

Jim Baggott

# **LA PARTICULE DE DIEU**

À LA DÉCOUVERTE  
DU BOSON DE HIGGS

TRADUIT DE L'ANGLAIS PAR BENOÎT CLENET

DUNOD

L'édition originale de cet ouvrage a été publiée en anglais en 2012 par Oxford University Press, sous le titre: *Higgs: The Invention and Discovery of the 'God particle'*.

*Higgs: The Invention and Discovery of the 'God Particle'*, First Edition was originally published in English in 2012. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

Conception de la couverture : Raphaël Tardif

Illustration de couverture :  
Simulation de la désintégration d'un boson de Higgs en  
4 muons (traces jaunes) par ATLAS. © 1995 CERN

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.</p> <p>Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements</p> | <p>d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée.</p> <p>Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).</p> |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

© Dunod, Paris, 2013, pour la traduction française

ISBN 978-2-10-059718-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# PRÉFACE

Nombreuses sont les découvertes scientifiques majeures qui ont été suivies d'ouvrages de vulgarisation relatant ces aventures au commun des mortels. Mais c'est la première fois que je vois un livre ayant été rédigé, dans une large mesure, par *anticipation* d'une découverte. La rapidité avec laquelle ce livre a été publié, aussitôt après l'annonce faite en juillet 2012 de la découverte au CERN (et d'une confirmation du Fermilab) d'une nouvelle particule qui semble être la particule de Higgs, témoigne de l'énergie et de l'ardeur remarquables de Jim Baggott et d'*Oxford University Press*.

La prompt publication de cet ouvrage atteste également du grand intérêt des lecteurs pour cette découverte. Il serait donc opportun que j'ajoute dans cette préface quelques remarques personnelles au sujet de ce qui a été accompli. On entend souvent dire que derrière la quête du boson de Higgs se trouve l'origine de la masse. Certes, mais cette explication nécessite quelques éclaircissements.

Dans les années 1980, nous avions une bonne théorie qui rendait compte de toutes les particules élémentaires observées et des forces (autres que la gravitation) qu'elles exercent entre elles. L'un des ingrédients essentiels de cette théorie est une symétrie, telle une relation de parenté, qui relie deux de ces forces : la force électromagnétique et la force nucléaire faible. L'électromagnétisme est à l'origine de la lumière ; la force faible permet aux particules au sein des noyaux atomiques de changer d'identité dans des processus de désintégration radioactive. Cette symétrie fusionne les deux forces en une seule interaction « électrofaible ». Les propriétés générales de la théorie électrofaible ont été testées avec succès. Les expériences réalisées récemment au CERN et au Fermilab

ne cherchaient pas à mettre en cause leur validité, qui n'était d'ailleurs, honnêtement, pas mise en doute même si aucune particule de Higgs n'avait été découverte.

Or l'une des conséquences de la symétrie électrofaible, si nous n'ajoutons rien d'autre à la théorie, est que toutes les particules élémentaires, y compris les électrons et les quarks, sont dénuées de masse, contre toute évidence bien entendu. Ainsi, quelque chose manquait dans la théorie électrofaible, une nouvelle espèce de matière ou de champ, encore inobservée dans la nature ou nos laboratoires. La quête de la particule de Higgs incarnait la recherche de la réponse à cette question : Quel est ce nouvel expédient dont nous avons besoin ?

Dans la quête de cette substance nouvelle, on ne s'est pas simplement contenté de s'affairer autour des accélérateurs à haute énergie, puis d'attendre de voir ce qui allait en sortir. D'une manière ou d'une autre, la symétrie électrofaible, bien qu'étant une propriété avérée des équations fondamentales de la physique des particules élémentaires, doit être brisée : elle ne s'applique pas directement aux particules et aux forces que nous observons réellement. Nous savions depuis les travaux de Yoichiro Nambu et Jeffrey Goldstone en 1960-1961 que ce type de brisure de symétrie est possible dans diverses théories, mais apporte nécessairement son lot de particules sans masse, dont nous ignorions l'existence.

