

INTRO UNE INTRODUCTION À DUCTION TION

L'AVENTURE DU GRAND COLLISIONNEUR LHC

Du big bang au boson de Higgs

Daniel Denegri, Claude Guyot,
Andreas Hoecker et Lydia Roos

Préface de Carlo Rubbia, Prix Nobel

edp sciences

Collection « Une Introduction à »
dirigée par Michèle Leduc et Michel Le Bellac

L'aventure du grand collisionneur LHC

Du big bang au boson de Higgs

Daniel Denegri, Claude Guyot,
Andreas Hoecker, Lydia Roos



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Dans la même collection

Le laser

Fabien Bretenaker et Nicolas Treps, préface de C. H. Townes

Le monde quantique

Michel Le Bellac, préface d'A. Aspect

Les planètes

Thérèse Encrenaz, préface de J. Lequeux

Naissance, évolution et mort des étoiles

James Lequeux

La fusion thermonucléaire contrôlée

Jean-Louis Bobin

Le nucléaire expliqué par des physiciens

Bernard Bonin, préface d'E. Klein

Mathématiques des marchés financiers

Mathieu Le Bellac et Arnaud Viricel, préface de J.-Ph. Bouchaud

Physique et biologie

Jean-François Allemand et Pierre Desbiolles

La cryptologie

Philippe Guillot

*Retrouvez tous nos ouvrages et nos collections sur
<http://www.edition-sciences.com>*

Illustration de couverture : vue éclatée de l'un des 1 232 dipôles supraconducteurs répartis le long des vingt-sept kilomètres de circonférence du LHC pour maintenir les deux faisceaux de protons sur leurs trajectoires circulaires.

© 2014, EDP Sciences, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf,
91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN 978-2-7598-0771-0

Les auteurs



Daniel Denegri, né à Split en Croatie de père croate et de mère française, est directeur de recherche émérite au CNRS. Il a fait ses études de physique à l'université de Zagreb, Croatie, et a obtenu un doctorat ès science à la Johns Hopkins University de Baltimore aux États-Unis. Il entre au laboratoire du CEA Saclay en 1971. Il a participé directement à la découverte des bosons vecteurs W et Z en 1982 et 1983, dans l'expérience UA1. Il a pris part au lancement du projet LHC en 1989 avec Carlo Rubbia et, en 1990, a été l'un des coordonnateurs des études sur le potentiel de découverte du LHC. En 1991, il fonde avec Michel Della Negra et Jim Virdee l'expérience CMS dont il a été coordonnateur de la physique pendant quatorze ans. Il a participé activement à la découverte du boson de Higgs en 2012, et s'intéresse actuellement au futur programme du LHC.

Claude Guyot est physicien à l'Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers (Irfu) du CEA. Après un doctorat d'État sur la recherche des oscillations de neutrinos en 1984 dans le cadre de l'expérience CDHSW au CERN, il a travaillé sur les interactions des neutrinos avec les nucléons pour étudier les interactions électrofaibles et la structure interne du nucléon. En parallèle à des recherches sur la violation des symétries CP et T dans le système des kaons neutres, il a rejoint en 1991 le groupe de physiciens qui formera la collaboration ATLAS auprès du LHC. Il a fait partie des quelques physiciens à l'origine de la conception du spectromètre à muons d'ATLAS et en particulier de son grand toroïde supraconducteur. Il dirige depuis 2011 le groupe ATLAS du CEA à Saclay.

Andreas Hoecker est né et a fait ses études de physique en Allemagne. Il a rejoint le Laboratoire de l'accélérateur linéaire à Orsay en région parisienne pour étudier lors d'une thèse de doctorat les propriétés du lepton τ et de l'interaction forte utilisant les données fournies par l'expérience ALEPH auprès de l'accélérateur LEP au CERN. Après sa thèse il a rejoint en 1997 le CNRS et a étudié la violation de symétrie entre matière et antimatière auprès de l'expérience BABAR, à Stanford aux États-Unis, où il a été basé pendant deux ans. En 2005, après son retour à Orsay, Andreas Hoecker a rejoint le CERN en tant que chercheur permanent. Il y travaille depuis dans l'expérience ATLAS où il a contribué dans différents domaines de la mise en œuvre de l'expérience et de l'analyse des données de physique, notamment dans la recherche de la supersymétrie et du boson de Higgs. Il est coordonnateur de la physique d'ATLAS en 2014 et 2015.

Lydia Roos est directrice de recherche au CNRS. Pendant sa thèse de doctorat à Marseille, elle a étudié les propriétés des mésons beaux avec l'expérience ALEPH. Elle a rejoint le CNRS à Grenoble en 1993 et a contribué à la mise en œuvre d'un détecteur à pixels de silicium pour l'expérience DELPHI au LEP. Depuis 1996, elle travaille au Laboratoire de physique nucléaire et des hautes énergies à Paris. Elle s'est intéressée à l'étude de la symétrie matière-antimatière sur l'expérience BABAR. Pendant un séjour de quatre ans à Pékin consacré au développement des collaborations scientifiques franco-chinoises, elle a pris la responsabilité d'un laboratoire international associé de physique des particules. À son retour à Paris en 2008, elle a rejoint l'expérience ATLAS. Elle a travaillé depuis sur la recherche du boson de Higgs, la compréhension des bruits de fond associés et l'étude de ses propriétés.

