de 90 GeV. Cette énergie correspond à celle d'un Z au repos, et le LEP a donc été en mesure de produire des particules Z proprement. Au cours d'une décennie d'expériences, plus de 10 millions d'exemples de Z ont été produits et étudiés. Ces expériences ont prouvé que le concept de fusion des forces électromagnétique et faible en une seule force électrofaible est correct. Ce sont les masses importantes du W et du Z qui ont donné cette faiblesse apparente lorsqu'ils ont été impliqués dans des expériences historiques, à des énergies bien inférieures à 100 GeV, comme dans la radioactivité bêta.

Enfin, nous avons la force forte, dont les origines sont les charges de couleur portées par les quarks ou les antiquarks. Dans ce cas, la force est transmise par des « gluons ». Comme un quark peut avoir l'une des trois couleurs R, B ou G, le gluon rayonné peut lui-même être vecteur d'une charge de couleur. Par exemple, un quark de charge R peut se retrouver avec une couleur B si le gluon porte une charge du type « R positif, B négatif ». La théorie quantique relativiste, connue sous le nom de chromodynamique quantique (CDQ ou QCD), autorise un total de huit couleurs différentes de gluons.

Comme les gluons portent une charge de couleur, ils peuvent s'attirer et se repousser mutuellement lorsqu'ils se déplacent dans l'espace. Ce n'est pas le cas des photons lorsqu'ils transmettent la force électromagnétique. Les

photons ne portent pas eux-mêmes de charge (électrique) et ne subissent donc pas mutuellement les forces électromagnétiques. Les photons peuvent voyager dans l'espace de manière indépendante, en remplissant tout le volume, l'intensité de la force résultante s'affaiblissant comme le carré de la distance – la fameuse « loi de l'inverse du carré » de l'électrostatique. Les gluons, vecteurs de charges de couleur, ne remplissent pas l'espace de la même manière que les photons. Leurs interactions font que la force qui en résulte est concentrée sur une ligne, le long de l'axe reliant les deux quarks colorés.

Ainsi, alors que les photons remplissent l'espace et voyagent indépendamment, les gluons se regroupent. L'une des conséquences de ce regroupement est la possibilité que les gluons s'attirent mutuellement pour former des états composites de courte durée appelés « boules de glu ». C'est cette affinité mutuelle entre les gluons pendant qu'ils transmettent la force qui fait que les comportements à longue portée de la force électromagnétique et de la force de couleur (forte) diffèrent radicalement. La force électromagnétique s'éteint avec l'inverse du carré de la distance, ce qui n'est pas le cas de la force de couleur. L'énergie nécessaire pour séparer deux sources de couleur, telles que les quarks, augmente avec la distance. À une distance d'environ 10^{-15} mètre, cette énergie tend à devenir infinie. Les quarks individuels ne peuvent donc pas être séparés de leurs frères ; ils restent regroupés en trios, comme les baryons, ou en quark et antiquark, comme les mésons. C'est ainsi que les effets des charges de couleur deviennent « forts » à grande distance.

À courte distance, comme le montrent les expériences à haute énergie, les forces électrofaibles et de couleur semblent agir comme si elles présentaient une grande unité. De même que les particules chargées électriquement peuvent émettre

des photons, les quarks colorés peuvent émettre des gluons. C'est ce que l'on a observé dans les « événements à 3 jets » au LEP, comme le montre la figure 23. Ils présentent leurs différents caractères à des énergies plus basses, telles qu'elles étaient la norme jusqu'à la fin du xx^e siècle : les W et Z massifs provoquent une faiblesse apparente ; les interactions mutuelles entre les gluons font que la force de couleur, par contraste, prend une grande intensité.

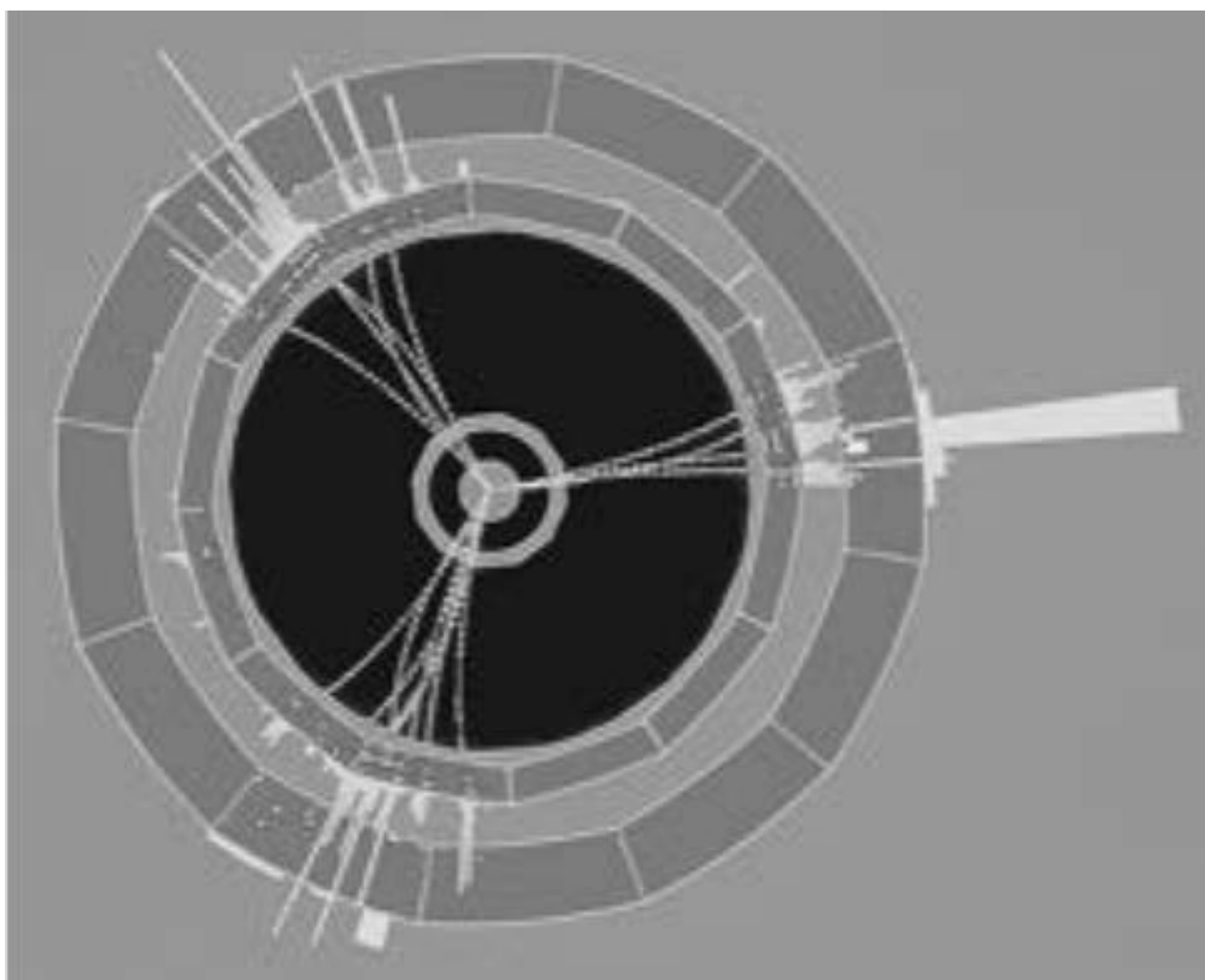


Fig. 23 ► Nous voyons ici le résultat de l'annihilation d'un électron et d'un positron où trois jets de particules ont émergé. Un quark et un antiquark ont d'abord été produits, et presque immédiatement, l'un d'entre eux a émis un gluon. Le quark, l'antiquark et le gluon sont les sources des trois jets de particules détectés.

C'est ce que nous savons. Si l'on extrapole les effets des forces de couleur, des forces faibles et des forces électromagnétiques à des énergies extrêmes, bien au-delà de ce que

nous pouvons mesurer en laboratoire, il apparaît que les trois se ressemblent. Le comportement des particules atomiques à de très hautes énergies, semblables à celles qui étaient abondantes juste après le Big Bang, suggère que les forces de couleur sont affaiblies et que leur force est similaire à la force électromagnétique bien connue. Un indice d'unité alléchant est apparu. C'est ce que l'on appelle la grande unification des forces. Elle suggère qu'il existe une simplicité sous-jacente, une unité, dans la nature et que nous n'en avons jusqu'à présent aperçu qu'un vestige asymétrique et froid. Il appartiendra à de futures expériences de vérifier si cela est vrai.

Les structures mathématiques qui sous-tendent les « théories de jauge » décrivant les forces électromagnétiques, faibles et de couleur forte peuvent être généralisées sans difficulté, mais rien ne prouve que la nature en fait usage. Il pourrait y avoir d'autres forces, médiées par des bosons de jauge très massifs et trop faibles pour être discernées dans les expériences actuelles. Les propriétés du muon – une version apparemment plus massive de l'électron (voir chapitre 8) – laissent penser que cela pourrait être le cas, mais cela reste hautement spéculatif.

LE BOSON DE HIGGS

Même si l'espace était entièrement vidé de sa matière et de toutes les sources d'énergie connues, il serait toujours rempli d'un champ fantomatique qui ne peut être arrêté. Immergés dans cette essence depuis toujours, nous n'en avons pourtant pas eu conscience jusqu'à ce que son existence soit établie en juillet 2012 avec la découverte du boson de Higgs dans le Grand collisionneur de hadrons du CERN. De même que l'excitation d'un champ électromagnétique produit des photons, l'excitation de ce « champ de Higgs » peut produire des bosons de Higgs.

Bien que le champ de Higgs ne soit pas le frère des champs électromagnétique, faible et fort, où les forces sont transmises par des bosons de jauge de spin 1, il est néanmoins fondamental pour la formation de structures à partir des débris chaotiques du Big Bang. Une petite quantité d'énergie peut exciter des millions de photons, mais il faut 125 GeV concentrés dans un volume minuscule pour exciter ne serait-ce qu'un boson de Higgs. Alors que le champ électromagnétique et les autres champs ont un sens de direction – ce sont des champs vectoriels –, le champ de Higgs n'en a pas : le boson de Higgs n'a pas de spin ; c'est un boson scalaire fondamental – le seul exemple de ce type connu à ce jour.

Sans la présence de ce champ, les particules fondamentales se déplaceraient dans l'espace à la vitesse de la lumière, sans possibilité d'être happées par des atomes ou des molécules. Leur interaction avec le champ leur confère une masse. La masse du boson W affaiblit la force « faible » de sorte que la conversion de l'hydrogène en hélium dans le Soleil se fait très lentement. Cela a permis au Soleil de durer 5 milliards d'années, suffisamment longtemps pour que l'évolution se soit produite ici sur Terre. Ainsi, bien que le boson de Higgs et le champ qui lui est associé puissent sembler obscurs, ils sont essentiels à notre existence.

18

La matière (et l'antimatière) exotique

L'ÉTRANGÉTÉ

Nous avons rencontré les particules de base à partir desquelles la matière sur Terre est finalement constituée. Cependant, dans le schéma de la nature, il y a plus que cela. Des rayons cosmiques provenant de l'espace nous atteignent sans arrêt. Ils sont constitués de noyaux d'éléments produits dans les étoiles et lors d'événements catastrophiques survenus ailleurs dans le cosmos ; ils sont projetés dans l'espace et certains, canalisés par les champs magnétiques de la Terre, frappent la haute atmosphère et produisent des gerbes de particules secondaires. Dans les années 1940 et 1950, les rayons cosmiques ont été une source active de pour la découverte de formes de matière jusqu'alors inconnues sur Terre. Certaines d'entre elles, aux propriétés inhabituelles, ont été appelées particules « étranges ». Aujourd'hui, nous savons ce qui les distingue des protons, neutrons et pions familiers :

elles contiennent une nouvelle variété de quark, connue sous le nom de quark *strange*¹⁶.

Il existe des baryons étranges et des mésons étranges. Un baryon étrange est constitué de trois quarks, dont un au moins est un quark étrange ; plus le baryon contient de quarks étranges, plus son « étrangeté » est grande. Un méson est constitué d'un quark et d'un antiquark et donc, par analogie, un méson étrange est un méson qui contient soit un quark étrange, soit un antiquark étrange. La découverte des particules étranges a précédé de plusieurs années la découverte que les baryons et les mésons sont constitués de quarks. Les propriétés de la variété des particules étranges ont conduit les théoriciens à inventer le concept d'étrangeté, qui agit à bien des égards comme la charge : l'étrangeté est conservée lorsque la force forte agit sur les particules. On peut ainsi expliquer quels processus sont favorisés ou défavorisés en calculant le degré d'étrangeté de chacune des particules participantes. Il a été déterminé que divers mésons portaient une étrangeté de + 1 ou - 1. Selon ce schéma, les baryons étranges portaient des valeurs de - 1, - 2 ou - 3. Aujourd'hui, nous comprenons ce qui détermine cela. La quantité d'étrangeté négative que porte une particule correspond au nombre de quarks étranges qu'elle contient. Il aurait pu sembler plus naturel de définir l'étrangeté de telle sorte que chaque quark étrange porte une unité d'étrangeté positive, et si nous avions connu les quarks avant l'idée d'étrangeté, c'est probablement ainsi que les choses se seraient passées. Mais nous sommes coincés avec cet accident de l'histoire selon lequel le nombre de quarks étranges représente l'étrangeté négative et le nombre d'antiquarks étranges représente l'étrangeté positive. (Un accident historique similaire nous a donné une charge négative pour l'électron).

16. NDT. Le **quark étrange**, souvent appelé **quark *strange*** en empruntant la terminologie anglophone, et également nommé **quark s**.

Un quark étrange est chargé électriquement, avec une quantité de $-1/3$, comme le quark *down*. Il est plus massif que le quark *down*, avec un mc^2 de ~ 150 MeV. À tous égards, les quarks étranges et les quarks *down* semblent identiques. En raison de la masse supplémentaire du quark étrange par rapport à un quark *up* ou *down*, chaque fois que l'un d'entre eux dans le proton ou le neutron, par exemple, est remplacé par un quark *strange*, le baryon étrange résultant est plus massif d'environ 150 MeV par unité d'étrangeté (négative).

Les baryons qui ressemblent au proton et au neutron et qui ont un spin $1/2$ sont énumérés dans la figure 24a avec leur contenu en quarks, leur charge électrique, leur étrangeté et la valeur de leur masse (ou mc^2 en MeV). La règle n'est pas exacte, mais elle est au moins qualitativement vraie (les masses réelles, comme c'était le cas pour le proton et le neutron, dépendent également des différentes forces électriques entre les constituants et du fait que leurs tailles, bien qu'approximativement 10^{-15} m, ne sont pas toutes identiques, en raison de la nature compliquée des forces qui agissent sur eux). La règle est vérifiée plus précisément dans l'ensemble des baryons *strange* de spin $3/2$ qui sont partenaires de la résonance Δ , comme le montre la figure 24b.

Il existe des mésons *strange* $+1$, comme le $K^+(u\bar{s})$ ou $K^0(d\bar{s})$, et -1 , tels que $K^-(s\bar{u})$ ou $K^0(s\bar{d})$, avec des masses $mc^2 \sim 500$ MeV. Il existe également des mésons qui contiennent à la fois un quark *strange* et un antiquark, de sorte qu'il n'y a pas d'étrangeté nette. Cette combinaison $s\bar{s}$ conduit à un troisième méson électriquement neutre, connu sous le nom d'eta-prime, η' , en plus des π^0 et η que nous avons vus dans le chapitre 4.

a)

Baryon	Quarks	Charge	Étrangeté	mc^2 (MeV)
proton	uud	+1	0	938
neutron	ddu	0	0	940
Lambda Λ	uds	0	-1	1115
Sigma Σ^+	uus	+1	-1	1189
Σ^0	uds	0	-1	1192
Σ^-	uds	-1	-1	1197
Ξ^0	uss	0	-2	1315
Ξ^-	dss	-1	-2	1321

b)

Résonance baryon	Quarks	Étrangeté	mc^2 (MeV)
Δ^-	ddd	0	1232
Σ^{*+}	dds	-1	1380
Ξ^{*-}	dss	-2	1530
Ω^-	sss	-3	1670

Fig. 24 a) Baryons de spin 1/2. b) Baryons de spin 3/2.