Robert Brout et François Englert, Peter Higgs, Gerald Guralnik, Carl Hagen et Tom Kibble montrèrent tous indépendamment, en 1964, que dans certaines classes de théories ces particules sans masse de Nambu-Goldstone disparaîtraient, contribuant uniquement à donner une masse aux particules véhiculant les forces. Il en est ainsi dans la théorie des forces faible et électromagnétique proposée en 1967-1968 par Abdus Salam et moi-même. Mais cela ne répond pas à notre interrogation : quelle espèce inédite de matière ou de champ brise véritablement la symétrie électrofaible ?

Il y avait deux possibilités. La première consistait à supposer l'existence de champs encore inobservés qui emplissent tout l'espace, et que, de même que le champ magnétique terrestre permet de distinguer le nord des autres directions, ces champs nouveaux différencient la force faible de

celle électromagnétique, conférant une masse aux particules médiatrices de l'interaction faible et aux autres particules, mais laissant les photons (qui véhiculent la force électromagnétique) sans masse. On les appelle des champs « scalaires », signifiant par là que, contrairement aux champs magnétiques, ils ne repèrent pas des directions dans l'espace usuel. Les champs scalaires de ce type furent introduits dans les exemples illustratifs de brisure de symétrie de Goldstone puis, par la suite, dans les articles de 1964<sup>1</sup>.

Lorsque Salam et moi avons fait appel à cette brisure de symétrie dans la gestation de la théorie moderne « électrofaible » des forces faible et électromagnétique, nous avons supposé que ce mécanisme provenait de champs scalaires de ce type, imprégnant tout l'espace. (Une telle symétrie avait déjà été pointée du doigt par Sheldon Glashow et par Salam et John Ward, mais pas en tant que propriété exacte des équations de la théorie, de sorte que ces théoriciens ne furent pas amenés à introduire des champs scalaires.)

Une des conséquences des théories dans lesquelles les symétries sont brisées par des champs scalaires, y compris les modèles considérés par Goldstone et par les articles de 1964, et la théorie électrofaible de Salam et moi, est que, bien que certains de ces champs contribuent uniquement à conférer une masse aux particules médiatrices des forces, d'autres champs scalaires doivent se manifester dans la nature sous la forme de nouvelles particules de matière qui peuvent être créées et observées dans des accélérateurs et collisionneurs de particules. Salam et moi avons découvert que nous devons introduire quatre champs scalaires dans notre théorie électrofaible. Trois d'entre eux servirent à l'affectation d'une masse aux particules  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  – les « photons lourds » – qui transmettent la force faible dans notre théorie (ces particules furent découvertes au CERN en 1983-1984, et il s'avère qu'elles possèdent les masses prédites par le modèle électrofaible). Le champ scalaire résiduel devait être la manifestation d'une particule physique, un grain d'énergie et de quantité de mouvement de ce champ. C'est la « particule de Higgs » que les physiciens ont recherché durant environ trente ans.

Mais il y avait toujours une seconde possibilité. Il pouvait tout simplement ne pas y avoir de champs scalaires nouveaux emplissant l'espace, ni

de particule de Higgs. Au lieu de cela, la symétrie électrofaible pourrait être brisée par des forces fortes, nommées « forces de technicouleur », agissant sur une nouvelle famille de particules, beaucoup trop lourdes pour avoir été observées. Ce type de comportement survient dans la supraconductivité. Cette théorie des particules élémentaires fut proposée vers la fin des années 1970 indépendamment par Leonard Susskind et moi-même, et conduisait à une profusion de particules nouvelles, dont la cohésion était assurée par les forces de technicouleur. Nous devons donc faire face à ce dilemme : champs scalaires ou technicouleur ?

La découverte de cette nouvelle particule fait pencher très fortement la balance en faveur d'une symétrie électrofaible brisée par des champs scalaires, plutôt que par des forces de technicouleur. C'est pourquoi cette annonce est importante.

Mais il reste beaucoup à faire pour entériner cette révélation. La théorie électrofaible de 1967-1968 prédisait toutes les propriétés de la particule de Higgs, sauf sa masse. Maintenant que nous connaissons expérimentalement cette masse, nous pouvons calculer les probabilités des différentes voies de désintégration des bosons de Higgs, puis vérifier si ces prédictions sont corroborées par les expériences ultérieures. Cela va prendre encore un peu de temps.

