

Gian Francesco Giudice

L'Odyssée du Zeptospace

Un voyage au cœur de la physique du LHC

Traduit de l'anglais par
Mathilde Fontanet

avec la collaboration de

Emeraude Antille, Sandhya Ashtamkar, Eléa Doy, François Grobet,
Maya Majzoub, David Malbo, Marinette Miché-Santoro,
Alexandra Mühle, Wendy Savin, Justine Sich et Laura Zorloni

Mise en page : Marlyse Audergon

Illustration de couverture : Michael Hoch, « Matter – Anti – Matter version 2 »,
issue de la série « Art of Science – Beauty in Creation », © Michael Hoch
Michael.Hoch@AdventureArt.org, www.AdventureArt.org

La Fondation des Presses polytechniques et universitaires romandes (PPUR)
publie principalement les travaux d'enseignement et de recherche
de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL),
des universités et des hautes écoles francophones.
Le catalogue de leurs publications peut être obtenu par courrier aux
Presses polytechniques et universitaires romandes, EPFL – Rolex Learning Center,
CH-1015 Lausanne, par e-mail à ppur@epfl.ch,
par téléphone au (0)21 693 41 40, ou par fax au (0)21 693 40 27.

© Gian Francesco Giudice 2010

L'édition originale de ce livre a été publiée en anglais en 2009 chez Oxford University Press
sous le titre *A Zeptospace Odyssey: A Journey into the Physics of the LHC*. Cette traduc-
tion en français est publiée en accord avec Oxford University Press.

*First Edition was originally published in English in 2009. This translation is published by
arrangement with Oxford University Press.*

All rights reserved.

www.ppur.org

ISBN 978-2-88074-998-9

© Presses polytechniques et universitaires romandes, 2013

CH – 1015 Lausanne

Imprimé en Italie

Tous droits réservés.

Reproduction, même partielle, sous quelque forme ou sur quelque support
que ce soit, interdite sans l'accord écrit de l'éditeur.

TABLE DES MATIÈRES

1	Prologue.....	1
	Note au lecteur.....	8

Une histoire de particules

2	L'anatomie de la matière.....	11
	Les atomes.....	12
	Fractionner l'atome.....	14
	À l'intérieur de l'atome.....	18
	Au cœur du noyau de l'atome.....	25
	L'antimatière.....	31
3	Les forces de la nature.....	37
	La force de gravité.....	38
	La force électromagnétique.....	42
	La force faible.....	48
	La force forte.....	59
4	La Merveille sublime.....	67
	La théorie quantique des champs.....	68
	L'électrodynamique quantique.....	73
	La découverte des quarks.....	79

La théorie électrofaible	83
La chromodynamique quantique.	92
Le Modèle standard	97

Le vaisseau du zeptoespace

5 Stairway to heaven	103
L'unification de la science	103
L'échelle de Jacob	108
Des microscopes de plus en plus grands	113
Les nombreux usages des accélérateurs	118
Les collisionneurs.	123
6 Le seigneur des anneaux	127
La naissance d'un géant.	127
Le voyage des protons	136
Avant la rage finale.	149
De l'énergie, de la sécurité et de l'imprévisibilité	154
7 Des télescopes hors du commun	159
Logistique et transport	175
La gestion des données	178
D'autres expériences	185
Le facteur humain	188

Les missions dans le zeptoespace

8 Brisures de symétries	193
Symétries et mathématiques.	194
Symétries et physique	201
Symétrie de jauge.	204
Un problème massif.	210

La brisure spontanée de symétrie	214
Le mécanisme de Higgs	217
La quête par l'expérience	224
Comment comprendre le rien	227
Des questions ouvertes	232
9 Aux prises avec la naturalité	237
La hiérarchie	238
Un mystère quantique	240
Le problème de la naturalité	244
10 La supersymétrie	251
Supersymétrie et naturalité	258
Supersymétrie et unification	260
Découvrir la supersymétrie au LHC	267
11 Des dimensions supplémentaires aux nouvelles forces	273
Des dimensions supplémentaires étendues	280
Des dimensions supplémentaires déformées	283
La quête des dimensions supplémentaires au LHC	287
12 Observer l'Univers au microscope	293
La matière noire	303
Détecter la matière noire	311
L'énergie noire	316
Un coup d'œil du côté du multivers	320
13 Épilogue	325
Remerciements	333
Glossaire	335