$\pi^+ \uparrow \downarrow$ $u \bar{d}$	$\rho^+ \uparrow \uparrow$ $u \bar{d}$
$\eta_c \uparrow \downarrow$ $c \bar{c}$	$\psi \uparrow \uparrow$ $c \bar{c}$

Fig. 25 Spins des mésons fabriqués à partir de quarks. Les spins des quarks u et d s'additionnent, formant un ρ chargé positivement, ou s'annulent, formant un π chargé positivement. Des combinaisons similaires se produisent pour tout mélange de saveurs u , d ou s avec n'importe lequel de leurs antiquarks homologues. Cette image s'étend aux saveurs charme, bas et haut. Parmi les nombreuses combinaisons possibles, nous illustrons le « psi » (ψ), où les spins s'additionnent pour atteindre un total de 1, et son partenaire, l'« eta-charme » η_c , où les spins s'annulent pour atteindre zéro.

Ces mésons composés d'un quark et d'un antiquark ont un spin total de zéro. Il existe également un ensemble où les spins du quark et de l'antiquark se combinent pour atteindre un total de 1. Dans ce cas, les membres étranges sont connus respectivement comme $K^{*+}(u\bar{s})$, $K^{*0}(d\bar{s})$, $K^{*-}(s\bar{u})$, et $K^{*0}(s\bar{d})$; les analogues des π , η , et η' sont connus comme ρ , ω , et ϕ (rho, oméga et phi).

LE QUARK CHARM

Non seulement le quark *down* a son cousin plus lourd, le quark *strange*, mais le quark *up* a lui aussi une version plus lourde : le quark *charm*. Le quark *charm* est chargé électriquement, avec une quantité $+2/3$, comme le quark *up*. Il est plus massif que le quark *up*, avec un mc^2 de ~ 1500 MeV. À tous les égards, les quarks *charm* et les quarks *up* semblent identiques.

Dans le cas des quarks *strange*, nous avons formé des baryons et des mésons *strange* qui étaient quelques centaines de MeV plus massifs que leurs homologues à saveur, le *up* et le *down*. Il en va de même pour le quark *charm*, mais en raison de sa masse plus élevée, les mésons et baryons *charm* analogues pèsent d'autant plus lourd, le plus léger se situant autour de ~ 1900 MeV, soit près de 2 GeV. C'est en partie à cause de cette masse plus importante qu'ils ne sont pas facilement produits dans les rayons cosmiques, et ce n'est qu'avec l'avènement d'expériences dédiées dans des accélérateurs de particules à haute énergie que l'existence des particules *charm*, et du quark *charm*, a été révélée dans le dernier quart du XX^e siècle.

Les quarks *charm* peuvent se lier par trois avec n'importe quelle combinaison de quarks *up*, *down* ou *strange* pour former des baryons *charm*, ou même avec à la fois du charme

et de l'étrangeté. Quelques exemples ont même été observés où deux quarks *charm* se sont associés à un quark *up*, *down* ou *strange*. Nous pensons que trois quarks *charm* peuvent s'unir pour former un baryon avec trois unités *charm*, mais nous attendons toujours une preuve claire de son existence.

Un quark *charm* peut se lier à un antiquark unique qui peut être n'importe lequel des (anti)-quark *up*, *down* ou *strange*. Les exemples les plus connus, cependant, sont ceux où un quark *charm* s'unit à un antiquark *charm*, *cc*, conduisant à un autre partenaire électriquement neutre, s'ajoutant au pion et à l'eta, faits de $u\bar{u}$, $d\bar{d}$ ou $s\bar{s}$ que nous avons déjà rencontrés. L'« eta-c » qui en résulte, η_c , a une masse légèrement inférieure à 3 000 MeV, 3 GeV, et constitue à ce titre l'exemple le plus léger de toute une spectroscopie connue sous le nom de « charmonium »¹⁷.

$\uparrow \uparrow$	nom	masse (GeV)
$u \bar{u}$	ρ^0, ω	0,8
$d \bar{d}$		
$s \bar{s}$	ϕ	1,0
$c \bar{c}$	ψ	3,1
$b \bar{b}$	Υ	9,5
$t \bar{t}$	?	370,0 (?)

Fig. 26 ► Mésons de spin 1 qui peuvent être produits facilement dans l'annihilation e^+e^- . En outre, un photon ou un Z^0 , qui ne sont pas fabriqués à partir de quarks, peuvent être produits de cette manière. Un analogue tt^* à environ 370 GeV ne se produit probablement pas, car le quark supérieur et l'antiquark se désintègrent avant de pouvoir se lier l'un à l'autre.

17. NDT. Un **quarkonium** est un méson comprenant un quark et un anti-quark. En règle générale, on nomme quarkoniums (ou quarkonia) uniquement les mésons formés d'une paire *charm/anticharm* ou d'une paire *bottom/antibottom*. Les premiers sont aussi appelés **charmoniums**, et les seconds des **bottomoniums**.

La propriété de charme a été découverte pour la première fois grâce au charmonium. L' η_c est formé lorsque le c et $\bar{c}$, chacun ayant un spin $1/2$, couplent leurs spins pour obtenir un total de zéro (voir la figure 25). Ils peuvent également coupler leurs spins pour obtenir une valeur totale de 1 ; cela forme un état légèrement plus lourd à 3,1 GeV, connu sous le nom de ψ . Lorsqu'un électron et un positron se rencontrent et s'annihilent, ils le font plus facilement lorsque leurs spins sont corrélés pour donner le spin 1. Dans une telle réaction, l'énergie et la quantité de spin sont conservées ; cela a pour effet que, si l'énergie combinée de l'électron et du positron correspond au mc^2 d'un méson de spin 1, composé d'un quark et de son antiquark (donc électriquement neutre), ce méson sera produit à partir de l'énergie laissée par l'annihilation de l'électron et du positron. Par exemple, si un électron et un positron entrent en collision frontale avec une énergie combinée d'environ 0,8 GeV, ce qui correspond à la masse du spin-un ρ et ω , l'un ou l'autre de ces mésons peut être formé ; vers 1 GeV apparaît le méson analogue constitué de $s\bar{s}$, à savoir le ϕ ; et à 3,1 GeV, nous rencontrons $c\bar{c}$, d'où un ψ peut être formé. C'est ainsi que ce premier exemple de charmonium a été trouvé en 1974, et que le spectre des particules a été progressivement découvert.

Les particules dotées de charme ou d'étrangeté ne sont pas stables. Leurs masses sont plus importantes que celles des baryons ou mésons sans charme ni étrangeté, et donc leur énergie intrinsèque, représentée par mc^2 , est plus grande. Ainsi, bien que les particules *strange* et *charm* puissent être produites dans des collisions à haute énergie dans des accélérateurs, ou même dans les énergies extrêmes qui prévalaient immédiatement après le Big Bang, elles se désintègrent rapidement, laissant finalement des quarks *up* et *down* dans les baryons « conventionnels », qui survivent dans notre monde quotidien ; les mésons se détruisent alors en raison

de l'annihilation des quarks et des antiquarks, produisant des photons ou des électrons et des neutrinos en tant que produits finaux stables.

LES QUARKS BOTTOM ET TOP

Nous avons vu plus haut comment la nature a dupliqué ses saveurs de quark de base en créant une deuxième série, le *strange* et le *charm*, avec les mêmes charges électriques mais une masse plus importante que leurs cousins *bottom* et *top*. On peut se demander pourquoi. L'histoire ne s'arrête pas là : la nature a eu recours à une troisième série de quarks encore plus massifs, avec les mêmes charges électriques que les précédents. Ainsi, nous avons le quark *bottom* (*b*), $mc^2 \sim 4,5 \text{ GeV}$, charge électrique $-1/3$; et il y a le quark *top* (*t*), $mc^2 \sim 180 \text{ GeV}$ (cette valeur n'est pas une coquille !), charge électrique $+2/3$. L'un des grands mystères pour notre XXI^e siècle est de comprendre comment la nature a pu concentrer une telle masse, comparable à celle d'un atome d'or entier, dans un espace de 10^{-18} m au maximum. Dans certains articles, ces attributs sont appelés « truth » et « beauty » au lieu de « top » et « bottom » ; ce sont ces derniers qui font aujourd'hui l'objet d'un consensus assez général, et c'est pourquoi je me référerai systématiquement à *top* et *bottom*.

Les baryons et mésons contenant des quarks ou antiquarks bas existent et sont en fait des analogues plus lourds à ceux contenant le quark étrange plus léger de même charge. Les mésons *bottom* les plus légers ont une masse, ou mc^2 , d'environ 5 GeV. Il existe également des baryons *bottom*. Il n'y a pas grand-chose à gagner à écrire toutes leurs caractéristiques ; cependant, si vous voulez le faire, regardez le tableau des particules *strange*, remplacez *s* par *b* et ajoutez une masse d'environ 4,5 GeV pour chaque quark ou antiquark *b*, et vous aurez ce qu'il vous faut. Les mésons de fond

se sont révélés intéressants dans la mesure où leur comportement peut fournir des indices sur la raison pour laquelle l'Univers est constitué de matière et exclut l'antimatière. Il existe également une spectroscopie des états du « bottomonium » analogue à la spectroscopie du charmonium ; le bottomonium est constitué de $b\bar{b}$, l'exemple le plus léger ayant une masse d'environ 9,5 GeV.

À ce stade, on pourrait s'attendre à l'apparition de mésons et de baryons contenant des quarks supérieurs, avec des propriétés analogues à celles des particules *charm* (puisque le *top* et le *charm* ont la même charge), et à ce que leur principale caractéristique soit d'être près de 200 GeV plus massifs que leurs homologues charmés. Cependant, il n'existe aucune preuve de l'existence de ces états. Le problème est que le quark *top*, étant si massif, est si instable qu'il se désintègre en moins de 10^{-25} s. Un signal voyageant à la vitesse de la lumière ne peut couvrir qu'environ 1/100 fm dans ce laps de temps, ce qui est trop peu pour saisir d'autres quarks ou antiquarks afin de former les états liés que nous appelons mésons et baryons.

La désintégration se produit par un processus analogue à celui connu dans la désintégration radioactive (bêta). Lorsqu'un neutron se transforme en proton, un quark *down* se transforme en quark *up* (plus léger), émettant de l'énergie sous la forme d'un électron et d'un neutrino (techniquement, un antineutrino) :

$$d \rightarrow u(e^+\bar{\nu})$$

Les quarks plus lourds imitent donc ce phénomène. La différence entre les charges électriques des quarks est soit nulle, soit de ± 1 . Dans ce dernier cas, une désintégration peut se produire du plus lourd vers le plus léger en émettant respectivement un électron ou un positron (ainsi qu'un

neutrino ou un antineutrino). On peut donc avoir une cascade de désintégrations :

$$t \rightarrow b(e^+\nu) ; b \rightarrow c(e^-\bar{\nu}) ; c \rightarrow s(e^+\nu) ; s \rightarrow u(e^-\bar{\nu})$$

Et à la dernière étape, il peut rester une particule stable, comme un proton. Il est possible, quoique moins probable, qu'une chaîne de désintégration manque une étape, par $t \rightarrow d(e^+\nu)$ ou $b \rightarrow u(e^-\bar{\nu})$. Il est également très probable que le quark charmé emprunte un autre parcours : $c \rightarrow d(e^-\bar{\nu})$; $d \rightarrow u(e^+\nu)$. Les quarks d et u ont des masses tellement similaires, reflétées dans les masses similaires du neutron et du proton, que le processus $d \rightarrow u(e^-\bar{\nu})$ est lent, par exemple la demi-vie d'un neutron libre peut aller jusqu'à dix minutes. Les autres différences de masse sont plus importantes, et les processus se produisent plus rapidement, dans le cas du quark *top*, si rapidement que les mésons et baryons *top* n'ont pas le temps de se former.

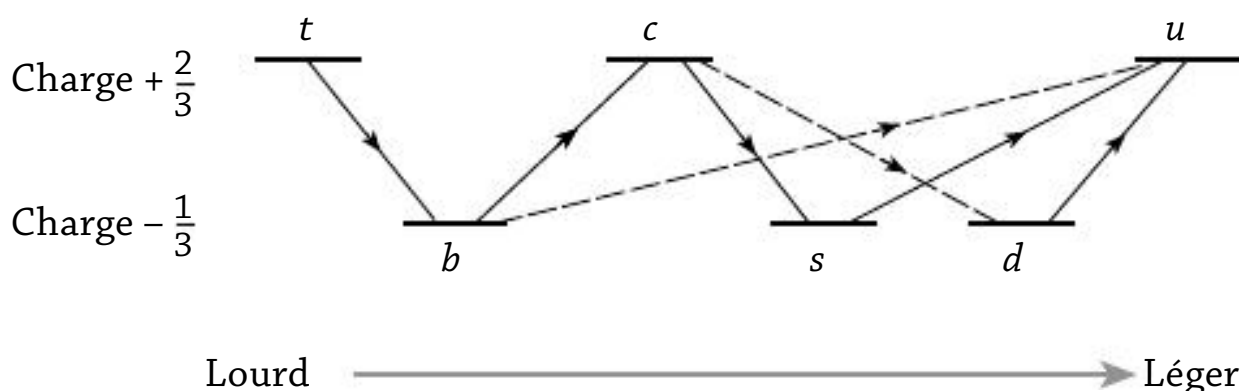


Fig. 27 ► Décroissances faibles dominantes des quarks. Chaque flèche vers le bas émet $e^+\nu$; chaque flèche vers le haut émet $e^-\bar{\nu}$. Deux trajectoires moins probables sont également représentées par des flèches en pointillé.

QUI A PU ORDONNER TOUT CELA ?

Notre monde est constitué de quarks *up* et *down*, de l'électron et d'un neutrino. Ce dernier est connu sous le nom d'« électron-neutrino », symbole ν_e pour indiquer qu'il s'agit

d'un frère ou d'une sœur de l'électron. La nature triple les quarks, avec le *charm* et le *strange*, ainsi que le *top* et le *bottom* en tant que versions plus lourdes de ces particules électriquement chargées $+2/3$ et $-1/3$. Ce n'est pas seulement avec les quarks que la nature agit de la sorte ; il existe également trois variétés de chacun des leptons.

Une version plus lourde de l'électron existe, connue sous le nom de muon, symbole μ^- . Il est chargé négativement, comme l'électron. Le muon (et son antiparticule, le μ^+) est apparemment en tous points identique aux électrons ou aux positrons, sauf qu'il est 207 fois plus massif, avec un $mc^2 \sim 105$ MeV. Dans les désintégrations faibles, le muon est accompagné d'un neutrino, mais un neutrino différent du ν_e . Nous appelons cela le muon-neutrino, symbole ν_μ (il y a bien sûr aussi un antineutrino : $\bar{\nu}_\mu$).

On trouve un troisième ensemble de leptons. Il s'agit du tau, un analogue de l'électron chargé négativement mais pesant environ 2 GeV (il est noté τ^- son antiparticule étant τ^+), et le neutrino associé (antineutrino) étant ν_τ ($\bar{\nu}_\tau$).

Les leptons semblent être fondamentaux. Le muon se couple au boson de Higgs environ 207 fois plus fortement qu'un électron, ce qui le rend plus massif. Si le muon n'était qu'un électron lourd, il pourrait se débarrasser de 206 parties de cette masse sous forme de photons, et se stabiliser en tant qu'électron. Or, aucun signe de cette transition n'a jamais été observé. Il semble qu'il y ait quelque chose d'intrinsèque au muon et à l'électron qui doit être préservé. Il s'agit de la propriété que nous appelons « saveur » ; elle a une origine empirique remarquable, mais nous ne comprenons pas ce qui la sous-tend.

En avril 2021, le moment magnétique du muon a été mesuré au Fermilab avec une précision de dix décimales. À ce niveau de précision, il semble y avoir un désaccord entre

l'expérience et la théorie, mais pas encore à un niveau permettant de parler de découverte. Si ce désaccord persiste, il pourrait s'agir d'un indice de particules massives virtuelles perturbant le vide et/ou de forces supplémentaires, ultra-faibles aux énergies actuelles, affectant le magnétisme du muon.

LES NEUTRINOS

Dans le modèle standard, les neutrinos sont supposés ne pas avoir de masse. Historiquement, cela s'explique par le fait que personne n'a jamais été à même de mesurer la valeur d'une masse dont la valeur est si minuscule qu'elle pourrait bien être nulle. Cependant, aucun principe fondamental n'exige que les neutrinos soient sans masse. En effet, nous savons aujourd'hui que les neutrinos ont une masse, extrêmement faible comparée à la masse de l'électron, néanmoins non nulle.