Remerciements

Nous tenons à remercier en premier lieu tous nos collègues physiciens, ingénieurs et techniciens des expériences du LHC et plus particulièrement ceux d'ATLAS et de CMS, qui ont contribué à la conception, la construction et la mise en œuvre de ces expériences et qui sont à l'origine des résultats de physique présentés dans ce livre. Nos remerciements vont aussi naturellement aux physiciens, ingénieurs et techniciens du CERN qui ont conçu, construit et fait fonctionner le LHC avec le succès que l'on sait, sans lesquels rien de cette aventure n'aurait été possible. Nous n'oublions pas le rôle essentiel tenu par la direction et le conseil du CERN qui ont su assurer les moyens financiers et humains nécessaires à la construction et la mise en route du projet, et en particulier les directeurs généraux successifs : Carlo Rubbia qui a lancé le projet et a eu la gentillesse d'écrire la préface, Chris Llewellyn-Smith, Luciano Maiani, Robert Aymar et Rolf Heuer qui l'ont mené à bien, sans oublier Herwig Schopper qui a fait construire le tunnel du LEP dont le LHC a hérité.

Les auteurs saluent l'engagement et le soutien du CNRS/IN2P3, du CEA/Irfu et de leurs autorités de tutelle, dans l'aventure du LHC, tant au niveau des moyens financiers que techniques et humains, grâce auxquels les équipes françaises ont pu fournir des contributions significatives au succès de ce projet. Nos remerciements vont également aux collègues des expériences et du service des relations publiques du CERN, qui nous ont permis d'utiliser les résultats, les photos et divers diagrammes employés dans ce livre. Merci aussi à Lison Bernet pour ses dessins extraits de la bande dessinée du LHC sur la *chasse au bison de Higgs* et qui a pris le temps de les adapter pour le format de ce livre. Nous remercions également tous les collègues avec qui nous avons discuté pendant la réalisation de cet ouvrage. En particulier, nous tenons à mentionner nos collègues de l'Irfu, M^{me} Vanina Ruhlmann-Kleider et M. Jim Rich, pour les fructueuses discussions sur la cosmologie, ainsi que M. Jean Zinn-Justin pour certains éclairages théoriques. Merci également à M. Didier Vilanova pour ses conseils orthographiques et grammaticaux : les erreurs qui subsistent sont entièrement de la responsabilité des auteurs.

Enfin, nous remercions la Société française de physique et nos éditeurs, M^{me} Michèle Leduc et M. Michel Le Bellac, qui nous ont offert d'écrire ce livre. Ils ont apporté des corrections et suggestions fort utiles et ont supporté stoïquement nos retards successifs.

Vj ku' r ci g'kpvgpvkqpcmf 'ighv'dnc pm

Préface

Ce livre présente ce qui est indubitablement le plus grand projet scientifique jamais conçu, le grand collisionneur de hadrons au CERN, le LHC, et les expériences associées ATLAS, CMS, LHCb et ALICE, avec pour couronnement la découverte du *boson de Higgs* à l'été 2012.

Le LHC est le plus grand instrument scientifique construit à ce jour et les détecteurs ATLAS et CMS sont d'une complexité sans précédent en physique. Dans les années 1980, les physiciens ont découvert au CERN les bosons de jauge W et Z confirmant ainsi l'unification des interactions électromagnétique et faible telle que proposée par Glashow, Salam et Weinberg. Ce qu'il restait alors à faire pour compléter cette avancée scientifique spectaculaire était d'élucider le mécanisme par lequel ces bosons W et Z , de même que les quarks et les leptons, acquièrent leurs masses, le photon restant de masse nulle. Le niveau de compréhension des mécanismes naturels auquel est parvenu la physique des particules est tel que cette question était devenue une question scientifique légitime et le niveau de développement technologique permettait de s'y attaquer avec succès. Le schéma théorique le plus plausible pour expliquer cette masse, proposé dans les années 1960 du vingtième siècle, est le mécanisme de Brout-Englert-Higgs, dont la manifestation directe serait l'existence d'une particule communément appelée le boson de Higgs. La découverte du boson de Higgs cinquante ans plus tard, en 2012, est un immense succès scientifique, certainement le plus important en physique des particules depuis la découverte des bosons W et Z il y a de cela pratiquement trente ans. Ce sont là des découvertes qui marquent l'histoire des sciences.

Il s'agit bien ici d'un projet purement scientifique, d'un coût global de l'ordre de six milliards d'euros, qui a été mené à bien par le CERN, l'organisation



Carlo Rubbia

européenne pour la recherche nucléaire située à Genève. Ce projet a néanmoins été mené dans un cadre vraiment mondial. Des pays tels que les États-Unis, le Japon, le Canada, la Russie, l'Inde, ont contribué à la construction de l'accélérateur et une cinquantaine d'autres pays à la construction des détecteurs, car les grandes expériences auprès du LHC sont totalement globalisées. La contribution des États non-membres du CERN est de l'ordre de 10 % du coût de la machine et de 25 % à la construction des expériences. Le nombre de chercheurs, physiciens et ingénieurs qui ont pris part au projet LHC est de l'ordre de dix mille. Le CERN est ainsi un lieu unique de rencontre des physiciens du monde entier et est donc bien plus que simplement un laboratoire de recherche fondamentale.