1 PROLOGUE

« Nous ne devons jamais cesser d'explorer
Et la fin de toute notre exploration
Sera d'arriver là où nous étions partis
Et de connaître ce lieu comme pour la première fois. »

Thomas Stern Eliot¹

La salle de contrôle du Grand collisionneur de hadrons (LHC) grouille de monde. Tous les regards sont rivés sur l'écran gris accroché au mur. Le dernier bloc d'absorption a été retiré : les protons ne rencontreront aucun obstacle sur leur trajectoire circulaire, dans le tunnel souterrain de 27 kilomètres de long. Il est 10h28, le 10 septembre 2008. Nous sommes au CERN, dans le Laboratoire de recherche européen pour la physique des particules, situé près de Genève, de part et d'autre de la frontière franco-suisse.

Comme un magicien qui s'apprête à faire le plus extraordinaire de ses tours de magie, Lyn Evans, le chef du projet LHC, récite la formule magique en français, sans dissimuler la mélodie de son accent gallois : « Trois, deux, un... faisceau ! » À ce moment précis, deux points blancs apparaissent sur l'écran l'espace d'un instant. Des applaudissements retentissent. Les images prises dans la salle de contrôle sont diffusées en direct dans l'amphithéâtre principal, où la majorité des physiciens et des employés du CERN se sont réunis.

¹ T. S. Eliot, *The Four Quartets*, Harcourt, New York, 1943, traduction tirée de *Steven le Héroult*, Victor Lévy, Beaulieu, 1985.

Là aussi, tout le monde applaudit, au comble de la satisfaction et de l'émotion. L'aventure pour laquelle nous avons tant travaillé et tant attendu a enfin commencé.

Les premières études de conception du LHC, l'accélérateur de particules le plus puissant du monde, remontent au début des années 1980, mais le projet n'a été approuvé qu'en 1994. Quatorze ans plus tard, ces deux points blancs sur l'écran marquent la fin de la phase de construction et le début de la mise en œuvre du programme d'expérimentation pour la physique des particules. Ces points sont en réalité les deux images que le faisceau de protons a laissées sur une fine couche fluorescente. Le premier point montre le faisceau au moment de son injection dans le LHC, alors que le second correspond à sa trace à son retour après un tour le long de l'anneau, lorsqu'il a parcouru 27 kilomètres en seulement 90 millièmes de seconde. Certes, l'énergie du faisceau de protons n'est qu'une infime partie de l'énergie qu'il atteindra lorsque le LHC fonctionnera à plein régime, et la densité des protons accélérés reste extrêmement faible. Toutefois, les applaudissements enthousiastes des physiciens réunis pour cet événement sont pleinement justifiés, car le LHC vient de prouver la validité de sa technologie.

Dans la salle de contrôle, les cinq derniers directeurs généraux du CERN sont présents : Herwig Schopper, Carlo Rubbia, Christopher Llewellyn Smith, Luciano Maiani et Robert Aymar, dont le mandat se terminera fin 2008 et auquel succédera Rolf Heuer. Ces hommes ont dirigé le laboratoire au cours des différentes phases de planification et de construction du LHC. « Ils ne sont que cinq ici aujourd'hui, parce que les autres sont déjà morts ! » s'exclame jovialement Lyn Evans. Tous ne partagent pas son hilarité, mais, visiblement ravis, les anciens directeurs, en costume et en cravate, s'approchent de lui, en jeans et en baskets – des habits plus habituels au CERN – pour exprimer leur joie. Tous les laboratoires de recherche en physique des particules envoient des messages de félicitations au CERN. Le plus original est celui de Nigel Lockyer, directeur du laboratoire canadien TRIUMF, qui reprend les paroles de Neil Armstrong lorsqu'il fit ses premiers pas sur la Lune : « Un petit voyage pour un proton, mais un bond de géant pour l'humanité ! »