Il existe trois variétés connues de neutrinos, le neutrino électronique, le neutrino-muon et le neutrino-tau, tous trois nommés en fonction de leur affinité à être produits de concert avec la particule chargée électriquement qui partage leur nom – les leptons électron (e), mu (μ) et tau (τ). Je les appellerai respectivement *nu-e*, *nu-mu* et *nu-tau*. Ils sont traditionnellement désignés par le symbole grec pour nu et l'indice approprié, donc ν_e , ν_μ ou ν_τ . Les réactions de fusion au cœur du Soleil émettent des neutrinos de type *nu-e* (ν_e).

Lorsqu'ils interagissent avec la matière et convertissent les neutrons en protons, par exemple, ils se transforment en e , μ et τ . Pendant de nombreuses années, on a pensé que c'était totalement vrai, mais aujourd'hui nous savons qu'il existe une faible probabilité qu'un neutrino produit en tant que ν_e se retrouve en tant que ν_μ ou ν_τ . Cela est dû à un

phénomène connu sous le nom d'oscillations des neutrinos et indique que les neutrinos ont une masse, certes minuscule, mais non nulle.

En mécanique quantique, les particules ont un caractère ondulatoire. De même que les oscillations du champ électromagnétique peuvent revêtir les caractéristiques d'une particule – les photons –, les particules telles que les neutrinos ont des oscillations ondulatoires lorsqu'elles se déplacent dans l'espace. Il s'agit en fait d'une onde de probabilité variable. Ce qui est parti comme un *nu-e* variera en probabilité au cours de son voyage, passant de *nu-e* à *nu-mu* ou *nu-tau* au fur et à mesure qu'il s'éloigne de la source. Cependant, pour que cela se produise, les neutrinos doivent avoir des masses différentes, ce qui implique qu'ils ne peuvent pas tous être sans masse.

Si les neutrinos physiques sont un mélange de deux ou plusieurs états quantiques sous-jacents de masses différentes, alors, pour une énergie donnée, les ondes quantiques de ces états sous-jacents auront des fréquences différentes et se gonfleront l'une l'autre en se rencontrant. Plus leur différence de masse est faible, plus leurs fréquences sont semblables ; plus leur oscillation est lente et plus la distance nécessaire pour qu'un effet soit détectable est grande (voir figure 28).

Les masses des neutrinos étant elles-mêmes très faibles, toute différence doit également être minime et les longueurs d'oscillation importantes. Les premiers indices sont apparus à la fin des années 1960 avec la détection de neutrinos provenant du Soleil. Les processus de fusion dans le Soleil produisent des ν_e . Pendant plusieurs décennies, l'intensité des *nu-e* provenant du Soleil a été mesurée. Compte tenu de notre connaissance du fonctionnement du Soleil, il était possible de calculer le nombre de ν_e qu'il produisait et donc leur

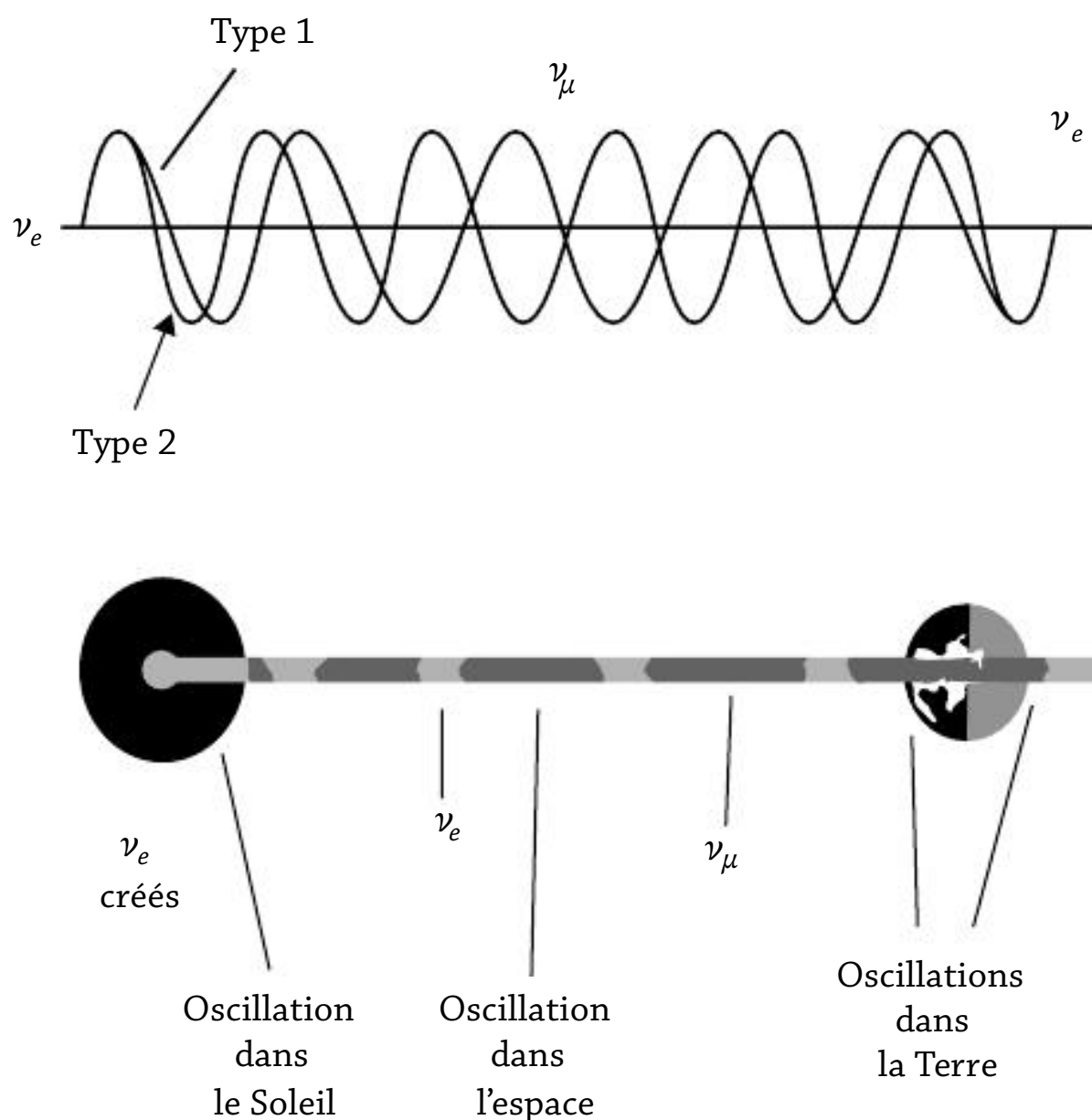


Fig. 28 ► Oscillations des neutrinos. (a) La figure du haut montre un ν_e composé de deux états de masse $\nu_{1,2}$, qui oscillent à des rythmes différents. Lorsqu'ils sont déphasés, comme dans cet exemple, cela correspond au fait que seul le ν_μ est présent, le ν_e ayant disparu. (b) Dans la figure du bas, un ν_e formé dans le Soleil peut osciller d'avant en arrière au cours de sa traversée dans le Soleil, dans l'espace et même dans la Terre (la nuit). Une comparaison de l'intensité des ν_e le jour et la nuit peut révéler l'effet de leur passage à travers la Terre.

intensité lorsqu'ils atteignaient la Terre. Cependant, lorsque les mesures ont été effectuées, l'intensité des ν_e arrivant sur Terre s'est avérée environ trois fois inférieure à ce qui était attendu. C'était le premier indice que les ν_e pouvaient avoir une masse et se transformer en d'autres variétés de neutrinos chemin faisant.

Des anomalies ont également été observées dans le mélange de ν_e et de ν_μ produit lorsque les rayons cosmiques frappent des atomes dans la haute atmosphère. Ces collisions produisent une cascade de particules secondaires qui aboutissent finalement à une pluie de neutrinos au niveau du sol, et même sous le sol. D'après l'expérience du contenu des rayons cosmiques et des produits de leurs collisions dans la haute atmosphère, il a été calculé qu'il devrait y avoir deux fois plus de ν_μ que de ν_e . Cependant, les expériences ont révélé un déficit important de ν_μ . Les neutrinos provenant du Soleil avaient parcouru 150 millions de kilomètres et ceux des expériences sur les rayons cosmiques jusqu'à 10 000 km – certains ayant même été produits à l'autre bout du globe et ayant traversé le centre de la planète avant d'être détectés. Les données démontrent la propension des oscillations en cours de route et la « disparition » des ν_e et ν_μ , respectivement.

Les oscillations des neutrinos solaires ont été confirmées par l'Observatoire de neutrinos de Sudbury (SNO) au Canada. L'expérience est sensible à toutes les saveurs de neutrinos (voir p. 97-99 dans le chapitre 6). Le SNO a constaté que le nombre total de neutrinos arrivant ici – les variétés d'électrons, de muons et de tau – correspond au nombre attendu sur la base des modèles de production de neutrinos dans le noyau solaire. Le SNO a également constaté que l'incidence des ν_e est d'environ 1/3 du total, ce qui confirme que le déficit est dû à la transformation en cours de route en ν_μ et ν_τ .

Le SNO a montré que ν_e avait effectivement changé, mais n'a pas déterminé en soi dans quelle variété il préférerait aller. C'est ainsi qu'ont commencé les expériences de « longue ligne de base ». Dans des accélérateurs tels que le CERN, le Fermilab ou le laboratoire KEK au Japon, des faisceaux contrôlés de neutrinos ont été créés. L'énergie, l'intensité et

la composition (principalement ν_μ) des faisceaux de neutrinos sont contrôlées à la source ; les faisceaux sont dirigés à travers le sol pour être détectés à plusieurs centaines de kilomètres de là, dans un laboratoire souterrain éloigné.

En comparant la composition du faisceau qui arrive avec celui qui est parti, il devient possible de déterminer quelles saveurs oscillent vers quoi, et à quelle vitesse elles le font. À partir de là, nous pouvons déduire, en les calculant, des informations sur leurs masses relatives.

Des faisceaux de ν_μ , par exemple, ont été produits au Fermilab dans le cadre de l'expérience MINOS – Main Injector Neutrino Oscillation Search – qui s'est achevée en 2016. L'intensité des ν_μ a d'abord été mesurée à la source, puis à nouveau à quelques centaines de mètres, et enfin dans un grand détecteur souterrain au Minnesota, à 735 km de là. Au Japon, un faisceau de neutrinos créé au laboratoire KEK a parcouru 250 km vers l'ouest sous les Alpes japonaises jusqu'au détecteur Super-K (SuperKamiokande). En 2010, on a constaté qu'un lepton tau avait été produit par un faisceau de ν_μ au CERN, ce qui prouve qu'il existe une possibilité pour le ν_μ de se convertir en ν_τ . Aujourd'hui, l'étude des oscillations de neutrinos est devenue une science quantitative fournissant des informations sur le mélange des neutrinos et des antineutrinos.

Les données sur les oscillations donnent des mesures des tailles relatives non pas des masses des neutrinos, mais de leurs *carrés*. Ces mesures sont de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-4} eV². Les études de la désintégration bêta et d'autres mesures de précision montrent que les masses des neutrinos sont inférieures à 0,8 eV (la masse de l'électron, par exemple, est de 511 keV, soit quelque 200 000 fois plus grande !). S'il n'y avait pas de mélange, les trois masses distinctes du neutrino correspondraient directement l'une à l'autre pour ν_e , ν_μ et

ν_τ . Les données montrent que la réalité est éloignée de cela, le mélange étant important, ce qui signifie qu'un neutrino d'une masse donnée a une affinité significative pour les trois saveurs. Cette situation est résumée sur la figure 29.

Grâce à l'étude du boson Z^0 , nous savons qu'il n'existe plus de variétés de neutrinos légers dans la nature. En effet, nous pouvons mesurer la durée de vie du boson Z^0 , qui s'avère être la même que celle calculée par les théoriciens tant qu'il n'y a que trois variétés distinctes de neutrinos pouvant être produites lors de sa désintégration. Plus il y a de variétés, plus le Z^0 se désintègre rapidement, car chaque chemin disponible rend le Z^0 de plus en plus instable.

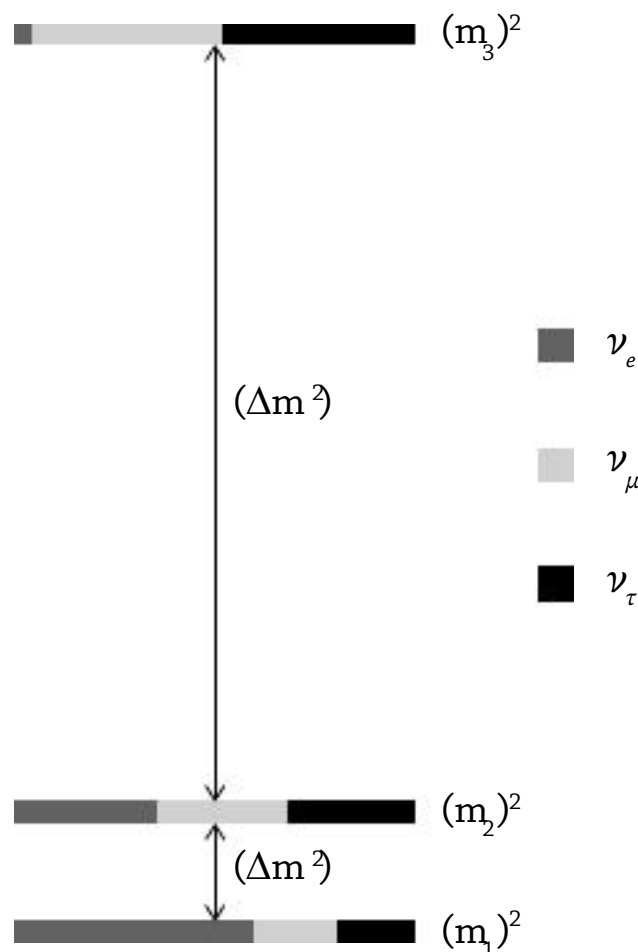


Fig. 29 ► Mélange des 3 saveurs des neutrinos. Interprétation possible des données sur le mélange des neutrinos. Deux des masses propres sont relativement proches l'un de l'autre, tandis que le troisième est déplacé. Il y a un mélange considérable des trois saveurs dans les deux états les plus légers, tandis que l'état le plus massif est un mélange presque égal de ν_μ et ν_τ avec une présence non négligeable de ν_e .

S'il y a plus de neutrinos légers, ils raccourciraient la durée de vie de Z^0 , ce qui est en désaccord avec ce qui est observé en pratique. On en déduit donc qu'il n'existe que trois variétés distinctes de neutrinos légers.

Compte tenu de ce résultat, et comme nous soupçonnons que chaque variété de neutrinos est associée à un lepton chargé négativement, et que ceux-ci sont à leur tour associés à deux variétés de quarks, les variétés $+2/3$ et $-1/3$, nous avons identifié l'ensemble complet de ces pièces de base. Chacun de ces leptons et quarks a un spin $1/2$. La nature semble donc avoir créé trois générations de particules fondamentales de spin $1/2$. Pourquoi trois ? Nous ne le savons pas. Pourquoi ne s'est-elle pas contentée d'une seule ? Là encore, nous n'avons pas de certitude, mais nous pensons que la réponse pourrait être liée à une autre énigme : pourquoi y a-t-il un déséquilibre entre la matière et l'antimatière dans l'Univers ?

Quarks	$e = +2/3$	u	c	t
	$e = -1/3$	d	s	b
Leptons	$e = -1$	e	μ	τ
	$e = 0$	ν_e	ν_μ	ν_τ

Fig. 30 Quarks et leptons. Les masses des quarks *up* et *down* sont de $\sim 2\text{-}5$ MeV et celle du *strange* de ~ 150 MeV. Lorsqu'ils sont piégés à l'intérieur des hadrons, ils gagnent de l'énergie supplémentaire et se comportent comme s'ils avaient des masses respectives de ~ 350 MeV et ~ 500 MeV. Les masses effectives des quarks plus lourds ne sont pas affectées de manière aussi spectaculaire par leur emprisonnement à l'intérieur des hadrons. Leurs masses sont de $\sim 1,5$ GeV pour le quark *charm*, $\sim 4,5$ GeV pour le quark *bottom* et ~ 180 GeV pour le quark *top*.