Ce livre présente non seulement la genèse du projet LHC, mais aussi les idées principales et le cadre théorique qui motive la recherche au LHC en général. Ces dernières décennies, on assiste à la coalescence de la physique des particules élémentaires et du modèle cosmologique du big bang, car au tout début de l'histoire de la matière, les conditions de température et de densité extrêmes étaient telles que ne pouvaient subsister que des objets sans structure, les particules élémentaires. Les premières phases de l'évolution de la matière sont donc essentiellement gouvernées par la physique des particules. L'exploration des états de la matière et de son contenu en particules fondamentales faite au LHC peut être vue comme une remontée vers les tout premiers instants du big bang. Les collisions en mode proton-proton permettent l'étude de la nature des interactions entre particules à l'époque de la transition électrofaible entre 10^{-15} et 10^{-12} seconde après le big bang, et en mode de collision ion-ion, la période autour de la microseconde après le big bang, période de transition du plasma de quarks et gluons à la phase hadronique de la matière. Ce livre s'efforce d'indiquer les liens qui existent entre la physique des particules et le modèle du big bang, la quête sur l'origine de l'Univers passe autant par le LHC que par le télescope Hubble ou le satellite Planck.

Il était évident dès 1990 au moment du lancement du projet LHC que cela serait un effort de longue haleine. Oser proposer une machine aussi complexe et novatrice dans son concept et poussée jusqu'à la limite concevable de la technologie était d'une grande audace. Le système magnétique du LHC avec son système d'aimants unique, à deux tubes à vide pour les deux faisceaux dans une même enceinte magnétique et cryogénique, non seulement était une nécessité, vu le manque de place dans le tunnel, mais représente aussi une considérable économie financière, sans parler de l'économie que représentait le tunnel du LEP et toute l'infrastructure du CERN déjà existante. Le LHC est le prototype d'un nouveau type d'accélérateur-collisionneur. La phase de conception et de recherche et développement technologique, aussi bien sur le LHC lui-même que pour les expériences, a pris dix ans. Ensuite la phase de construction et mise en

route a pris encore dix autres années. S'il y a eu un retard dans la construction du LHC par rapport aux prévisions initiales, ceci est dû surtout à ce que le LHC a été construit à *budget fixe* pour le CERN.

Dans le domaine du développement de nouvelles technologies, le projet LHC a amené ou provoqué des avancées majeures : en supraconductivité et cryomagnétisme, par l'emploi de supraconducteurs chauds, en technologie du froid et du vide à très grande échelle, dans le développement de nouveaux matériaux, par exemple des cristaux scintillants, et de systèmes électroniques rapides et intégrés dans les dispositifs d'acquisitions de CMS et ATLAS. Sans parler de l'invention de l'Internet au début des années 1990 pour permettre la communication entre physiciens sur toute la planète et l'introduction une dizaine d'années plus tard du WLCG (*World LHC Computing Grid*) pour analyser les données du LHC de par le monde.

Avec le LHC comme point focal de la recherche sur la structure fondamentale de la matière pour les dix à vingt ans à venir, on peut s'attendre à élucider ou au moins faire de très importants progrès sur nombre de problèmes fondamentaux de la physique. Le problème de l'origine de la masse des particules élémentaires est en train d'être résolu, on peut aussi espérer tester l'idée de la supersymétrie en cours de route vers l'unification possible, voire probable, de toutes les interactions fondamentales. La découverte de la supersymétrie pourrait aussi apporter la réponse à l'énigme de la matière noire de l'Univers. L'hypothèse de l'existence de dimensions spatiales en plus des trois connues sera aussi testée. L'étude de la violation de la symétrie CP permettra d'approfondir la compréhension des subtiles différences entre matière et antimatière et de l'émergence finalement de la matière donc nous sommes constitués nous-mêmes. Plus généralement toutes ces études permettront de soumettre le modèle standard, aussi bien son versant QCD que celui électrofaible, au crible expérimental et aux tests les plus approfondis et incisifs.

Ces études au LHC, avec celles dans d'autres domaines très actifs et très intéressants de la physique des particules telle la physique des neutrinos par exemple, devraient permettre dans les années à venir de tester les limites de validité du modèle standard et de montrer la voie vers la prochaine étape dans la compréhension de l'organisation et de la structure intime de la matière. Tout ceci nous aide à comprendre la place que nous occupons dans l'Univers et c'est cet incessant effort de compréhension de la part de l'homme qui a modifié notre mode de vie et a permis l'apparition de notre civilisation actuelle.

Carlo Rubbia, le 7 mai 2013

À la mémoire de Guy Roos.