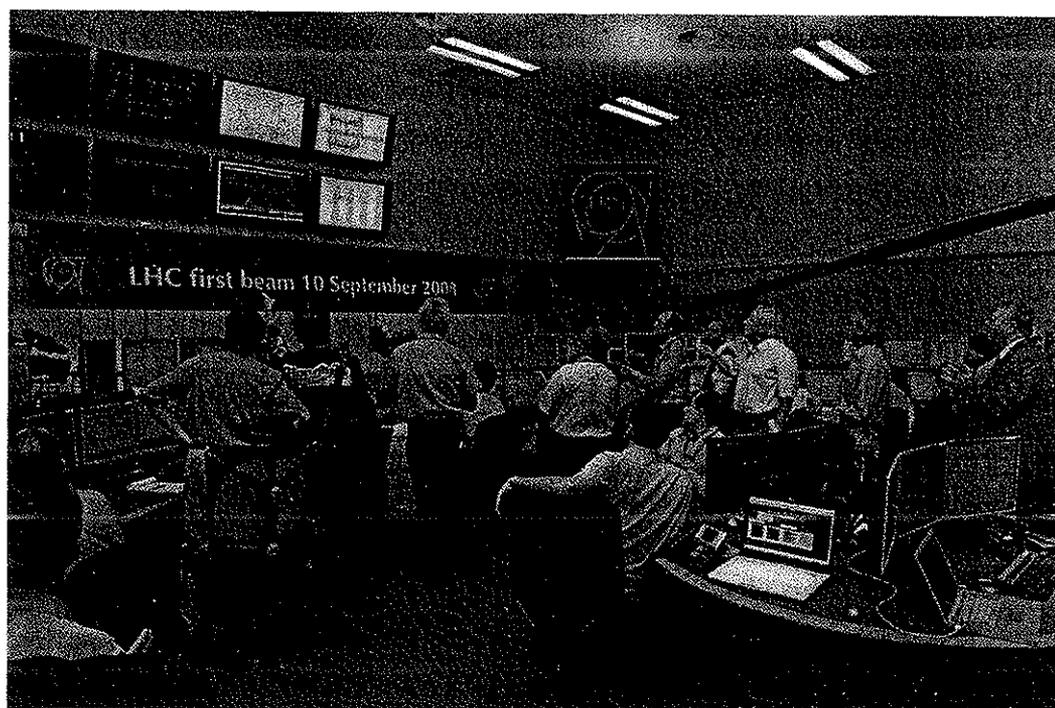


Fig. 1.1 La salle de contrôle du LHC, le 10 septembre 2008. Source: CERN.

Le LHC est en effet une aventure extraordinaire pour l'humanité. Un réel défi en matière de génie civil avec, notamment, l'excavation à cent mètres sous terre d'une caverne artificielle d'environ 80 000 mètres cubes, aussi grande que la nef de la cathédrale de Canterbury. Une aventure qui nous conduit à l'extrême limite de la technologie, avec la mise au point d'instruments novateurs et la nécessité de braver des conditions extrêmes, comme lorsqu'il s'agit de maintenir 37 000 tonnes de matériel déployé sur 27 km à -271°C (une température inférieure à celle de l'espace intersidéral) pendant de nombreuses années. Une aventure sans précédent en technologie de l'information, avec des flux de données d'environ un million de gigaoctets par seconde – imaginez qu'un seul opérateur téléphonique doive gérer simultanément une dizaine d'appels de chacun des habitants de la planète. Et, surtout, une aventure intellectuelle fantastique, car le LHC explorera des espaces qu'aucune autre expérience n'a pu sonder auparavant. Le LHC nous conduit au plus profond de la structure de la matière, pour découvrir les lois fondamentales déterminant le comportement de la nature. L'enjeu est de pouvoir comprendre les principes premiers qui régissent l'Univers, et de découvrir comment et, surtout, pourquoi la nature agit comme elle le fait.