L'ÉNIGME DE L'ANTIMATIÈRE

L'antimatière a une aura de mystère, la promesse d'un Tweedledum¹⁸ naturel à notre Tweedledee, où la gauche est la droite, le nord est le sud et le temps s'écoule à l'envers. Sa propriété la plus célèbre est sa capacité à détruire la matière en un éclair de lumière, convertissant la matière dont nous sommes faits en énergie pure. Dans la science-fiction, les antiplanètes mènent les voyageurs à leur perte, tandis que l'antihydrogène alimente les moteurs des astrocroiseurs. En réalité, selon tout ce que des décennies de physique expérimentale nous ont appris, l'Univers nouveau-né était un chaudron d'énergie où la matière et l'antimatière ont émergé en parfait équilibre. Une question se pose alors : comment se fait-il que la matière et l'antimatière ne se soient pas immédiatement détruites dans une orgie d'annihilation mutuelle ? Comment se fait-il qu'aujourd'hui, quelque 14 milliards d'années plus tard, il reste quelque chose dans l'Univers ?

Cette énigme touche à notre existence même. Nous sommes faits de matière, comme tout ce que nous connaissons dans l'Univers. Il n'y a pas de mines d'antimatière sur Terre, et c'est tant mieux, car elles seraient détruites par la matière qui les entoure, avec des résultats catastrophiques. D'une manière ou d'une autre, quelques instants après le Big Bang, la matière a réussi à sortir victorieuse : l'antimatière a été annihilée, l'énergie thermique issue de la destruction est restée (aujourd'hui, la température se situe à 3 degrés au-dessus du zéro absolu et est connue sous le nom de

18. NDT. Dans une version cinématographique *d'Alice au pays des merveilles* (Disney, 1951), les frères Tweedledum et Tweedledee sont représentés comme deux étranges bonshommes ne pensant qu'à chanter, à jouer, et couiner comme des jouets de caoutchouc à chaque fois qu'ils se tapent l'un l'autre.

rayonnement cosmique de fond), et le surplus de matière a fini par s'agglutiner en galaxies d'étoiles. Quelque chose doit distinguer la matière de l'antimatière pour que la matière en sorte victorieuse.

La séquence d'événements qui a permis aux éléments de base de la matière d'être « cuits » dans les étoiles, pour finalement former la matière brute telle que nous la trouvons aujourd'hui, sera décrite dans le chapitre suivant. Nous abordons ici la question de la différence entre la matière et l'antimatière.

Cette question tourmente les physiciens et les cosmologistes depuis des années. Un indice essentiel est apparu en 1964 avec la découverte que la nature contient un minuscule déséquilibre, une tendance à ce que le comportement de certaines particules *strange*, telles que le K^0 électriquement neutre, ne soit pas imité exactement par la contrepartie antimatière, le $\bar{K}^0$.

La percée a eu lieu après la découverte, en 1977, des premiers exemples de particules *bottom* et la prise de conscience qu'il s'agit en fait de versions plus lourdes des particules étranges. En effet, lorsque la découverte des quarks *bottom* et *top* a confirmé que la nature avait effectivement produit trois générations de quarks et d'antiquarks, les équations résultantes semblaient étonnamment impliquer qu'une asymétrie entre la matière et l'antimatière pour les particules *bottom* était presque inévitable. La subtile asymétrie entre K^0 et $\bar{K}^0$ devait être assez importante pour leurs analogues *bottom*, les B^0 et $\bar{B}^0$. Aujourd'hui, nous savons empiriquement que c'est le cas. L'existence de trois générations, et en particulier de quarks *bottom*, pourrait-elle être la clé de l'énigme ? Comme les particules *bottom* sont abondantes dans les premiers instants de l'Univers, pourraient-elles détenir le secret de l'émergence de l'Univers déséquilibré, où la matière domine aujourd'hui ?

Nous savons aujourd'hui que la présence de trois générations de quarks ou de leptons donne mathématiquement aux particules et aux antiparticules un moyen naturel de se comporter de manière asymétrique, et que la nature exploite cette possibilité. Cependant, c'est dans le cas des quarks *bottom* lourds qu'elle le fait le plus radicalement. Il s'avère que ces derniers sont presque découplés des saveurs légères dont notre Univers plus stable est composé – dans le jargon, « les angles de mélange quantique sont petits ». Nous nous trouvons donc dans une situation alléchante : nous avons trouvé un mécanisme mathématiquement cohérent pour générer une asymétrie entre la matière et l'antimatière, que la nature ne semble pas exploiter de manière empirique.

Du moins, pas dans le cas des quarks, pour lesquels les angles de mélange sont faibles. Mais dans le cas des neutrinos, les oscillations des neutrinos montrent que les angles de mélange analogues sont grands. Il existe également des indices alléchants selon lesquels les oscillations des antineutrinos diffèrent subtilement de celles de leurs homologues neutrinos (voir chapitre 10). Étant donné que les neutrinos sont les particules de masse les plus abondantes dans l'Univers, certains pensent que les propriétés des neutrinos et des antineutrinos sont en quelque sorte la clé de l'asymétrie entre la matière et l'antimatière. L'avenir nous dira comment ou si cela se produit, mais ces particules fantomatiques suscitent un grand intérêt.

9

Mais d'où vient la matière ?

Nous existons grâce à une série de hasards heureux : le fait que le Soleil brûle son carburant à la bonne cadence (plus vite, il se serait éteint avant qu'une vie intelligente ait pu se développer ; plus lentement, il n'y aurait peut-être pas eu assez d'énergie pour la biochimie et la vie tout court) ; le fait que les protons – les graines de l'hydrogène – sont stables, ce qui permet aux étoiles de cuire les éléments chimiques essentiels à la construction de la Terre ; et le fait que les neutrons sont légèrement plus lourds que les protons, ce qui permet la radioactivité bêta, la transmutation des éléments tels que les protons de l'hydrogène en hélium, qui, à son tour, permet au Soleil de briller. Si l'un de ces éléments (ou plusieurs autres) était légèrement modifié, nous ne serions pas là.

Nous les humains – et tout ce qui nous entoure – sommes faits d'atomes. D'où viennent ces atomes ? Tout récemment (c'est-à-dire il y a 5 milliards d'années !), ils se sont formés à l'intérieur d'une étoile morte depuis longtemps, où ils ont tous été produits à partir de protons, les noyaux de l'élément atomique le plus simple, l'hydrogène. Les protons ont été formés très tôt dans l'Univers et les quarks qui les composent, ainsi que les électrons, ont été créés dès les premiers instants. Ce chapitre décrit comment la matière dont nous sommes faits est apparue.

Ce sont principalement les protons qui forment le Soleil et l'alimentent aujourd'hui. Décrivons d'abord comment le Soleil fonctionne et fournit l'énergie nécessaire à notre existence. L'hydrogène est l'atome le plus simple, où un seul électron chargé négativement entoure un proton positif central. L'hydrogène est relativement rare sur Terre (sauf lorsqu'il est piégé dans des molécules telles que l'eau, H_2O), mais dans l'Univers en général, c'est l'élément atomique le plus répandu. À des températures terrestres, les atomes peuvent survivre, mais à des températures plus élevées, au-delà de quelques milliers de degrés, les électrons ne sont plus piégés et se déplacent librement : on dit que l'atome est ionisé. C'est ce qui se passe à l'intérieur du Soleil : les électrons et les protons essaient indépendamment les uns des autres dans cet état de la matière que l'on appelle le plasma.

Les protons peuvent se heurter les uns aux autres et déclencher une série de processus nucléaires qui finissent par convertir quatre d'entre eux en noyaux de l'élément le plus simple qui soit : l'hélium. L'énergie enfermée dans un seul noyau d'hélium (son $E = mc^2$) est inférieure à celle contenue dans les quatre protons d'origine. Cette énergie « excédentaire » est libérée dans l'environnement, et une partie de cette énergie finit par fournir de la chaleur à la Terre.

Les protons doivent se toucher pour fusionner et former de l'hélium. Cela s'avère difficile, car leurs charges positives ont tendance à les repousser et à les éloigner les uns des autres. Cependant, la température de 10 millions de degrés leur donne assez d'énergie cinétique pour qu'ils parviennent à s'approcher suffisamment pour démarrer le processus de fusion. Mais c'est tout juste suffisant : 5 milliards d'années après sa naissance, chaque proton n'a qu'une chance sur deux d'avoir participé à la fusion. En d'autres termes, jusqu'à présent, le Soleil a consommé la moitié de son combustible-carburant.

Il s'agit là de la première circonstance heureuse. L'homme est l'apogée de l'évolution, et il nous a fallu la quasi-totalité de ces 5 milliards d'années pour émerger. Si le Soleil avait brûlé plus vite, il serait mort avant l'arrivée de la vie sur Terre.

Voyons donc ce qui se passe et pourquoi l'équilibre est parfait.

La première étape consiste dans la rencontre et le contact de deux protons. L'un d'eux subit une forme de désintégration radioactive, se transformant en neutron et émettant un positron (l'antiparticule de l'électron) et un neutrino. Normalement, c'est le neutron qui se désintègre, en raison de sa masse supplémentaire et de l'instabilité qui lui est associée, en un proton, un électron et un neutrino. Un proton isolé, c'est-à-dire le baryon le plus léger, est en revanche stable. Mais lorsque deux protons s'approchent, ils subissent une répulsion électrostatique, ce qui contribue à augmenter leur énergie totale, la rendant supérieure à celle d'un deutéron (un proton et un neutron liés l'un à l'autre). Par conséquent, l'un des protons peut se transformer en neutron, qui se lie ensuite à un autre proton, augmentant ainsi la stabilité. Cette désintégration du proton conduit à un neutron, un neutrino et un positron, l'antiparticule d'un électron chargée positivement.

La toute première partie du cycle de fusion solaire produit donc de l'antimatière ! Le positron est presque immédiatement détruit lorsqu'il entre en collision avec un électron dans le plasma, produisant deux photons qui sont dispersés par le plasma électriquement chargé et qui finissent par atteindre la surface du Soleil (ce qui prend plusieurs milliers d'années) ; à cet instant, leur énergie est considérablement réduite et ils contribuent à former une partie de la lumière du Soleil. Les neutrinos s'échappent du centre sans entrave et nous parviennent en quelques minutes.

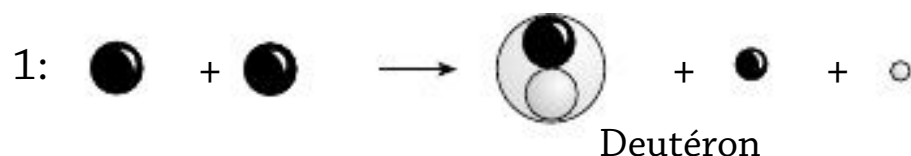
Qu'est-il advenu du neutron et du proton ? Grâce à la force nucléaire forte, ils s'agrippent l'un à l'autre et se lient : ce doublet est un noyau d'hydrogène lourd, le deuton. Ce deuton (ou deutéron) se retrouve au milieu d'un grand nombre de protons, qui forment encore l'essentiel du Soleil. Très rapidement, le deutéron se lie à un autre proton pour former un noyau d'hélium : l'hélium-3. Deux de ces hélium-3 peuvent s'unir et réarranger leurs éléments pour former un noyau d'hélium-4 (la forme commune stable), libérant ainsi deux protons supplémentaires.

Le résultat net de tout cela est que quatre protons ont produit un seul hélium, deux positrons et deux neutrinos. Les protons sont le combustible, l'hélium « la cendre » et l'énergie est libérée sous forme de rayons gamma, de positrons et de neutrinos.

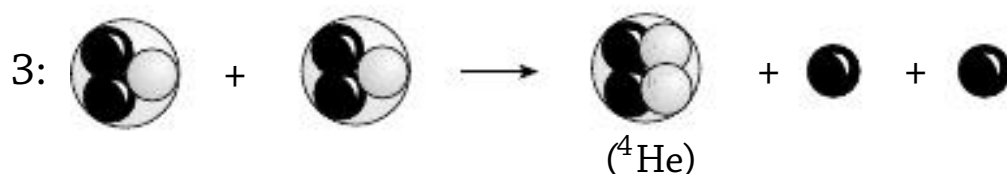
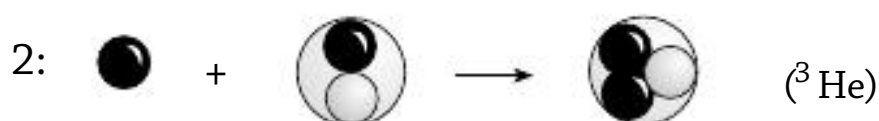
Les dernières étapes, au cours desquelles un deutéron et un proton fabriquent ${}^3\text{He}$ et conduisent ensuite à ${}^4\text{He}$, se produisent presque instantanément ; c'est la lenteur de la première étape, $p + p \rightarrow d + e^+$, contrôlant la combustion (lente) du Soleil, qui a été si importante pour nous.

La vitesse de combustion dépend de l'intensité de la force faible, qui transmute le proton en neutron (« désintégration bêta inverse »). Cette force présente des correspondances parallèles avec la force électromagnétique, décrite précédemment. La force électromagnétique est transmise par les photons, échangés entre une particule chargée électriquement et une autre. Les photons n'ont pas de masse, ce qui leur permet de se propager sur de grandes distances sans restriction liée à la conservation de l'énergie et confère donc à la force électromagnétique une longue portée. La force faible, en revanche, doit sa faiblesse (du moins comparée aux énergies caractéristiques de la Terre et du Soleil) à la masse importante du boson W et à la portée restreinte qui en découle.

Au coeur du Soleil :



-  Proton
-  Neutron
-  Positron
-  Neutrino



Résultat net

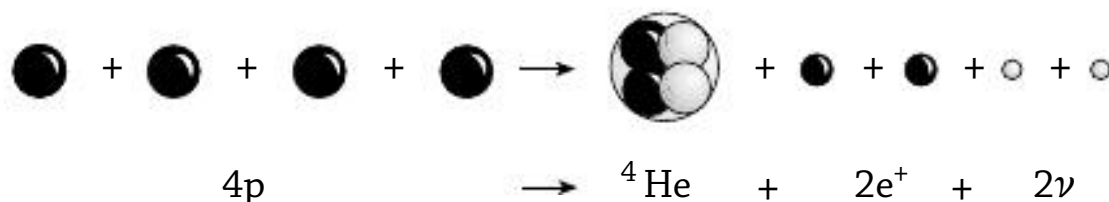


Fig. 31 Conversion de l'hydrogène en hélium dans le Soleil.

La lenteur de la combustion solaire est contrôlée par la faiblesse de la force faible, elle-même contrôlée par la masse importante du boson W. Si sa masse avait été plus petite, la force effective de la force « faible » aurait été plus forte et la combustion solaire plus rapide. Le boson W acquiert sa masse par ses interactions avec le champ de Higgs. Nous voyons donc ici une conséquence essentielle de cette dynamique : la

lenteur de la combustion du Soleil a permis à l'évolution de la vie intelligente de se produire. Nous devons notre existence contemporaine aux effets du champ de Higgs.

Il existe d'autres exemples où les masses jouent un rôle sensible dans la détermination de notre destin. Comme nous l'avons vu plus haut, la désintégration bêta implique la transformation d'un neutron en proton et l'émission d'un électron et d'un neutrino. Pour cela, le neutron doit être plus lourd que le proton, ce qui est le cas, les protons étant les germes stables des atomes et de la chimie. (Si les neutrons avaient été plus légers, ce sont les neutrons qui auraient été les éléments stables du Big Bang. Ces particules neutres auraient été incapables d'attirer les électrons pour former des atomes, de sorte que la chimie aurait été différente, voire inexistante.) Le neutron est plus lourd que le proton seulement d'une partie pour mille, mais heureusement cela suffit pour qu'un électron puisse être produit, ou en d'autres termes, la masse de l'électron est suffisamment petite pour qu'il puisse être produit dans un tel processus. Si elle avait été plus grande, la désintégration bêta et le Soleil auraient été arrêtés ; si elle avait été plus petite, la désintégration bêta aurait été plus rapide, la dynamique du Soleil différente, l'intensité de la lumière ultraviolette plus élevée et malsaine pour nous. (La masse de l'électron aide à déterminer la taille des atomes tels que l'hydrogène ; une masse plus petite correspond à un atome plus grand et vice versa. Si les choses ont la taille qu'elles ont, c'est en partie parce que la masse de l'électron est ce qu'elle est.) La raison qui sous-tend ce schéma des masses reste à découvrir.