Table des matières

Préface	v
Introduction	xiii
1 Le modèle standard de la physique des particules	1
1.1 Forces, champs de matière et paramètres du modèle standard . . .	1
1.2 Les paramètres du modèle standard et leur influence sur notre vie quotidienne	10
1.3 Symétries externes, symétries internes	12
1.4 L'invariance de jauge et les forces fondamentales	14
1.5 Quand la symétrie se brise spontanément : le mécanisme de Brout-Englert-Higgs	17
1.6 L'unification électrofaible et le modèle de Glashow-Weinberg-Salam	23
1.7 Théorie de Dirac et antiparticules	27
1.8 La brisure de la symétrie matière-antimatière	30
1.9 Théorie quantique des champs et corrections virtuelles	32
1.10 Les constantes de couplages varient	36
2 Le succès expérimental du modèle standard	41
2.1 Les débuts de la physique des particules expérimentale	41
2.2 Les premiers succès	45
2.3 La découverte des bosons W et Z au Sp \bar{p} S	48
2.4 Le LEP et la consolidation du modèle standard	53
2.5 La violation de CP	58
3 Ce que le modèle standard n'explique pas	61
3.1 De la matière invisible : la matière noire	63
3.2 Une énergie répulsive : l'énergie noire	65
3.3 Asymétrie entre matière et antimatière baryonique	66

3.4	Absence de brisure de symétrie entre matière et antimatière dans l'interaction forte	68
3.5	Les masses des neutrinos	69
3.6	La gravitation	70
3.7	Le boson de Higgs est trop léger	72
3.8	D'où vient le potentiel de Higgs ?	75
4	Quelle forme pourrait avoir la nouvelle physique ?	77
4.1	La supersymétrie et l'extension supersymétrique du modèle standard	77
4.2	L'unification des forces électrofaible et forte	83
4.3	Des dimensions cachées dans l'Univers ?	87
5	Retour vers le big bang	93
5.1	La fuite des galaxies	94
5.2	Le rayonnement cosmologique micro-onde	96
5.3	La nucléosynthèse primordiale des éléments légers	97
5.4	L'Univers est en expansion accélérée	99
5.5	Le big bang, la physique des particules et le LHC	104
6	Le LHC	109
6.1	Historique des techniques d'accélération	109
6.2	Les collisionneurs hadroniques	115
6.3	Le lancement du LHC	120
6.4	Le long chemin vers le démarrage du LHC	124
7	Qu'est-ce qu'un détecteur de particules ?	135
7.1	Bref rappel des techniques de détection des particules	135
7.2	Conception générale d'un détecteur auprès d'un collisionneur	140
8	Les expériences ATLAS et CMS	147
8.1	Les proto-collaborations EAGLE, ASCOT, L3P et CMS	147
8.2	L'expérience CMS (<i>Compact Muon Spectrometer</i>)	151
8.3	L'expérience ATLAS (<i>A Toroidal LHC ApparatuS</i>)	161
8.4	Le système de déclenchement et d'acquisition d'ATLAS et de CMS	170
8.5	Comment s'organisent les grandes collaborations en physique des particules ?	171

9	Le démarrage du LHC et les premières données	177
9.1	Un démarrage prometteur	177
9.2	L'incident du 19 septembre 2008	179
9.3	Les premières collisions	181
10	L'analyse des données	189
10.1	Qu'est-ce que l'analyse des données?	190
10.2	Les défis de l'informatique et les analyses sur la grille	205
11	Le boson de Higgs : recherche et découverte	213
11.1	Le temps du LEP	213
11.2	Le temps du Tevatron	217
11.3	La recherche du Higgs au LHC	222
11.4	La découverte	226
11.5	L'étude des propriétés du nouveau boson	234
11.6	Le prix Nobel	237
12	À la recherche de la nouvelle physique	241
12.1	L'étude du quark top	241
12.2	Insaisissable supersymétrie	247
12.3	Des signes de grande unification?	255
12.4	Où sont donc les dimensions spatiales supplémentaires?	260
12.5	Des trous noirs au LHC?	262
13	Les expériences LHCb et ALICE	265
13.1	La physique du quark <i>b</i> et le détecteur LHCb	265
13.2	La physique des ions lourds avec le détecteur ALICE	273
14	Le futur	279
14.1	Le LHC et ses détecteurs dans la décennie à venir	280
14.2	Les objectifs de physique	281
14.3	Au-delà du LHC	290
15	Conclusion	299
	Unités de longueur, de temps et de masse-énergie avec les ordres de grandeurs correspondants	303
	Bibliographie	305
	Index	311