Ce voyage vers l'inconnu est l'aspect le plus fascinant du LHC. En soi, la machine est une forme de microscope géant permettant d'observer la nature à des échelles inférieures à 100 zeptomètres. Le zeptomètre est une unité rarement utilisée, équivalente à un milliardième de milliardième de millimètre. Le terme a été créé en 1991 par le Bureau international des poids et mesures : « le préfixe « zepto » vient de « septo », qui évoque le chiffre sept (septième puissance de mille), et la lettre « z » remplace la lettre « s » pour éviter le double emploi de la lettre « s » comme symbole. »² Une étrange définition pour une étrange unité de mesure ! Le préfixe « zepto » est si singulier qu'il me semble parfaitement approprié pour décrire l'espace étrange et inconnu des dimensions infimes. Jusqu'ici, seules des particules élémentaires et l'imagination débordante de certains physiciens théoriciens ont pu accéder à cette échelle infinitésimale, qui ne dépasse pas quelques centaines de zeptomètres. Dans cet ouvrage le terme *zeptospace* renvoie à cet espace, que le LHC sera le premier à explorer.

Alors que l'envoi d'un vaisseau spatial sur la Lune avait un but concret (et même visible à l'œil nu par une nuit sans nuages), le LHC a entrepris une odyssée vers des espaces incertains dans lesquels nul ne peut prédire exactement ce que nous trouverons ni où nous parviendrons. Il s'est lancé en quête de mondes inconnus aidé de technologies de pointe et guidé par des hypothèses théoriques dont la seule compréhension exige des connaissances poussées en physique et en mathématiques. C'est ce qui a entouré le travail des physiciens d'un nuage de mystère et découragé les non-initiés de s'y intéresser. Le but de cet ouvrage est de montrer que le domaine d'exploration du LHC est fascinant et peut captiver toute personne prête à se poser des questions fondamentales sur la nature.

Bien évidemment, les vingt pays européens membres du CERN sont convaincus de l'intérêt de ces questions, comme l'attestent les importantes ressources qu'ils ont investies dans cette entreprise. Le

² Résolution 4 de la 19^e Conférence générale des poids et mesures, 1991.

coût de la construction de l'accélérateur LHC s'est élevé à environ 3 milliards d'euros, en incluant les tests, la construction du collisionneur, ainsi que la contribution du CERN aux systèmes informatiques et aux détecteurs, mais sans prendre en compte le coût du personnel du CERN. Cet effort financier considérable n'aurait pas été possible sans les contributions significatives de nombreux pays non-membres du CERN, tels que le Canada, les États-Unis, l'Inde, le Japon et la Russie. Des physiciens provenant de 53 pays, situés sur cinq continents, ont participé à la conception, à la construction et aux tests des instruments nécessaires (malheureusement, aucun physicien ni pingouin de l'Antarctique ne s'est laissé convaincre de se joindre à la cause). Le projet LHC est donc le fruit d'une prodigieuse collaboration internationale au nom de la science. Il a été réalisé grâce au financement, au travail et à la contribution intellectuelle de tant de pays que, en toute logique, ses résultats appartiendront à l'humanité tout entière. Ils ne devraient pas profiter qu'à quelques physiciens, car, malgré leur caractère technique et spécialisé, ils revêtent une importance capitale pour le patrimoine intellectuel universel.

Le LHC est le projet le plus complexe et le plus ambitieux qui ait jamais été entrepris sur Terre. La conception et la construction du collisionneur ont exigé de repousser les frontières de la technologie. Les recherches menées à cette fin auront très certainement des retombées et des applications pratiques qui iront bien au-delà du domaine purement scientifique. De même, le *World Wide Web*, a été créé au CERN en 1989 pour que les physiciens de différents laboratoires puissent s'échanger des données et des informations à travers le monde. Or, quatre ans plus tard, le CERN décidait de le céder au domaine public, léguant ainsi au monde un instrument qui est aujourd'hui irremplaçable. La recherche fondamentale a souvent des applications inattendues. Au milieu du XIX^e siècle, William Gladstone, chancelier de l'Échiquier, demanda au physicien Michael Faraday, engagé dans des recherches sur l'électromagnétisme, à quoi pourraient bien servir ses découvertes. Ce dernier lui répliqua : « Je ne sais pas, Sir, mais un jour vous pourrez prélever des impôts dessus ».