Le Soleil brille donc grâce à la fusion nucléaire. Dans 5 milliards d'années, l'hydrogène aura disparu et se sera transformé en hélium. Déjà, une partie de l'hélium fusionne avec des protons et d'autres noyaux d'hélium pour constituer

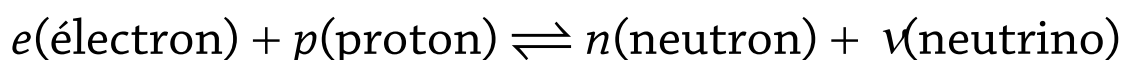
les germes nucléaires d'éléments plus lourds. Ces processus produisent également des neutrinos, dont certains ont une énergie plus élevée que ceux produits lors de la fusion primaire des protons. En détectant les neutrinos en provenance du Soleil et en mesurant leur spectre d'énergie, nous pouvons donc commencer à avoir un aperçu quantitatif de l'intérieur de notre étoile la plus proche.

D'ici cinq milliards d'années, ces processus seront les plus importants, avec la fusion pour construire des éléments encore plus lourds. Dans certaines étoiles (mais pas dans notre Soleil), ce processus se poursuit, construisant les noyaux des éléments jusqu'au fer, qui est le plus stable de tous (il y a même des éléments au-delà du fer qui sont constitués, mais ils ont tendance à être plus rares). Finalement, une telle étoile est incapable de résister à son propre poids et s'effondre de manière catastrophique. Les ondes de choc projettent de la matière et des radiations dans l'espace. C'est ce qu'on appelle une supernova. Les étoiles commencent donc par de l'hydrogène, et c'est avec ces éléments qu'elles forment le tableau périodique ; une supernova est l'agent qui pollue le cosmos avec les graines nucléaires de ces produits chimiques.

D'où vient donc la matière des étoiles primitives ?

L'UNIVERS PRIMITIF

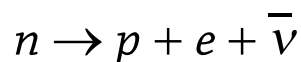
Les éléments de base de la matière nucléaire, les quarks, ont émergé du Big Bang en même temps que les électrons. L'Univers s'est rapidement refroidi, de sorte que les quarks se sont regroupés pour former les protons. Les processus suivants ont eu lieu :



La double flèche illustre le fait que ce processus peut se produire dans les deux sens. Le neutron est légèrement plus

lourd que les masses combinées d'un proton et d'un électron, de sorte que la direction « naturelle » des processus était de droite à gauche : le neutron a une tendance naturelle à abaisser la masse de l'ensemble, libérant ainsi de l'énergie par le biais de $E = mc^2$. Cependant, la chaleur de l'Univers était telle que les électrons et les protons possédaient des quantités considérables d'énergie cinétique, de sorte que leur énergie totale dépassait celle enfermée dans la masse (mc^2) d'un neutron. Ainsi, dans ces conditions de chaleur, le processus pouvait aussi bien se dérouler de gauche à droite (l'électron et le proton se convertissant en neutron et en neutrino) que dans l'autre sens, où les neutrons et les neutrinos se transformaient en leurs cousins chargés électriquement. Dans ces conditions, nous disons que l'Univers était en équilibre thermique.

Mais l'Univers se refroidissait rapidement, ce qui rendait plus difficile la poursuite de la production de neutrons. Au bout d'une microseconde, il s'est refroidi à un point tel que la réaction de production de neutrons s'est effectivement arrêtée. La réaction qui a survécu est la suivante :



Au cours de cette période, tous les neutrons qui avaient été produits au cours de la période de chaleur précédente mouraient. Toutes les 10 minutes, leur nombre diminuait de moitié (on dit qu'ils ont une « demi-vie » d'environ 10 minutes). Il n'y avait plus assez d'énergie pour les remplacer. Mais tous les neutrons ne sont pas morts, car certains ont eu la chance de tomber sur des protons, après quoi ils ont fusionné pour former un deutéron (un système lié composé d'un seul proton et d'un neutron qui est plus léger qu'un proton et un neutron isolés).

À ce stade, l'Univers dans son ensemble joue la séquence qui se déroule aujourd'hui dans le Soleil : les deutérons

et les protons construisent des noyaux d'hélium. Cette séquence s'est déroulée jusqu'à ce que tous les neutrons se soient éteints et aient disparu à jamais, ou que les particules de l'Univers en expansion soient si éloignées les unes des autres qu'elles n'interagissent plus entre elles.

Une microseconde après le Big Bang, tous les neutrinos produits lors de ces réactions étaient libres. Ils sont ainsi devenus les premiers vestiges fossiles de l'Univers. Ils se déplaçaient à grande vitesse et leur masse, bien que très faible, exerçait une attraction gravitationnelle suffisante pour qu'ils commencent à se regrouper, contribuant ainsi à la formation des galaxies. Environ un milliard de neutrinos sont produits pour chaque atome qui finit par se former. Les neutrinos sont donc parmi les particules les plus nombreuses de l'Univers. Bien que nous sachions qu'au moins l'une des variétés de neutrinos a une masse, nous ne savons pas encore quelle est cette masse. Si la masse d'un neutrino est supérieure à quelques eV, c'est-à-dire à un milliardième de celle d'un proton, les masses des neutrinos domineront la densité de masse de l'univers matériel. La détermination de la masse des neutrinos peut donc être un enjeu important pour prédire l'avenir à long terme de l'Univers. Sera-t-il en expansion permanente ou finira-t-il par s'effondrer sous son propre poids ? Nous ne le savons pas encore avec certitude.

L'Univers continue à s'étendre et à se refroidir. Les principes physiques qui déterminent son expansion sont en quelque sorte similaires à ceux qui régissent le comportement d'un gaz dans un récipient. Le taux dépend de la pression, qui dépend de la température du gaz et du nombre de neutrinos à l'intérieur du volume de gaz (la densité). Cette dernière dépend à son tour du nombre d'espèces de neutrinos.

Trois minutes après le Big Bang, l'Univers matériel se composait principalement des éléments suivants : 75 %

de protons, 24 % de noyaux d'hélium, une petite quantité de deutérons, des traces d'autres éléments légers et des électrons libres.

L'abondance de l'hélium et des éléments légers dépend du taux d'expansion de l'Univers, qui dépend lui-même du nombre d'espèces de neutrinos. La quantité d'hélium observée correspond aux prévisions s'il existe trois variétés de neutrinos. Le fait que les mesures du boson Z au CERN aient montré qu'il existe effectivement trois variétés de neutrinos légers constitue un accord remarquable entre les mesures de la physique des particules, qui reproduisent les conditions de l'Univers primitif, et ce que les cosmologistes avaient déduit de ce qui précède.

L'abondance du deutérium dépend de la densité de la matière *ordinaire* dans l'Univers (par ordinaire, nous entendons constituée de neutrons et de protons, par opposition à d'autres éléments exotiques dont les théoriciens peuvent rêver, mais pour lesquels il n'existe pas encore de preuve expérimentale directe, par exemple la supersymétrie, voir chapitre 10). Tous les chiffres concordent, à condition que la densité de la matière ordinaire soit bien inférieure à celle de la densité totale de l'Univers. C'est une partie de l'énigme de la matière noire : il y a de la matière qui ne brille pas, mais dont la gravité est ressentie par les étoiles et les galaxies. Il semble qu'une grande partie de cette matière soit constituée de matière exotique dont l'identité n'a pas encore été déterminée.

Quelque 300 000 ans plus tard, la température ambiante était tombée en dessous de 10 000 degrés, ce qui correspond à une température similaire ou inférieure à celle des régions extérieures de notre Soleil aujourd'hui. À ces énergies, les électrons chargés négativement ont enfin pu être retenus par l'attraction électrique sur les noyaux atomiques chargés

positivement et se sont combinés pour former des atomes électriquement neutres. Le rayonnement électromagnétique a été libéré et l'Univers est devenu transparent, la lumière pouvant circuler sans entrave dans l'espace.

L'Univers s'est étendu et refroidi pendant près de 14 milliards d'années jusqu'à aujourd'hui. Le rayonnement électromagnétique, autrefois brûlant, forme maintenant un spectre de corps noir dont la température effective est d'environ 3 degrés au-dessus du zéro absolu. La découverte de ce spectre par Penzias et Wilson, il y a un demi-siècle, est l'un des principaux éléments à l'appui de la théorie du Big Bang. Aujourd'hui, des mesures précises du spectre effectuées par des instruments embarqués dans des satellites révèlent de petites fluctuations dans les micro-ondes cosmiques. Celles-ci donnent des indications sur la formation de protogalaxies dans l'Univers primitif.

Nous avons donc une bonne compréhension qualitative et même quantitative de la manière dont les germes de base de la matière se sont retrouvés en vous et moi. Mais comme ils sont apparus en même temps que l'antimatière dans le Big Bang originel, une énigme subsiste : où est passée toute l'antimatière ? C'est l'une des questions dont on attend toujours la réponse.

10

Questions pour l'après-Higgs

LE CHAMP DE HIGGS

La force électrofaible est la force transmise par le familier photon de l'électromagnétisme, et par les bosons W et Z, qui sont responsables des interactions faibles qui non seulement déclenchent la combustion solaire, mais sous-tendent également certains types de radioactivité. Pourtant, si ces effets sont si étroitement liés, pourquoi apparaissent-ils si différents dans nos expériences quotidiennes, c'est-à-dire à des températures et des énergies relativement basses ? L'une des raisons est que la particule qui transmet la force électromagnétique, le photon, n'a pas de masse, alors que les bosons W et Z, qui sont associés à la force faible, ont des masses énormes et « pèsent » chacun autant qu'un atome d'argent.

Le modèle standard des particules fondamentales et des forces qui agissent entre elles explique la masse en proposant qu'elle soit due à un champ nommé d'après Peter Higgs qui, en 1964, a été l'un des premiers à reconnaître cette possibilité théorique. Le champ de Higgs imprègne

tout l'espace. S'il n'existait pas de champ de Higgs, selon la théorie, les particules fondamentales n'auraient pas de masse. Ce que nous reconnaissons comme leur masse est l'effet de l'interaction entre les particules et le champ de Higgs. Les photons n'interagissent pas avec le champ de Higgs et sont donc sans masse. Les données confirment que la masse des bosons W et Z provient du mécanisme de Higgs, tout comme les masses des quarks *top*, *bottom* et *charm*. Il est trop tôt pour déterminer si la masse des quarks plus légers et des leptons provient de ce mécanisme, bien que les données concernant les muons et les leptons tau soient compatibles avec ce mécanisme. La réponse à cette question viendra au fur et à mesure que les données s'accumuleront dans les années à venir. Les masses des protons et des neutrons, cependant, sont dominées par l'énergie cinétique des quarks qui les composent et ne sont que marginalement liées au champ de Higgs.

Tout comme les champs électromagnétiques produisent les paquets quantiques que nous appelons photons, le champ de Higgs se manifeste par des bosons de Higgs. Dans la théorie originale de Higgs, il n'y avait qu'un seul type de boson de Higgs, mais si le mécanisme de la « supersymétrie » est avéré (voir ci-après), il devrait y avoir une famille de particules de ce type.

Avec la découverte du boson de Higgs, l'image de la physique des particules est désormais complète sur le plan interne, en ce sens qu'elle est mathématiquement cohérente. Six quarks associés à six leptons, regroupés en trois paires de saveurs, interagissent par l'échange de bosons vecteurs, leurs masses provenant des interactions avec le champ de Higgs. Les théories quantiques des champs qui en résultent pour ces particules et ces forces décrivent les données avec une grande précision.

Malgré le succès de cette théorie, nous savons qu'elle ne décrit pas entièrement notre monde. L'exhaustivité interne est une exigence mathématique, alors que la description du monde qui nous entoure est une exigence de la *philosophie naturelle*. Outre l'absence d'une théorie quantique de la gravité, le modèle standard ne décrit pas la matière noire (voir ci-dessous) qui, à l'échelle cosmique, dépasse de loin la matière que nous avons identifiée et que nous avons commencé à expliquer avant l'ère de Higgs. Le mécanisme de Higgs explique comment les masses apparaissent, mais ne donne aucune idée de la raison pour laquelle elles sont telles qu'elles sont – pourquoi le quark *up* est-il plus léger que le quark *down*, ce qui fait que le proton est plus léger que le neutron, par exemple ? Il n'y a pas d'explication sur le nombre de leptons et de quarks fondamentaux, ni de réponses à des questions aussi élémentaires que : « Qu'est-ce qui fait qu'un électron est un électron ? Qu'est-ce que la saveur ? Pourquoi l'interaction faible viole-t-elle la symétrie parité-miroir ? Pourquoi le champ de Higgs agit-il de manière si discriminatoire, laissant le photon sans masse tout en donnant des masses énormes aux bosons W et Z ? » En dehors d'une réponse anthropique – nous n'existerions pas si ce n'était pas le cas –, nous n'avons pas d'explication fondamentale de cette asymétrie.

Le champ de Higgs est-il seul à l'origine de la masse des leptons, des quarks et des bosons W et Z, ou existe-t-il une autre contribution et, dans ce cas, l'identification de cette dernière pourrait-elle expliquer la nature de la saveur ? C'est un exemple de question qui nécessite des données de haute précision sur les désintégrations des bosons de Higgs, dans l'espoir de trouver un écart systématique par rapport aux attentes qui pourrait révéler des phénomènes subtils.

Nous ne savons pas non plus si les forces gravitationnelle, électrofaible et forte représentent la totalité. Il est

facile de généraliser les structures mathématiques qui sous-tendent ces théories de jauge, ce qui permet de prédire l'existence d'autres forces, mais rien ne prouve que la nature en fasse usage. Maintenant que le mécanisme de masse a été établi, il est plausible que les bosons de jauge de ces généralisations soient si massifs que les forces qui en résultent sont trop faibles pour que nous puissions encore les discerner. Toutefois, si la gravité, la force électrofaible et la force forte constituent la totalité des forces, une question se pose : pourquoi ?



Fig. 32 ❷ Peter Higgs se tenant auprès du détecteur CMS.

L'étude du boson de Higgs avec une grande précision pourrait révéler certains écarts par rapport aux attentes théoriques et ouvrir ainsi la voie vers de nouveaux progrès. Dans l'immédiat, nous devons comprendre comment les bosons de Higgs interagissent entre eux, pour finalement se condenser et former le champ de Higgs. Par analogie, nous avons besoin du champ de Higgs comme les poissons ont besoin d'eau, et notre découverte du boson de Higgs est comparable à la découverte d'une molécule de H_2O par un poisson dont l'objectif est de comprendre l'océan. Au LHC, au cours de la prochaine décennie, l'intensité accrue des faisceaux et une énergie potentiellement plus élevée augmenteront les chances de produire deux bosons de Higgs (ou plus) en un seul événement. Nous pourrions alors étudier leurs interactions mutuelles et commencer à comprendre comment se forme le champ de Higgs. S'agit-il d'un champ de base sans caractéristiques ou d'une structure plus profonde ? Nous savons que le champ de Higgs existe ; cependant, sa structure dynamique et même ce qui le compose restent un mystère.

LA MATIÈRE SOMBRE

Les protons et les noyaux des atomes ordinaires sont à l'origine de toute la « matière lumineuse » qui apparaît dans les observations astronomiques. Cependant, les mouvements des galaxies spirales, pour prendre un exemple, montrent qu'il y a plus de force gravitationnelle que la matière lumineuse observée ne peut en contenir. Jusqu'à 90 % de la matière présente n'est pas détectée. Il semble que l'Univers que nous voyons par ses rayonnements électromagnétiques soit dépassé par une mystérieuse « matière sombre », qui n'apparaît à aucune longueur d'onde dans nos télescopes.

S'il existe de grands « objets astronomiques compacts dans un halo » (MACHO, pour Massive Astrophysical Compact Halo Object), qui pourraient être des corps de la taille de Jupiter, mais pas assez gros pour devenir des étoiles brillantes ou des trous noirs, ils pourraient être détectés en créant des images doubles ou multiples de l'étoile ou de la galaxie distante par l'effet de la lentille gravitationnelle. Toutefois, les recherches de ce type n'ont pas permis de trouver suffisamment de MACHO pour expliquer la grande quantité de matière noire que l'Univers semble contenir. La détection d'ondes gravitationnelles provenant de la collision de trous noirs fournit des informations sur leur abondance et leur masse. Elles ne semblent pas non plus pouvoir expliquer la quantité et la répartition de la matière sombre. Les astrophysiciens et les cosmologistes ont dû se tourner vers la physique des particules pour trouver de nouvelles idées.