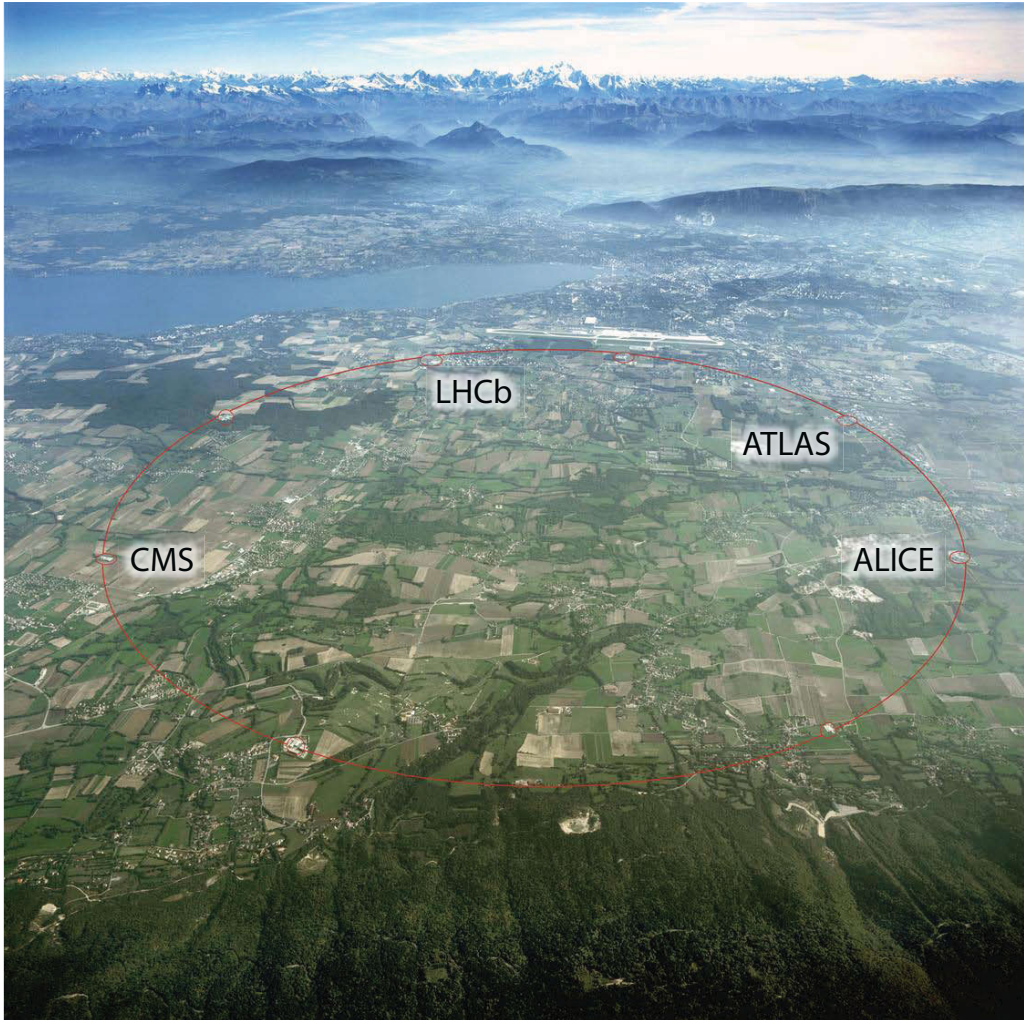


FIGURE 1. Le site du LHC près de Genève. Sont indiqués le tracé de l'anneau (en rouge) et l'emplacement des quatre expériences. La circonférence du LHC est de vingt-sept kilomètres.

Introduction

Ce livre décrit une des plus belles aventures de la science moderne : la construction et la mise en œuvre du grand collisionneur de hadrons du CERN, le LHC (*Large Hadron Collider*). Auprès de ce collisionneur ont été contruites quatre expériences non moins exceptionnelles : ATLAS, CMS, LHCb et ALICE. Le principal enjeu de ce fantastique dispositif expérimental est d'élucider le problème de la brisure électrofaible, qui est à l'origine de la masse des particules élémentaires. Dans les années 1960, Robert Brout et François Englert d'une part, Peter Higgs d'autre part, ont proposé une solution théorique, dans le cadre du *modèle standard* décrivant les particules élémentaires et leurs interactions. Ce mécanisme, qui porte désormais leurs noms, implique l'existence d'une nouvelle particule : *le boson de Higgs*. D'autres solutions avaient été proposées. Cependant, les données enregistrées et analysées en 2011 et 2012 ont permis de conclure à l'existence d'une nouvelle particule qui semble avoir toutes les propriétés de ce fameux boson. Ces résultats ont fait la une de tous les médias.

Comprendre les interactions entre particules élémentaires à des échelles d'énergie toujours plus élevées, c'est aussi comprendre les premiers instants de l'Univers après le *big bang*. Ainsi, les collisions proton-proton fournies par le LHC et enregistrées par les expériences ATLAS, CMS et LHCb permettent-elles d'étudier les constituants élémentaires de la matière et leurs interactions tels qu'ils existaient dans le premier millième de milliardième de seconde. Dans le mode de collisions noyau-noyau, avec notamment l'expérience ALICE, on s'intéresse à un instant plus tardif, une microseconde après le big bang. La matière était jusqu'alors sous forme d'un plasma de quarks et de gluons. C'est à cette période que se forment les hadrons, tels que les protons et les neutrons qui constituent aujourd'hui notre monde, autant que nous-mêmes.