Aux yeux des physiciens, cependant, la connaissance pure reste le but ultime du LHC. La science enrichit la société bien au-delà de ses applications technologiques. En 1969, Robert Wilson, directeur d'un laboratoire de physique des particules de tout premier plan aux États-Unis, fut convoqué devant le Congrès pour justifier la dépense de 200 millions de dollars au titre d'un projet de physique de particules. Le Sénateur John Pastore du *Congressional Joint Committee on Atomic Energy* (le comité paritaire du Congrès sur l'énergie atomique) interrogea Wilson, qui sut exprimer l'enjeu de la recherche fondamentale.

«J. Pastore: Les espoirs liés à la construction de cet accélérateur ont-ils un lien quelconque avec la sécurité de notre pays?

R. Wilson: Non, Monsieur, je ne pense pas.

J. Pastore: Aucun?

R. Wilson: Aucun.

J. Pastore: Ces recherches n'ont aucune valeur à cet égard?

R. Wilson: Elles ne concernent que le respect que nous nous portons mutuellement, la dignité humaine, notre amour de la culture... Elles n'ont pas de lien direct avec la défense de notre pays, sauf pour le rendre digne d'être défendu.»³

Cet ouvrage traite de la mission du LHC, des raisons pour lesquelles le projet a été conçu et des connaissances que nous voulons en retirer. Le sujet est par nature vaste, complexe et hautement technique, mais mon but est relativement modeste. Je n'aborderai pas tous les thèmes de manière systématique et je n'ai pas la prétention de raconter en détail l'histoire du LHC. Je chercherai seulement à donner un aperçu des enjeux du point de vue d'un physicien, tout en soulignant l'étendue et la profondeur intellectuelle des questions

³ Entretien avant la rencontre du Comité sur l'énergie atomique. Congress of the United States, First Session on General, Physical Research Program, Space Nuclear Program and Plowshare, avril 17-18, 1969 – Part 1, US. Government Printing Office, Washington D.C.

que le LHC va devoir examiner. Mon but est d'aider le lecteur à comprendre le sens de cette expédition et de lui expliquer pourquoi tous les physiciens des particules la suivent avec autant de passion.

La première partie de ce livre décrit le monde des particules et comment les physiciens sont arrivés à le comprendre. Les résultats apportés par le LHC, pour être compris, exigent quelques notions sur le monde des particules. Comme l'a déclaré le physicien théoricien Richard Feynman : « Je ne comprends pas pourquoi les journalistes veulent en savoir le plus possible sur l'actualité en physique, alors qu'ils n'ont pas la moindre idée des découvertes antérieures, sans lesquelles les découvertes récentes n'ont aucune signification. »⁴

Le LHC est un instrument relevant du superlatif, où la complexité technologique atteint son paroxysme. La deuxième partie du livre décrit le collisionneur et la manière dont il fonctionne. Les innovations technologiques nécessaires à sa construction ne sont que l'un des nombreux aspects extraordinaires de cette aventure scientifique. Nous nous intéresserons aussi aux détecteurs utilisés pour étudier les particules créées lors des collisions de protons. Ces instruments sont des merveilles modernes, qui combinent la microtechnologie de pointe et des proportions gigantesques.

Le LHC a surtout été conçu pour explorer l'inconnu. La dernière partie de cet ouvrage esquisse donc les attentes et les perspectives qu'il a fait naître parmi les scientifiques. Elle porte sur certaines des questions les plus cruciales fondant le projet. Comment les physiciens imaginent-ils le zeptospace ? Pourquoi le mystérieux boson de Higgs existe-t-il ? L'espace cache-t-il une supersymétrie ou s'étend-il dans des dimensions supplémentaires ? Comment la collision de protons dans le LHC peut-elle révéler les secrets de l'origine de l'Univers ? Peut-on produire de la matière noire au LHC ?

⁴ R. P. Feynman, cité d'après S. Weinberg, *The Discovery of Subatomic Particles*, Cambridge University Press, Cambridge, 2003.