La possibilité la plus fascinante est que cette matière noire soit constituée de grandes quantités de particules subatomiques qui n'interagissent pas de manière électromagnétique (sinon nous serions capables de détecter leur rayonnement électromagnétique). Un candidat évident est le neutrino, dont la masse minuscule mais non nulle pourrait faire graviter de grands nuages de neutrinos les uns vers les autres et contribuer à la formation des galaxies.

Dans l'Univers primitif, ces neutrinos auraient été très énergétiques et se seraient déplacés à une vitesse proche de celle de la lumière. Dans le jargon, ces entités volantes sont dites « chaudes », et la simulation informatique de l'évolution des galaxies dans un univers de « matière chaude et sombre » montre que les galaxies se forment en amas denses avec de grands vides entre elles. Cependant, ce modèle informatique de l'Univers ne ressemble pas à ce que les astronomes observent dans la pratique.

L'évolution des galaxies aurait été très différente si la matière sombre était constituée de particules massives et lentes, et donc « froides ». Le problème est que de telles entités ne sont pas connues dans le modèle standard. Si c'est la réponse au problème de la matière sombre, cela soulève une autre question : quelles sont ces particules ?

L'existence de la matière sombre pourrait être le premier indice de ce qui se trouve au-delà du modèle standard. Une théorie privilégiée postule l'existence de particules « supersymétriques », dont les plus légères comprennent des formes qui ne réagissent pas aux forces électromagnétique ou forte, mais qui peuvent être des centaines de fois plus massives que le proton. Les collisions réalisées dans les accélérateurs de particules les plus énergétiques, tels que le Tevatron du Fermilab et le Grand collisionneur de hadrons du CERN, n'ont toutefois pas encore permis de mettre en évidence l'existence de telles particules. Le problème est que nous ne disposons d'aucune indication fiable sur la masse de ces particules et sur leur accessibilité au LHC. Les rayons cosmiques pourraient produire de telles « particules sombres », mais là aussi, nous n'avons pas encore de confirmation empirique.

Ce qui nous amène à la question suivante : qu'est-ce que la supersymétrie ?

LA SUPERSYMÉTRIE

Le paradoxe de la formation de la matière solide par des atomes « vides » est résolu par la mécanique quantique. C'est une propriété avec beaucoup d'implications qui découle du fait que les électrons (et les quarks, les protons et les neutrons) ont tous un spin intrinsèque qui est la moitié d'une quantité connue sous le nom de constante de Planck, h . Ces particules de « spin $1/2$ » sont génériquement connues sous

le nom de fermions. La mécanique quantique implique que deux fermions ne peuvent pas se trouver au même endroit, avec le même état de mouvement ; dans le jargon des physiciens, ils « ne peuvent pas occuper le même état quantique ». Les nombreux électrons présents dans les atomes complexes occupent donc des états spécifiques, ce qui explique l'activité chimique, ou l'inertie, des différents éléments. Il empêche également un électron d'un atome d'empiéter trop facilement sur un électron d'un atome voisin. Ce phénomène est à l'origine de nombreuses propriétés de la matière brute, telles que la solidité.

Les forces entre ces fermions sont transmises par les photons, les gluons et les bosons W et Z. Notez le mot « bosons », le terme générique désignant les particules dont le spin est nul ou un multiple entier du quantum de Planck. Rappelons que contrairement aux fermions, qui s'excluent mutuellement, les bosons ont des affinités et forment des états collectifs, comme c'est le cas pour les photons dans les faisceaux laser. L'un des objectifs du LHC est de produire des paires de bosons de Higgs à la fois. En étudiant leurs interactions mutuelles, nous pourrions peut-être déterminer comment les bosons de Higgs forment collectivement le champ de Higgs, dans lequel nous baignons.

Nous avons vu que les fermions – les quarks et les leptons – présentent une profonde unité, tout comme les bosons porteurs de force. Pourquoi les « particules de matière » sont-elles (apparemment) toutes constituées de fermions de spin $1/2$ et les forces transmises par des bosons de spin 1 ? Pourrait-il y avoir une autre symétrie entre les forces et les particules de matière, de sorte que les fermions connus soient associés à de nouveaux bosons, et les bosons connus à de nouveaux fermions, avec de nouvelles forces transmises par ces fermions ? Cela pourrait-il conduire à

une unification plus complète des particules et des forces ? Selon la théorie connue sous le nom de supersymétrie, la réponse est « oui ».

Dans la supersymétrie – ou SuSy comme on l'appelle en abrégé – il existe des familles de bosons qui jumellent les quarks et les leptons connus. Ces « superquarks » sont appelés *squarks* ; leurs homologues superleptons sont appelés *sleptons*. Si SuSy était une symétrie exacte, chaque type de lepton ou de quark aurait la même masse que son frère slepton ou squark. L'électron et le sélectron auraient la même masse l'un par rapport à l'autre ; de même, les quarks *up* et le squark *sup* pèseraient le même poids, et ainsi de suite. En réalité, les choses ne se passent pas ainsi. Le sélectron, s'il existe, a une masse bien supérieure à 100 GeV, ce qui implique qu'il serait des centaines de milliers de fois plus massif que l'électron. Des remarques similaires peuvent être faites pour tous les *sleptons* ou *squarks*.

Une remarque analogue peut également être faite à propos des superpartenaires des bosons connus. Dans la SuSy, il existe des familles de fermions qui jumellent les bosons connus. Le modèle de dénomination consiste à ajouter le suffixe « -ino » pour désigner le superfermion partenaire d'un boson standard. Il devrait donc exister un photino, un gluino, un zino et un wino. L'hypothétique graviton, porteur de la gravité, devrait avoir un partenaire, le gravitino. Là encore, si la supersymétrie était parfaite, le photino, le gluino et le gravitino seraient sans masse, comme leurs frères, le photon, le gluon et le graviton ; le wino et le zino ayant des masses de 80 et 90 GeV comme le W et le Z. Mais comme dans le cas précédent, ici encore les « inos » ont des masses bien plus importantes que leurs homologues conventionnels. Si la SuSy est avérée, il devrait y avoir un ou plusieurs analogues fermioniques du boson de Higgs, appelés « Higgsinos ».

La SuSy peut être séduisante sur le plan théorique, mais nous n'avons pas trouvé de preuve évidente de l'existence d'un seul squark ou slepton, ni d'un photino, d'un gluino, d'un wino, d'un zino ou d'un Higgsino. Leur recherche au LHC et ailleurs est devenue une priorité absolue.

quark	q	squark	$\tilde{q}$
leptons	l	sleptons	$\tilde{l}$
électron	e	sélectron	$\tilde{e}$
neutrino	ν	sneutrino	$\tilde{\nu}$
photon	γ	photino	$\tilde{\gamma}$
gluon	g	gluino	$\tilde{g}$
boson W	W	wino	$\tilde{W}$
boson Z	Z	zino	$\tilde{Z}$
boson de Higgs	H	Higgsino	$\tilde{H}$
Quelques particules et leurs superpartenaires			

Fig. 33 ❷ Résumé des particules de supersymétrie : neutrinos massifs et oscillations.

Avec un tel manque de preuves pour les superparticules, on peut se demander pourquoi les théoriciens croient en l'existence de la SuSy. Il s'avère qu'une telle symétrie est très naturelle, du moins mathématiquement, étant donné la nature de l'espace et du temps telle qu'elle est décrite dans la théorie de la relativité d'Einstein et la nature de la théorie quantique. Le modèle de superparticules qui en résulte permet de résoudre certains problèmes techniques dans la formulation actuelle de la physique des particules, en stabilisant les théories quantiques du comportement des différentes forces à haute énergie et les réponses des particules à ces forces. En bref, sans la SuSy, certaines tentatives de construction de théories unifiées conduisent à des résultats absurdes, comme le fait que certains événements pourraient

se produire avec une probabilité infinie. Cependant, les fluctuations quantiques, où les particules et les antiparticules peuvent émerger fugitivement du vide avant de disparaître à nouveau, peuvent être sensibles aux particules SuSy ainsi qu'au menu de particules connues ; en incluant les contributions SuSy, des résultats plus sensés émergent. Le fait que les résultats absurdes aient disparu encourage l'espoir que SuSy est effectivement impliqué dans le schéma de la nature. Il est bien sûr nécessaire de se débarrasser des résultats absurdes, mais nous ne savons toujours pas si les résultats raisonnables sont identiques et correspondent au comportement réel de la nature. Nous avons donc au mieux des indices indirects que SuSy est à l'œuvre, même si c'est actuellement dans les coulisses. Le défi consiste à produire des particules SuSy dans des expériences, ce qui prouverait la théorie et permettrait de la comprendre en détail grâce à l'étude des propriétés de ces particules.

SuSy pourrait être à l'origine d'une partie au moins de la matière noire qui semble dominer l'Univers matériel. D'après les mouvements des galaxies et d'autres mesures du cosmos, on peut déduire que 90 % de l'univers est constitué de matière « sombre » massive, noire dans le sens où elle ne brille pas, peut-être parce qu'elle est imperméable à la force électromagnétique. Dans le cadre de SuSy, si les superparticules les plus légères sont électriquement neutres, comme le photino ou le gluino, elles pourraient être métastables. En tant que telles, elles pourraient former des amas à grande échelle sous l'effet de leur attraction gravitationnelle mutuelle, de manière analogue à la formation initiale des étoiles que nous connaissons. Cependant, alors que les étoiles composées de particules conventionnelles et soumises aux quatre forces peuvent fusionner et émettre de la lumière, les SuSy-ino neutres ne le pourraient pas. Si des particules SuSy sont découvertes, il sera fascinant d'apprendre si les particules

neutres requises sont effectivement les plus légères et possèdent les propriétés requises. Si c'est le cas, on assistera à une très belle convergence entre le domaine de la physique des particules de haute énergie et celui de l'Univers en général.

LE PLASMA DE QUARKS ET DE GLUONS (QGP)

Si notre vision des origines de la matière est correcte, les quarks et les gluons, qui, dans l'Univers froid d'aujourd'hui, sont piégés à l'intérieur des protons et des neutrons, auraient été trop chauds pour se coller les uns aux autres dans la chaleur du Big Bang. Au lieu de cela, ils auraient existé dans une « soupe » dense et énergétique connue sous le nom de « plasma de quarks et de gluons », ou QGP en abrégé.

Ces essaims entremêlés de quarks et de gluons sont analogues à l'état de la matière connu sous le nom de plasma, tel qu'on le trouve au cœur du Soleil, qui consiste en des gaz indépendants d'électrons et de noyaux trop énergétiques pour se lier entre eux et former des atomes neutres.

Les physiciens fabriquent le QGP en faisant entrer en collision de gros noyaux atomiques à des énergies élevées, comme c'est le cas au LHC. Dans ces conditions extrêmes, les protons et les neutrons se pressent les uns contre les autres. Les noyaux « fondent » – en d'autres termes, les quarks et les gluons circulent dans le noyau au lieu de rester « gelés » dans les neutrons et les protons individuels.

Le collisionneur d'ions lourds relativistes (RHIC) du Laboratoire national de Brookhaven, aux États-Unis, est une machine spécialisée dans laquelle des faisceaux de noyaux lourds entrent en collision. Comme pour les particules plus simples, telles que les électrons et les protons, le grand avantage d'une machine à faisceaux en collision est

que toute l'énergie acquise lors de l'accélération des particules est utilisée pour la collision. Le RHIC a été supplanté en termes d'énergie par le Grand collisionneur de hadrons (le LHC) du CERN, où des ions de plomb entrent en collision à une énergie totale pouvant atteindre 1 300 TeV. À ces énergies extrêmes, proches de celles qui auraient été la règle dans l'Univers lorsqu'il était âgé de moins d'un trillionième de seconde, le QGP devrait devenir courant, de sorte que les expérimentateurs puissent étudier ses propriétés en détail.

LE MYSTÈRE DES NEUTRINOS MASSIFS ET DE L'ANTIMATIÈRE

Les expériences dites « de base » fournissent une multitude d'informations sur les énigmatiques neutrinos. La détermination du profil de leurs masses et de leur propension à osciller les uns dans les autres fournira certains des paramètres manquants du modèle standard. Nous ne savons pas pourquoi les valeurs des masses des quarks et des leptons chargés sont ce qu'elles sont. Le fait qu'elles aient ces valeurs est essentiel pour notre existence, et le comprendre constituerait donc une percée importante. La détermination des masses des neutrinos pourrait donc fournir un indice essentiel pour résoudre cette énigme.

Il reste possible qu'il existe des neutrinos plus massifs, distincts du trio de neutrinos légers. Les neutrinos « stériles » sont des leptons neutres hypothétiques qui n'interagissent que par la gravité et non par d'autres forces dans le modèle standard. Si les neutrinos stériles existent et que leur masse est inférieure à l'énergie des particules dans l'expérience, ils peuvent être produits en laboratoire, soit par mélange quantique entre des neutrinos « actifs » conventionnels et des neutrinos stériles, soit dans des collisions de particules à

haute énergie. En 2018, l'expérience MiniBOONE au Fermilab a rapporté un signal d'oscillation de neutrinos plus fort que prévu, ce qui a suscité l'excitation quant à la possibilité d'un rôle joué par les neutrinos stériles. Cependant, en 2021, les résultats d'une expérience améliorée, connue sous le nom de MicroBOONE, n'ont montré aucune preuve de l'existence de neutrinos stériles. Cette question reste un domaine de recherche actif.

La masse des neutrinos pourrait également avoir un impact sur la cosmologie. Les neutrinos massifs pourraient avoir joué un rôle dans la formation des galaxies ; ils pourraient contribuer à expliquer la nature de la matière sombre qui imprègne l'Univers ; et l'énigme de la violation de la parité, la symétrie miroir, par l'interaction faible n'est toujours pas résolue. Les neutrinos constituent une entrée spéciale pour sonder l'interaction faible, et l'étude approfondie de leurs propriétés pourrait conduire à des découvertes inattendues.

Il existe également des spéculations théoriques selon lesquelles les neutrinos pourraient avoir joué un rôle clé dans la création de l'asymétrie à grande échelle entre la matière et l'antimatière dans l'Univers. Cette énigme est devenue de plus en plus séduisante depuis la découverte initiale de la violation de CP¹⁹ – en fait une différence entre la matière et l'antimatière – dans les particules *strange* observée en 1964. Il semble que nous habitions un volume de matière d'au moins 120 millions d'années-lumière de diamètre. Sur la base du

19. NDT. La **violation de CP** est une violation de la **symétrie CP**, c'est-à-dire de la combinaison de la symétrie C (conjugaison des charges) et de la symétrie P (de parité). La symétrie CP indique que les lois de la physique devraient être les mêmes si une particule est échangée avec son antiparticule (symétrie C) tandis que ses coordonnées spatiales sont inversées (symétrie P, ou « miroir »).

comportement des particules *strange* et, plus récemment, de leurs analogues inférieurs, la plupart des physiciens sont favorables à l'idée qu'il existe une subtile asymétrie entre la matière et l'antimatière à grande échelle et que, peu après le Big Bang, cette asymétrie a fait pencher la balance en faveur d'un Univers dominé par la matière.

Le défi consiste maintenant à étudier ces différences en détail afin d'identifier leur origine et, peut-être, la source de l'asymétrie entre la matière et l'antimatière dans le cosmos.

Rappelons que les kaons sont constitués d'un quark et d'un antiquark et qu'ils sont donc un mélange égal de matière et d'antimatière. Le kaon neutre (K^0) est constitué d'un quark descendant et d'un antiquark étrange, tandis que son antiparticule est constituée d'un antiquark descendant et d'un quark étrange. K^0 et $\bar{K}^0$ sont donc des particules différentes, mais elles sont intimement liées par la force faible qui, de manière assez surprenante, permet à un K^0 de se transformer en $\bar{K}^0$ et vice versa, par le biais d'interactions entre leurs quarks et antiquarks. Cet effet signifie qu'une fois qu'un kaon neutre ou un antikaon neutre est créé, un certain « mélange » mécanique quantique commence à se produire.