Le LHC est l'accélérateur-collisionneur le plus puissant construit à ce jour, aussi bien en termes d'énergie que d'intensité de ses faisceaux de particules. De même, les détecteurs ATLAS et CMS surpassent de par leur taille et leur complexité tous leurs prédécesseurs. Ce projet exceptionnel a vu le jour grâce

à l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire, le CERN¹, situé près de Genève. Organisme scientifique précurseur de l'Europe unifiée, créé en 1954, le CERN a permis à celle-ci de retrouver peu à peu sa place, la première, dans ce domaine de la recherche fondamentale. Pour réaliser le LHC, il a su fédérer les efforts à un niveau mondial et associer aux pays européens les États-Unis, le Japon, la Chine, la Russie, l'Inde ou le Brésil, pour n'en citer que quelques-uns.

Ce livre présente les concepts théoriques qui décrivent ces états de la matière de manière qualitative, afin d'être compréhensible au plus grand nombre. Des encadrés offrent ici et là des développements mathématiques simples en complément. Les concepts exposés dans les premiers chapitres peuvent paraître ardu pour le lecteur qui ne posséderait pas les connaissances correspondant aux premières années de licence scientifique. Leur compréhension n'est cependant pas indispensable pour profiter de la lecture des chapitres expérimentaux qui suivent. L'ouvrage s'attache également à expliquer au lecteur comment l'on réussit avec des appareillages aussi sophistiqués que gigantesques à sonder l'infiniment petit et ainsi à confirmer ou infirmer les modèles théoriques.

Les trois premiers chapitres présentent le modèle standard, sa validation expérimentale et ses faiblesses ou insuffisances au moment où le LHC démarre. Le chapitre 4 décrit ensuite quelques extensions théoriques qui pourraient répondre aux questions laissées en suspens. Dans le chapitre 5 sont abordées les relations entre la physique des particules étudiée au LHC et le monde de l'infiniment grand issu du modèle cosmologique du big bang. La suite du livre est consacrée aux aspects expérimentaux en commençant par la genèse et la construction de l'accélérateur-collisionneur (chapitre 6) et les techniques de détection des particules (chapitre 7). L'accent est ensuite mis sur les deux grandes expériences généralistes, ATLAS et CMS, qui sont décrites au chapitre 8. Le chapitre 9 relate le démarrage du LHC et la première phase de fonctionnement. Est ensuite introduit le principe de l'analyse des données en physique des particules (chapitre 10) afin de permettre au lecteur de comprendre comment ont été obtenus les résultats présentés dans les chapitres suivants : la découverte du boson de Higgs (chapitre 11) et la recherche acharnée de nouvelles particules dans le cadre des extensions théoriques du modèle standard (chapitre 12). Les deux autres expériences du LHC, LHCb et ALICE, dont les thèmes de recherche sont plus spécialisés, sont présentées au chapitre 13. Le livre se termine en ouvrant une fenêtre sur le futur.

¹ À l'origine, les Européens ont créé le *conseil* européen pour la recherche nucléaire, rebaptisé *organisation* par la suite. Aujourd'hui, le principal domaine de recherche de cet immense laboratoire, où se croisent environ dix mille personnes, est la physique des particules. L'acronyme d'origine a toutefois été conservé.

1

Le modèle standard de la physique des particules

1.1 Forces, champs de matière et paramètres du modèle standard

L'humanité appréhende la science comme un enfant qui découvre le monde et pour lequel l'incroyable diversité des phénomènes auxquels il doit faire face constitue chaque jour un nouveau défi. Deux approches cohabitent : l'empirisme qui propose une réponse adaptée à chaque nouvelle observation expérimentale, et la catégorisation et la théorisation qui se basent, elles, sur la compréhension. C'est ainsi qu'un enfant qui regarde passer les voitures sur la route, sans l'aide de l'adulte voire contre son gré, commence d'abord par reconnaître des marques. Il a saisi la répétition des formes et des signes apparents. Il a reconnu des symétries et des régularités dans le monde qui l'entoure.

L'origine de la physique des particules se situe dans la première moitié du XX^e siècle. Ses débuts ont été marqués par l'observation de phénomènes complètement nouveaux : l'existence de l'antiparticule de l'électron (le positon) ou de nouvelles particules aux propriétés *étranges* (d'où leur nom) dans des rayons cosmiques ; la création de particules *virtuelles* dans le vide (le vide n'étant donc pas vide !); des violations de symétries considérées jusque-là comme absolues dans le monde de l'infiniment petit (symétrie entre la gauche et la droite, entre le futur et le passé ou entre particules et antiparticules). Le stade de développement de la physique des particules était alors celui d'un bébé. Puis, le bébé grandissant, il ne se contenta plus d'observer les phénomènes naturels. On construisit des

accélérateurs qui permirent de produire ces nouvelles particules en laboratoire et d'en étudier les propriétés de façon contrôlée. Les découvertes se succédaient tant et si bien qu'on pouvait craindre de ne pas avoir assez de lettres latines et grecques pour baptiser tous ces nouveaux objets ! La frustration était alors grande parmi les physiciens nucléaires (l'appellation *physicien des particules* n'existait pas encore). L'autrichien Wolfgang Pauli aurait dit, faisant référence à la prolifération de ces nouvelles particules : « *Si j'avais prévu cela, je serais devenu botaniste !* »