Ces mélanges intermédiaires sont appelés K_S (S pour « court [*short*] ») et K_L (L pour « long »). Le *K-long* vit environ 600 fois plus longtemps que le *K-court*. Ce qui est important, c'est que les états *K-long* et *K-court* se comportent différemment dans les « miroirs » combinés de CP. Les deux états se désintègrent de manière différente, le *K-court* en deux pions, le *K-long* en trois pions. Si la symétrie CP était parfaite, ce schéma de désintégration serait toujours vrai. Le *K-long*, par exemple, ne se décomposerait jamais en deux pions. Cependant, comme Cronin, Fitch et leurs collègues l'ont observé pour la première fois en 1964, dans environ 0,3 % des cas, le *K-long* se désintègre en deux pions.

Avec la découverte des quarks *bottom* à la fin des années 1970, les théoriciens ont réalisé que la présence de trois générations pouvait naturellement conduire à une asymétrie entre la matière et l'antimatière, comme indiqué dans le chapitre 8. La théorie prédit que la violation de CP devrait être un effet important dans le cas des mésons B, qui sont similaires aux kaons mais dont le quark *strange* est remplacé par un quark *bottom*. Cela a été confirmé par des expériences menées dans des « usines B » personnalisées et par le détecteur LHCb du CERN. Cependant, cela ne semble pas expliquer la grande asymétrie observée pour la matière brute composée de quarks *up* et *down*.

La découverte de l'existence de trois saveurs de neutrinos massifs conduit les théoriciens à se demander si trois générations de leptons n'auraient pas été à l'origine de l'asymétrie empirique. Cette hypothèse a gagné en crédibilité après la découverte que les neutrinos semblent plus susceptibles d'osciller que les antineutrinos et que le mélange est plus prononcé que pour les quarks, comme mentionné dans le chapitre 8.

Depuis 2010, les neutrinos-mu et les antineutrinos-mu produits à Tokai, au Japon, sont envoyés à 295 km de Kamioka, l'observatoire souterrain de neutrinos. Cette expérience est connue sous le nom de « T2K ». Une différence possible dans les taux d'oscillation des neutrinos et des antineutrinos a été remarquée pour la première fois en 2016. En 2020, l'importance de cette différence s'est accrue. Si les données sont correctes, elles suggèrent que le mélange des neutrinos est aussi important qu'il est théoriquement possible. Des expériences plus sensibles sont en cours de conception pour vérifier si c'est bien le cas.

Si cette hypothèse est confirmée, il s'agira d'une découverte intéressante en soi. La possibilité qu'elle soit liée à l'asymétrie à grande échelle de la matière de l'Univers est

encore plus excitante. Il s'ensuivrait qu'il existe des neutrinos superlourds qui accompagnent le trio léger actuellement connu, et qu'ils présentent eux aussi une asymétrie analogue à celle de leurs cousins plus légers. Voici pourquoi.

S'il y a des neutrinos lourds, leur désintégration engendrera des quarks et des antiquarks légers de toutes sortes. Ceux-ci descendent à leur tour en cascade pour laisser les germes stables de la matière conventionnelle et, potentiellement, de l'antimatière. Toutefois, si les neutres massifs présentent une asymétrie analogue à celle de leurs cousins légers, leur désintégration entraînera une asymétrie dans le nombre de quarks et d'antiquarks. Il est donc possible que nous ayons identifié une voie pour comprendre l'énigme de l'antimatière. Il faut pour cela établir une asymétrie entre les neutrinos et les antineutrinos, trouver des cousins neutres massifs de ces fermions et établir qu'ils présentent eux aussi une asymétrie. L'avenir nous dira si tout cela est vrai. Établir une différence entre les taux d'oscillation des neutrinos et des antineutrinos devrait être possible d'ici quelques années. La découverte de neutrinos massifs, s'ils existent, pourrait survenir à tout moment, ou pas du tout. S'ils sont découverts, cela fera l'objet d'une grande annonce médiatique. Si rien n'est dit à leur sujet, on peut supposer qu'ils n'ont pas encore été découverts. Une fois qu'ils auront été découverts, l'attention se portera sur l'étude de leurs propriétés de désintégration pour voir si la matière est privilégiée par rapport à l'antimatière. Cela pourrait prendre de nombreuses années et devenir un axe majeur de la recherche en physique des particules.

SCIENCE-FICTION OU SCIENCE-RÉALITÉ ?

Nous arrivons maintenant au plus étrange. Selon certaines tentatives d'élaboration d'une théorie quantique de la gravité, les trois dimensions de l'espace et celle du temps pourraient

n'être qu'une partie d'un univers plus profond. Si c'est le cas, il existe des dimensions qui échappent à la perception de nos sens habituels, mais qui pourraient être révélées par le LHC.

Pour mieux comprendre, imaginons un univers perçu par des « habitants de plans » qui ne connaissent que deux dimensions. Nous, avec notre plus grande conscience, en connaissons une troisième. Nous pouvons donc imaginer deux plaques plates séparées par, disons, un millimètre. Les effets des forces qui agissent dans les deux dimensions d'une plaque pourraient s'infiltrer dans la troisième dimension. Une fraction de cette fuite traversera l'espace et sera ressentie par les habitants de la plaque adjacente. Ils ne percevraient que les effets résiduels, faibles par rapport aux effets fondamentaux dont ils feraient l'expérience s'ils n'étaient pas limités à l'univers plat qu'ils connaissent.

Imaginons maintenant que nous soyons des « plats habitants » dans un univers aux dimensions supérieures. L'idée est que la gravité nous paraît faible parce qu'elle est l'effet des autres forces qui s'échappent dans les dimensions supérieures de notre Univers. Ainsi, lorsque nous ressentons la gravité, nous ressentons l'effet des autres forces unifiées qui ont fui vers les dimensions supérieures, ne laissant qu'un maigre vestige pour faire son travail. On pourrait même imaginer que des particules se déplacent de nos dimensions « plates » vers les dimensions supérieures et « disparaissent » de l'Univers tel que nous le connaissons.

Lors des expériences menées au LHC du CERN, les physiciens sont à l'affût de signes d'apparition ou de disparition « spontanées » de particules. Si un tel phénomène se produisait de manière systématique, il pourrait prouver que nous sommes bel et bien des « plats habitants » et qu'il existe des dimensions dans la nature au-delà des trois espaces et du temps que nous connaissons actuellement.

Nous avons atteint un point où il commence à être difficile de distinguer les faits scientifiques de la science-fiction. Mais il y a un siècle, une grande partie de ce que nous tenons pour acquis aujourd'hui aurait dépassé l'imagination de H.G. Wells. Dans cent ans, les manuels scientifiques contiendront des éléments encore insoupçonnés. Il y a une cinquantaine d'années, j'ai lu un livre qui racontait les merveilles de l'atome telles qu'elles étaient révélées à l'époque, et les particules *strange* qui apparaissaient dans les rayons cosmiques. Aujourd'hui, je vous en parle. Peut-être que dans un autre demi-siècle, certains d'entre vous mettront à jour l'histoire pour eux-mêmes. Je vous souhaite bonne chance.



Lectures supplémentaires

Les suggestions de lectures supplémentaires suivantes n'ont pas pour but de constituer un guide complet de la littérature qui existe sur la physique des particules.

Cette section comprend quelques « ouvrages classiques » aujourd'hui épuisés, mais qui devraient être disponibles dans de bonnes bibliothèques ou librairies d'occasion, sur le terrain ou sur Internet (par exemple à l'adresse : www.abebooks.com).

Sean Carroll (2013), *The Particle at the End of the Universe*. One World. Un exposé pédagogique populaire sur le modèle standard et le rôle du boson de Higgs.

Frank Close (2000), *Lucifer's Legacy*. Oxford University Press. Une introduction intéressante à la signification de l'asymétrie en physique des particules et dans la nature.

Frank Close (2007), *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe*. Taylor and Francis. Un compte rendu de la physique des particules au XX^e siècle pour le lecteur grand public.

Frank Close (2012), *Neutrino*. Oxford University Press. L'histoire du neutrino, centrée sur la quête de Ray Davis pour trouver des neutrinos solaires.

Frank Close (2015), *Nuclear Physics - A Very Short Introduction*. Oxford University Press. Volume complémentaire à celui-ci, mais axé sur la physique nucléaire, y compris certains aspects de la physique des particules.

Frank Close (2018), *Antimatter*. Oxford University Press. La signification, la découverte et l'application de l'antimatière, ainsi qu'un recueil de faits et de fictions.

Frank Close (2022), *Elusive*. Allen Lane. Une biographie de Peter Higgs et de la quête de son insaisissable boson.

Frank Close, Michael Marten, et Christine Sutton (2003), *The Particle Odyssey*. Oxford University Press. Un voyage populaire bien illustré à travers la physique nucléaire et la physique des particules du XX^e siècle, avec des images de traînées de bulles de particules, d'expériences et de scientifiques.

Graham Farmelo (2009), *The Strangest Man*. Faber and Faber. Biographie primée de Paul Dirac, accompagnée d'une introduction pédagogique à l'électrodynamique quantique.

Gordon Fraser (ed.) (1998), *The Particle Century*. Institute of Physics. Les progrès de la physique des particules au cours du XX^e siècle.

Brian Greene (1999), *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory*. Jonathan Cape. Une introduction primée aux « supercordes » de la physique théorique moderne des particules.

Tony Hey et Patrick Walters (1987), *The Quantum Universe*. Cambridge University Press. Introduction à la physique des particules et à la théorie quantique.

George Johnson (2000), *Strange Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-century Physics*. Jonathan Cape. Une biographie de Murray Gell-Mann, le « père » des quarks.

Gordon Kane (1996), *The Particle Garden: Our Universe as Understood by Particle Physicists*, éd. Perseus Books. Une introduction à la physique des particules et un aperçu de son évolution.

Robert Weber (1980), *Pioneers of Science*. Institute of Physics. Brèves biographies des lauréats du prix Nobel de physique de 1901 à 1979.

Steven Weinberg (1993), *Dreams of a Final Theory*. Pantheon Books, 1992. Ouvrage « classique » sur les idées modernes en physique théorique des particules.

Steven Weinberg (1993), *The First Three Minutes*. Andre Deutsch, 1977. Basic Books. Les trois premières minutes après le Big Bang, décrites de manière non technique par l'un des plus grands théoriciens du XX^e siècle.

Frank Wilczek (2015), *A Beautiful Question*. Allen Lane. Le modèle standard décrit par l'un de ses architectes.

W. S. C. Williams (1994), *Nuclear and Particle Physics*, éd. révisée d'Oxford University Press. Une première introduction technique détaillée adaptée aux étudiants de premier cycle en physique.



Glossaire

anti(particule) : version antimatière d'une particule, par exemple antiquark, antiproton.

antimatière : pour chaque variété de particules, il existe une antiparticule aux propriétés opposées, telles que le signe de la charge électrique. Lorsque la particule et l'antiparticule se rencontrent, elles peuvent s'annihiler mutuellement et produire de l'énergie.

ATLAS : *A Toroidal LHC ApparatuS* ; nom d'un détecteur installé au LHC, Genève.

atome : système *d'électrons* qui orbite autour d'un noyau ; plus petit constituant d'un élément pouvant encore être identifié comme celui-ci.

B : symbole du « méson *bottom* ».

baryon : classe de *hadron* ; il est composé de trois *quarks*.

boson : nom générique des particules dotées d'une quantité en nombre entier de *spin*, mesurée en unités de la *constante de Planck* ; les exemples incluent les porteurs de forces, tels que le photon, le gluon, les bosons *W* et *Z*, et le boson de Higgs (prédit) sans *spin*.

boson de Higgs : particule massive, découverte en 2012, qui est la source de *masse* des particules fondamentales telles que *l'électron*, les *quarks*, les *bosons W* et *Z*.

boson W : particule massive chargée électriquement, porteuse d'une forme de la *force faible* ; dans la même famille que le *boson Z*.

boson Z : particule massive électriquement neutre, porteuse d'une forme de la *force faible* ; dans la même famille que le *boson W*.

CERN : Centre européen pour la physique des particules, Genève, Suisse. L'acronyme CERN désigne le Centre européen pour la recherche nucléaire.

chambre à bulles : forme de détecteur de particules, aujourd'hui obsolète, qui révélait les trajectoires des particules chargées électriquement sous la forme de traînées de bulles sur ces trajectoires.

chambre à étincelles : dispositif permettant de révéler le passage de particules chargées électriquement.

CMS : détecteur compact à solénoïde magnétique installé au LHC, Genève.

collisionneur : accélérateur de particules dans lequel des faisceaux de particules se déplaçant dans des directions opposées se rencontrent.

conservation : si la valeur d'une propriété reste inchangée tout au long d'une réaction, on dit que la quantité est conservée.

constante de Planck (h) : une très petite quantité qui contrôle le fonctionnement de l'Univers à des distances comparables ou inférieures à la taille des atomes. Le fait qu'elle ne soit pas nulle explique en définitive pourquoi la taille d'un atome n'est pas nulle, pourquoi nous ne pouvons pas connaître simultanément la position et la vitesse d'une

particule atomique avec une précision parfaite, et pourquoi le monde quantique est si bizarre par rapport à nos expériences dans le monde en général. Le taux de *spin* d'une particule est également proportionnel à h (techniquement, aux unités entières ou demi-entières de h divisé par 2π).

couleur : nom fantaisiste donné à la propriété des *quarks* à l'origine des *forces fortes* dans la théorie QCD.

CP : combinaison de la symétrie de parité-miroir et de la symétrie de charge (particule-antiparticule).

cyclotron : l'une des premières formes d'accélérateur de particules.

désintégration bêta (radioactivité bêta) : transmutation nucléaire ou particulaire provoquée par la *force faible*, qui se traduit par l'émission d'un *neutrino* et d'un *électron* ou d'un *positron*.

$E = mc^2$ (unités d'énergie et de masse) : techniquement, l'unité MeV ou GeV est une mesure de l'énergie au repos, $E = mc^2$, d'une particule, mais il est souvent traditionnel de se référer simplement à la *masse* et d'exprimer les masses en MeV ou GeV.

électron : constituant léger de l'*atome*, chargé électriquement.

énergie cinétique : énergie d'un corps en mouvement.

étrangeté : propriété que possède toute matière contenant un *quark* ou un *antiquark strange*.

eV (électronvolt) : unité d'énergie ; quantité d'énergie que gagne un électron lorsqu'il est accéléré d'un volt.

Fermilab : Fermi National Accelerator Laboratory, situé près de Chicago, États-Unis.

fermion : nom générique d'une particule dotée d'un *spin* demi-entier, mesuré en unités de la *constante de Planck*. Les *quarks* et les *leptons* en sont des exemples.

force électrofaible : théorie unissant la force *électromagnétique* et la *force faible*.

force électromagnétique : force fondamentale, qui agit par l'intermédiaire des forces survenant entre les charges électriques et de la force magnétique.

force faible : force fondamentale, responsable de la *désintégration bêta* ; transmise par les *bosons W* ou *Z*.

force forte : force fondamentale, responsable de la liaison des *quarks* et des *antiquarks* pour former des *hadrons*, et de la préhension des *protons* et des *neutrons* dans les noyaux atomiques ; décrite par la théorie QCD.

génération : les *quarks* et les *leptons* se présentent en trois « générations ». La première génération se compose des *quarks up* et *down*, de l'*électron* et d'un *neutrino*. La deuxième génération contient les *quarks charm* et *strange*, le *muon* et un autre *neutrino*, tandis que la troisième génération, la plus massive, contient les *quarks top* et *bottom*, le *tau* et une troisième variété de *neutrinos*. Nous pensons qu'il n'existe pas d'autres exemples de telles générations.

GeV : unité d'énergie équivalant à mille millions (10^9) d'eV.

gluon : particule sans *masse* qui agrippe les *quarks* pour former des *hadrons* ; porteur des forces de la QCD (ou CDQ).

hadron : particule composée de *quarks* et/ou d'*antiquarks*, qui ressent l'*interaction forte*.

ion : atome portant une charge électrique du fait qu'il est dépourvu d'un ou plusieurs *électrons* (ion positif) ou qu'il a un excès d'*électrons* (ion négatif).

K (kaon) : variété de *méson strange*.

keV : mille eV.

LEP : Grand collisionneur électron-positron du CERN, Genève. Le LEP a été fermé en 2000 pour faire place au LHC.

lepton : particule telle que *l'électron* et le *neutrino*, qui ne ressent pas la *force forte* et a un spin $1/2$.

LHC : Grand collisionneur de hadrons [Large Hadron Accelerator] ; accélérateur au CERN, Genève.

LHCb : détecteur installé au LHC, conçu pour être sensible aux particules contenant des *quarks bottom*.

linac : abréviation de *linear accelerator* (accélérateur linéaire).

MACHO : acronyme de Massive Compact Halo Object.

masse : inertie d'une particule ou d'un corps, et mesure de la résistance à l'accélération ; notons que votre *poids* est la force que la gravité exerce sur votre *masse*, de sorte que vous avez la même *masse* sur Terre, sur la Lune ou dans l'espace, même si vous êtes en « apesanteur ».

méson : catégorie de *hadron* ; composé d'un seul *quark* et d'un *antiquark*.

MeV : un million d'eV.

meV : un millionième d'eV.

microseconde : un millionième de seconde.

molécule : amas (ou cluster) d'atomes.

moment angulaire : propriété du mouvement rotatif analogue au concept plus familier de moment cinétique dans le mouvement linéaire.

moment magnétique : quantité décrivant la réaction d'une particule à la présence d'un champ magnétique.

muon : version plus lourde de *l'électron*.

nanoseconde : un milliardième de seconde.

neutrino : particule électriquement neutre, membre de la famille des *leptons* ; il ne ressent que les forces faibles et gravitationnelles.

neutron : partenaire électriquement neutre d'un *proton* dans le noyau atomique, qui contribue à stabiliser le noyau.

parité : opération qui consiste à étudier un système ou une suite d'événements reflétés dans un miroir.

particule alpha : deux protons et deux neutrons étroitement liés ; émise lors de certaines transmutations nucléaires ; noyau d'un atome d'hélium.

particule strange : particule contenant un ou plusieurs *quarks* ou *antiquarks strange*.

photon : particule sans masse, porteuse de la force électromagnétique.

picoseconde : millionième de millionième de seconde (10^{-12} s).

pion : l'exemple le plus léger de *méson* ; composé d'un *quark* et d'un *antiquark* de saveur *up* et/ou *down*.

positron : antiparticule de l'*électron*.

proton : constituant du noyau atomique chargé électriquement.

QCD (chromodynamique quantique) : théorie de la *force forte* qui agit sur les *quarks*.

QED (électrodynamique quantique) : théorie de la *force électromagnétique*.

QFD (quantum flavour dynamics) : théorie unifiée des *forces faibles* et *électromagnétiques*.

quark bottom : exemple le plus massif de *quark* ayant une charge électrique de $-1/3$.

quark *charm* : quark de charge électrique $+ 2/3$; version lourde du quark *up* mais plus légère que le quark *top*.

quark *down* : quark le plus léger, de charge électrique $- 1/3$; constituant des *protons* et des *neutrons*.

quark *strange* : quark de charge électrique $- 1/3$, plus massif que les quarks *down* mais plus léger que le quark *bottom*.

quark *top* : le quark le plus massif ; il a une charge de $+ 2/3$.

quark *up* : quark ayant une charge électrique de $+ 2/3$; constituant des *protons* et des *neutrons*.

quarks : germes constitutifs des *protons*, des *neutrons* et des *hadrons*.

radioactivité : voir *désintégration bêta*.

rayon gamma : *photon* ; rayonnement électromagnétique de très haute énergie.

rayons cosmiques : particules et noyaux atomiques de haute énergie provenant de l'espace.

Saveur : nom générique des qualités qui distinguent les différents *quarks* (*up*, *down*, *charm*, *strange* ; *top* et *bottom*) et *leptons* (*électron*, *muon*, *tau*, *neutrinos*) ; ainsi, la saveur comprend la charge électrique et la *masse*.

SLAC : Stanford Linear Accelerator Center, Californie, États-Unis.

SNO : Observatoire de neutrinos de Sudbury, laboratoire souterrain à Sudbury, Ontario, Canada.

spin : mesure du mouvement de rotation, ou moment angulaire intrinsèque, d'une particule ; mesuré en unités de la *constante de Planck*.

Superkamiokande : détecteur souterrain de *neutrinos* et d'autres particules provenant des *rayons cosmiques*, situé au Japon.

SuSy (abrégé de « supersymétrie ») : théorie unissant *fermions* et *bosons*, dans laquelle chaque particule connue est associée à une particule à découvrir dont le *spin* diffère d'une moitié.

symétrie : si une théorie ou un processus ne change pas lorsque certaines opérations sont effectuées sur lui, on dit qu'il possède une symétrie par rapport à ces opérations. Par exemple, un cercle reste inchangé après une rotation ou une réflexion ; il possède donc une symétrie de rotation et de réflexion.

synchrotron : accélérateur circulaire moderne.

tau : version plus lourde du *muon* et de l'*électron*.

théories unifiées : tentatives d'unification des théories des *forces forte, électromagnétique et faible*, et finalement de la *gravité*.

UA1 et UA2 : détecteurs du *collisionneur* proton-antiproton du CERN, Genève, qui ont permis de découvrir les *bosons W* et *Z* en 1983.

usine B : accélérateur conçu pour produire un grand nombre de particules contenant des quarks ou des anti-quarks *bottom*.

WIMP : acronyme de Weakly Interacting Massive Particle [particule massive interagissant faiblement].

Sources et crédits des illustrations

Figure 11

Photo : Lawrence Berkeley National Laboratory. Illustration :
© Gary Hincks.

Figure 12

Courtesy of Brookhaven National Laboratory.

Figure 14

© David Parker/Science Photo Library.

Figure 15

© Goronwy Tudor Jones, University of Birmingham/Science
Photo Library.

Figure 16

© CERN/Science Photo Library.

Figure 18

© CERN.

Figure 19

© CERN/Science Photo Library.

Figure 23

© CERN/Science Photo Library.

L'éditeur et l'auteur présentent leurs excuses s'il y a d'éventuelles erreurs ou omissions dans la liste ci-dessus ; ils se feront un plaisir de rectifier dans les plus brefs délais, s'ils sont contactés à ce sujet.



Index

A

- Accélérateurs 20, 23, 29, 30, 33, 37, 43, 44, 63, 67, 68, 69, 77, 79, 81, 88, 91, 95, 104, 124, 126, 134, 158
en forme d'anneau 70, 72
linéaires 70, 76
- Angström 29
- Antibaryons 65
- Antihydrogène 64, 138
- Antimatière 32, 63, 65, 74, 82, 83, 84, 120, 128, 137, 138, 139, 143, 151, 164, 165, 167, 168, 174
- Antineutrino 60, 64, 65, 84, 112, 129, 130, 135, 140, 167
- Antineutron 64
- Antiparticules 33, 60, 63, 64, 67, 83, 104, 140, 162
- Antiproton 32, 63, 64, 67, 74, 79, 93, 115, 174, 181
- Antiquark 64, 65, 66, 72, 79, 80, 109, 111, 115, 116, 117, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 139, 166, 174, 176, 178, 181
- Astate 12
- Astronomie des neutrinos 52, 62, 69
- ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) 96, 100, 103, 174
- Atomes 11, 12, 13, 14, 15, 17, 19, 23, 24, 26, 27, 29, 30, 32, 36, 37, 39, 41, 42, 44, 45, 47, 49, 50, 52, 53, 54, 62, 63, 64, 67, 81, 86, 87, 88, 89, 96, 105, 106, 119, 134, 141, 146, 151, 156, 158, 163, 178

B

- Baryons 65, 66, 109, 116, 121, 122, 123, 124, 126, 127, 128, 129
- Béryllium 35, 74
- Big Bang 11, 13, 18, 20, 21, 30, 33, 61, 68, 107, 118, 119, 126, 138, 146, 147, 149, 151, 163, 166, 173
- Boson W 112, 119, 144, 145, 175

Boson Z 136, 150, 175
 Bosons
 voir aussi Higgs (boson de)
 Bottomonium 128

C

Calorimètre 100, 101
 Carbone 12, 13, 15, 32, 35, 38, 49, 74
 CERN 10, 31, 43, 64, 73, 74, 79, 82,
 91, 93, 115, 134, 150, 169, 175, 181
 Chambre
 à bulles 89, 90, 92, 99, 175
 à bulles 88, 89, 94, 95, 103
 à bulles électroniques 95
 à dérive 95
 à dérive 95
 à étincelles 92, 175
 à nuages 48, 86, 87, 88, 92, 103
 proportionnelle multifilaire 95
 Charges de couleur 110, 111, 112,
 115, 116
 Charmonium 125, 126, 128
 CMS (Compact Muon Solenoid) 96, 100, 155, 175
 Cockcroft, John Douglas 49
 Collisionneur 76, 77, 79, 175
 détecteur 99
 LHC 23, 44, 68, 69, 70, 75, 77,
 80, 81, 84, 96, 99, 103, 118, 158,
 164, 178
 RHIC 163
 usines B 83, 167
 Collisionneur
 Compteur Geiger 85, 86, 87

Cosmologie 165
 Cosmotron 75
 Cristallographie aux rayons X 40
 Cronin, James 166
 Cycle de fusion 143
 Cyclotron 70, 71, 72, 73, 176

D

Désintégration bêta 60, 112, 113,
 135, 144, 146, 176, 177, 180
 Détecteur UA1 93
 Deutéron 143, 144, 148, 150

E

$E = mc^2$ 16, 31, 142, 148, 176
 Eau 12, 40, 98, 142
 Eau lourde 98
 Einstein, Albert 16, 31, 161
 Électrons 13, 14, 17, 19, 20, 21, 23, 27,
 32, 35, 36, 37, 41, 42, 43, 45, 46,
 48, 49, 51, 52, 55, 63, 64, 67, 69,
 76, 77, 78, 80, 83, 85, 96, 99, 100,
 105, 107, 115, 127, 130, 134, 141,
 146, 147, 150, 158, 163, 174, 176
 Électronvolt 31, 34, 176
 Éléments 10, 12, 15, 21, 23, 30, 35,
 46, 52, 61, 107, 120, 139, 141, 146,
 147, 150, 170
 Émulsions photographiques 87
 Énergie 14, 16, 30, 31, 34, 37, 41, 47,
 53, 54, 67, 94, 99, 109, 116, 142,
 148, 176
 Eta-c 123, 125
 Eta-prime 122

État fondamental 53, 55
 États excités 53
 Étoiles 13, 23, 24, 42, 52, 69, 120,
 139, 147

F

Faisceaux contrarotatifs 68, 75, 115
 Fer 15, 35, 101, 147
 Fermi 29
 Fermilab 74, 130, 176
 création de neutrinos 134
 expérience MiniBOONE 165
 Fermions 159
 Fitch, Val 166
 Forces
 électromagnétiques 23, 44, 105,
 110, 114, 115
 électrostatiques 59
 faible 18, 79, 105, 107
 forte 18, 105, 107
 grande unification 118, 156
 gravitationnelle 18, 105
 Francium 12
 Fusion nucléaire 99, 146

G

Galaxies 23, 26, 33, 114, 139, 149,
 158, 162
 Geiger, Hans 47
 Glashow, Sheldon 113
 Gluons 55, 112
 Quark Gluon Plasma (QGP) 163

H

Heisenberg (principe
 d'incertitude) 113
 Hélium 13, 35, 46, 108, 142, 144, 145,
 149, 179
 HERA (accélérateur) 55
 Higgsino 160
 Higgs (le boson de) 10, 23, 78, 82,
 112, 118, 130, 153, 175
 Higgs, Peter 10, 152, 155, 172
 Hydrogène 12, 13, 15, 23, 32, 48, 63,
 98, 112, 142, 147

I

Injecteur principal 74

K

Kaons 67, 74, 83, 166
 K-court 166
 KEKB, Japon 83
 K-long 166

L

Lawrence, Ernest 70
 Lenard, Philipp 45
 LEP (Large Electron Positron colli-
 sionneur) 76, 102, 178
 Leptons 59, 97, 109, 130, 137, 153,
 164, 176
 LHC
 voir Collisionneur
 Liquide surchauffé 89

Longueur d'onde de la lumière 26,
38

Lumière

année-lumière 29, 62, 165

visible 27, 37, 42, 98

M

MACHOs (massive compact halo
objects) 157, 178

Marsden, Ernest 47

Masse 16, 31, 132, 178

champ de Higgs 145, 153

des neutrinos 63, 84, 165

Matière 10, 21, 52, 150

déséquilibre avec l'antima-
tière 128, 137

exotique 120, 150

Maxwell, James Clerk 113

Mécanique quantique 53, 108,
132, 158

Mésons 65, 109

avec spin 123, 125

bottom 127

strange 121, 122

MicroBOONE (l'expérience) 165

Microscopes 20, 29, 37, 96

MINOS (l'expérience) 135

Modèle standard 131, 152, 158, 173

Muon 20, 67, 91, 101, 118, 130, 178

N

Neutrinos 18, 59, 60, 97, 131, 149,
161, 164

oscillations 132, 135

Neutrons 14, 61, 112, 131

constitués de quarks 27

désintégration 112

masse 153

taille 27

Nickel, collision avec des
protons 74

Noyaux 15, 46, 61, 107, 120, 156

O

Ondes électromagnétiques 40

Ondes gravitationnelles 157

Oxygène 12

P

Pauli (principe d'exclusion) 57

Penzias, Arno Allan 151

PEP2, Californie 83

Photons 41, 53, 100, 112, 116, 132,
153, 179

Physique des hautes énergies 42

Physique des particules à haute
énergie 20

Pions 67, 74, 115

Planck (constante de) 41, 158, 175

Plasma 23, 142, 163

Plasma Quark Gluon (QGP) 163

Plutonium 15

Polonium 86

Positron 87

Positrons 32, 63, 67, 77, 83, 117, 179

Protons 14, 18, 179

collisions 20, 75, 93

composés de quarks 16, 74, 79

fusion 61
résonance 53, 54
spin 57

Q

QCD 115, 179
QGP 163
Quantique, théorie 41, 57, 115, 153, 161, 168
Quarks 16, 19, 20, 21, 27, 55
 bottom 96, 127, 179
 charm 124, 180
 couleur 111, 176
 down 52, 55, 56, 128, 129, 180
 masse 57
 strange 97, 124, 180
 top 127, 180
 up 52, 55, 56, 128, 129, 180

R

Radioactivité 16, 87
 naturelle 18, 61, 67
Radium 86
Raies spectrales 52
Rayonnement Cerenkov 98
Rayonnement, détection 86
 bêta 50
 infrarouge 39
Rayonnement électromagnétique 38, 112, 151, 180
Rayonnement gamma 39, 42, 55, 144, 180
Rayonnement synchrotron 76
Rayons cathodiques 45

Rayons cosmiques 52, 68, 88, 91, 120, 124, 134, 158, 180
Résonances 53, 57
RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider) 163
Rutherford, Ernest 45, 47, 85

S

Salam, Abdus 113
Scintillateurs 85
SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) 43, 78, 180
Sleptons (superleptons) 160
SNO oscillations des neutrinos solaires 134
SNO (Sudbury Neutrino Observatory), Canada 134, 180
Soleil 23, 35, 142, 144
 diamètre 25
 distance de la Terre 26
 fusion 131, 146
 source de neutrinos 62, 99
 température 32, 54
Solidité 14, 106, 159
Spectres 52
Spin 56, 112, 119, 122, 180
 des mésons 123
Squarks (superquarks) 160
Superamas de galaxies 26
Superfermion 160
SuperKamiokande 98, 181
SuperKEKB, Japon 83
Supernova 23, 147
SuSy 160, 181

Synchrocyclotron 72
Synchrotron 70, 72, 76, 181

Uranium 15, 61, 108
Usines à particules 82

T

T2K (l'expérience) 167
Température
 de l'Univers 33, 35
 des atomes dans le Soleil 142
 liée à la longueur d'onde 42
 liée à l'énergie 31
Tevatron 74, 75
Thomson, J.J. 46
Transmutation des éléments 16,
 18, 23, 141
Trous noirs 157

U

Univers 11, 19, 20, 24, 30, 35, 128,
 137, 147, 156, 169

V

Verre au plomb 100
Violation de la symétrie CP 165,
 167
Voie lactée, taille 26

W

Walton, Ernest Thomas Sinton 49
Weinberg, Steven 113, 173
Wilson, Robert Woodrow 151

Y

Yukawa, Hideki 65