Existait-il un ordre sous-jacent ? Ou le chaos règnait-il dans ce monde à l'échelle du millionième de la taille de l'atome ? Peut-être existait-il un système périodique tel qu'il avait été établi par Dmitri Mendeleïev pour les éléments chimiques ? En 1964, George Zweig et Murray Gell-Mann remirent de l'ordre dans tout cela. Ils proposèrent un modèle dans lequel les hadrons¹ n'étaient plus des particules élémentaires mais étaient composés de deux ou trois particules, du même type ou de types différents, selon des règles bien déterminées. Ils nommèrent ces composants les *quarks*, terme emprunté par Gell-Mann à *Finnegans Wake* de James Joyce : « *Three quarks for Muster Mark ! Sure he has not got much of a bark, and sure any he has it's all beside the mark.* » En observant attentivement la rue, l'enfant avait enfin compris que les similarités récurrentes des voitures passant sous ses yeux provenaient de leur mode de construction : c'était le début d'une véritable compréhension.

Il s'avère, en effet, que la nature, bien que foisonnante dans ses expressions, suit le principe d'une grande économie. Tous les phénomènes du domaine de l'infiniment petit observés jusqu'à présent peuvent être expliqués par une théorie, dénommée *modèle standard*. Elle décrit trois interactions : l'interaction électromagnétique, responsable de l'électricité et du magnétisme (et donc des réactions chimiques), l'interaction faible, à l'origine de la radioactivité ainsi que de l'énergie solaire, et l'interaction forte, à l'origine de la cohésion des noyaux des atomes, elle-même étant un résidu de l'interaction dominante entre quarks. L'interaction faible est dénommée ainsi car son intensité est faible dans notre environnement actuel, en comparaison avec l'interaction forte ou électromagnétique. Elle n'a en outre qu'une très courte portée de 10^{-18} mètre, ce qui est mille fois plus petit que la taille d'un proton. Les trois interactions du modèle standard sont toutes liées à un principe géométrique, dont la compréhension et la formulation théorique ont constitué une des avancées théoriques majeures de la physique du xx^e siècle. Nous y reviendrons plus en détail dans ce chapitre.

Une quatrième interaction, peut-être la plus célèbre, est l'interaction gravitationnelle. Elle est responsable de la chute des pommes, du mouvement des

¹ Particules sensibles à l'interaction forte dont on reparlera plus en détail dans les sections et chapitres suivants. Le proton et le neutron, par exemple, sont des hadrons.

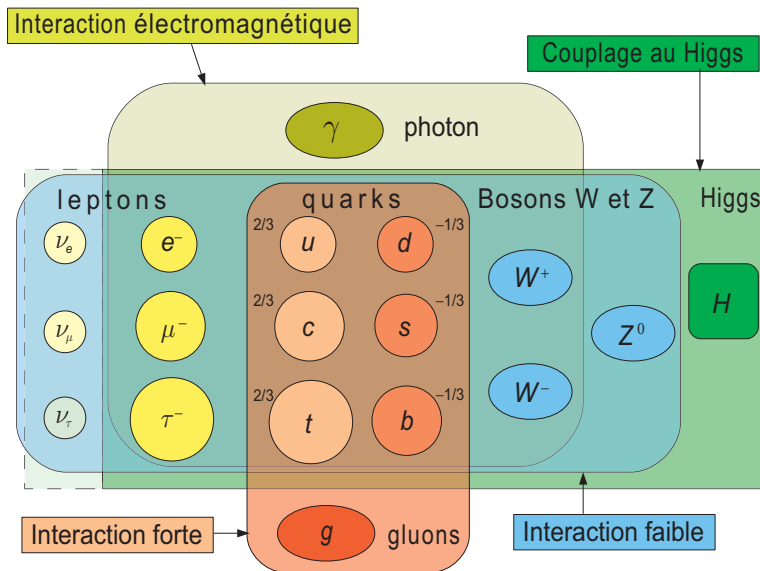


FIGURE 1.1. Les particules élémentaires et leurs interactions dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Les particules de matière sont les leptons et les quarks. Ils sont organisés en trois familles. Chaque famille de leptons contient un lepton neutre, appelé neutrino, et un lepton chargé : l'électron, le muon, et le lepton τ . Les neutrinos associés sont appelés neutrino électron, neutrino μ , et neutrino τ . La valeur absolue de la charge électrique de l'électron étant prise comme unité, la charge électrique des leptons chargés est de -1 . Les quarks ont une charge électrique fractionnaire. Chaque famille contient un quark de charge $+2/3$ et un quark de charge $-1/3$. Les quarks *up* et *down* constituent la première famille, les quarks *charmé* et *étrange* la seconde, et les quarks *top* et *beau* la troisième. On parle souvent de *fermions* pour désigner les particules de matière. La signification précise de ce terme est expliquée plus loin. À chacune de ces particules est associée une *antiparticule* de charge opposée (section 1.7). Les interactions entre fermions sont véhiculées par des *bosons* : le photon pour l'interaction électromagnétique, les bosons W^+ , W^- et Z pour l'interaction faible, et les gluons pour l'interaction forte. Le boson de Higgs joue un rôle très particulier qui sera expliqué en détail dans ce chapitre.

planètes autour du Soleil, ou encore de la structure de l'Univers, mais n'est pas incluse dans le modèle standard (figure 1.1). En effet, elle ne joue aucun rôle au niveau microscopique tel qu'on peut l'étudier aujourd'hui dans nos laboratoires. En revanche, son rôle est probablement déterminant, même au niveau microscopique, pendant les tout premiers instants de l'existence de l'Univers, lors du big bang.

Outre les interactions, le modèle standard décrit les particules élémentaires constituant la matière. Elles se résument à six quarks, sensibles aux quatre interactions, et six leptons qui eux sont aveugles à l'interaction forte. Trois de ces leptons portent une charge électrique. Les trois autres sont neutres et ne sont donc pas concernés par l'interaction électromagnétique. On les appelle simplement des *neutrinos*. Une particule qui n'interagirait selon aucune des forces, hormis

Linde, 105
 luminosité, 117
 Majorana, 69
 masse, 17
 fermion, 4
 matière noire, 63
 WIMP, 81, 289
 Maxwell, 83
 mélange, 8
 méson, 44
 Modèle standard, 2, 8, 10, 18, 45
 lagrangien, 39
 paramètres, 5, 10
 problèmes, 61
 moment magnétique dipolaire, 35
 Monte Carlo, 200
 muon, 3
 découverte, 41
 Neddermeyer, 29
 neutrino, 3
 abondance, 106
 découverte, 41
 masse, 31, 69
 mélange, 69
 nombre, 54
 oscillations, 69
 neutron, 4, 11
 temps de vie, 11
 Noether, 13
 nombre
 baryonique, 28
 leptonique, 28
 nucléosynthèse primordiale, 97
 oscillations baryoniques acoustiques,
 102
 particule
 détection, 135
 largeur, 42
 parité, 220, 236
 virtuelle, 34, 37
 parton, 46, 202
 Pauli, 2, 28, 41
 principe de, 6
 Peccei-Quinn, 68
 Penzias-Wilson, 96
 Perl, 5
 PETRA, 47
 phase CKM, 30, 58, 68
 photon, 3, 15
 Planck, 65
 masse, 71, 74, 88
 plasma de quarks et gluons, 273, 276
 polarisation du vide, 37
 Politzer, 38
 Pontecorvo, 69
 positon, 27
 principe anthropique, 12
 proton, 4, 62
 temps de vie, 84
 Protvino, 114
 quanta, 33
 quantique
 mécanique, 9
 quark, 3–5, 43, 44
 beau, 30
 charge, 3
 masse, 61
 top, 5, 242
 masse, production, 243
 quarks, 2
 résonance, 43
 radioactivité β , 41
 Randall-Sundrum, 92
 rayonnement cosmologique micro-onde,
 65, 96
 fluctuations, 100
 refroidissement stochastique, 119
 Reines, Cowan, 41
 relation d'incertitude, 7, 33
 relativité, 14
 relativité générale, 71, 82
 relativité générale, 87
 renormalisation, 73
 Richter, 45
 Rubbia, 49, 121

Cline, McIntyre, 117
 Saclay
 Saturne, 113
 solénoïde CMS, 153
 toroïde ATLAS, 168
 Sakharov, 87
 Salam, 23
 saveur, 4
 scalaire, 6, 18
 Schrödinger, 27
 section efficace, 53
 section efficace de production, 199
 SO(10), groupe, 85
 spin, 6, 28
 spineur, 27
 SSC, 109, 120
 statistique
 Bose-Einstein, 6
 Fermi-Dirac, 6
 stérile, 4
 SU(5), 84, 86
 supergravité, 82
 SuperKamiokande, 69, 84
 supernovae, 100
 supermétrie
 gluino, squark, production, 249
 limites expérimentales, 251
 recherche expérimentale, 248, 287
 supersymétrie, 77
 MSSM, 78
 mSugra, 81
 transformation de, 78
 symétrie, 12
 brisure, 18, 20
 CPT, 31
 matière-antimatière, 30, 105
 synchrotron, 112

 t'Hooft, 26
 Taylor, 45
 Tevatron
 recherche du Higgs, 217
 tier1/2/3, 206
 Ting, 45
 TLEP, 294
 trou noir, 262, 288

 UA1,UA2, 49
 unification, 87, 255
 électrofaible, 23, 24, 83, 106
 Grande, 38, 84
 unitarité, 13, 285
 Univers, 11
 âge, 95
 expansion, 66
 horizon, 105
 masse, 62
 platitude, 105
 refroidissement, 96
 taille, 105

 Veltmann, 26
 vide quantique, 24, 34
 stabilité, meta-stabilité, 292
 violation
 CP, 30, 58, 68

 Weinberg, 23
 angle, 24, 85
 Wilczek, 38
 WMAP, 65, 70
 Wu, 31

 Yang et Lee, 31
 Yang-Mills
 théorie, 15
 Yukawa
 particule de, 42

 Z', 256
 limites expérimentales, 257, 288
 Zinn-Justin, 26
 Zweig, 2, 43
 Zwicky, Fritz, 63