La découverte d'une nouvelle particule, qui a toutes les chances d'être le Higgs, lègue également aux théoriciens une tâche ardue, celle de comprendre l'origine de sa masse. Le Higgs est la seule particule élémentaire dont la masse ne provient pas de la brisure de la symétrie électrofaible. Dans le cadre des principes sous-jacents à la théorie électrofaible, la masse du Higgs peut prendre n'importe quelle valeur. C'est pourquoi ni Salam ni moi ne pouvions la prédire.

En vérité, nous remarquons désormais quelque chose d'assez curieux au sujet de la masse du Higgs. On appelle cela le « problème de la hiérarchie ». Puisque c'est la masse du Higgs qui détermine l'échelle des masses de toutes les autres particules élémentaires connues, nous pourrions la supposer similaire à une autre masse qui joue un rôle de premier plan en physique, à savoir la masse de Planck, constituant une unité fondamentale de masse dans la théorie de la gravitation (c'est la masse des particules hypothétiques dont l'attraction gravitationnelle

entre elles serait aussi puissante que la force électrique entre deux électrons séparés de la même distance). Or la masse de Planck est environ une centaine de milliers de milliards de fois plus importante que la masse du Higgs. Ainsi, en dépit du fait que la particule de Higgs soit si lourde qu'un collisionneur géant de particules a été nécessaire pour la produire, nous nous interrogeons toujours : pourquoi la masse du Higgs est-elle si petite ?

Jim Baggott m'a suggéré d'ajouter ici quelques points de vue personnels concernant l'évolution des idées dans ce domaine. Je ne mentionnerai que deux points.

Comme il le décrit dans le chapitre 4, Philip Anderson avait déjà proposé, avant 1964, que les particules sans masse de Nambu-Goldstone ne représentent pas une conséquence inéluctable de la brisure de symétrie. Pourquoi donc certains théoriciens des particules et moi n'étions pas convaincus par l'argument d'Anderson ? Il serait bien fallacieux d'avancer qu'Anderson ne devait pas être pris au sérieux. De tous les théoriciens qui étaient impliqués dans la physique de la matière condensée, personne d'autre qu'Anderson n'avait perçu de manière aussi nette l'importance des principes de symétrie, qui se sont avérés d'une prépondérance cruciale en physique des particules.

Je pense que l'argument d'Anderson était généralement discrédité parce qu'il est fondé sur des analogies avec des phénomènes tels que la supraconductivité, qui sont non relativistes (ces phénomènes se produisent dans des domaines où la théorie de la relativité restreinte d'Einstein peut être ignorée sans risque). Or l'inéluctabilité des particules sans masse de Nambu-Goldstone avait été démontrée, de manière rigoureuse semblait-il, en 1962 par Goldstone, Salam et moi par le biais d'une preuve qui s'appuyait sur la validité explicite de la théorie de la relativité. Les théoriciens des particules étaient disposés à croire qu'Anderson avait raison dans le contexte non relativiste de la supraconductivité, mais pas dans la théorie des particules élémentaires, qui incorpore nécessairement la relativité. Les travaux des articles de 1964 établirent que notre preuve ne pouvait s'appliquer aux théories quantiques munies de particules médiatrices parce que, même si les phénomènes physiques traités dans ces théories vérifient le principe de

relativité, la formulation mathématique de celles-ci dans le cadre de la mécanique quantique ne le vérifie plus.

Cette pierre d'achoppement avec la relativité constituait également la raison pour laquelle je fus incapable après 1967, malgré un travail acharné, de démontrer ce que Salam et moi avions conjecturé, à savoir que les infinis aberrants qui apparaissaient dans la théorie électrofaible s'annulent tous, de la même manière que l'on avait déjà montré que les infinis s'annulent dans la théorie quantique de l'électromagnétisme seul. La relativité s'était montrée déterminante dans cette dernière démonstration. La preuve de l'annulation donnée par Gerard 't Hooft en 1971, décrite par Baggott au chapitre 5, utilise des techniques que 't Hooft avait développées avec Martinus Veltman, dans lesquelles les principes de la mécanique quantique sont extrapolés pour permettre à la théorie d'être formulée de manière cohérente avec la relativité.

Deuxième point : Baggott suggère au chapitre 4 que je n'avais pas mentionné les quarks dans mon article de 1967 proposant la théorie électrofaible, car j'avais conscience du fait que la théorie pouvait prédire des processus mettant en jeu des particules « étranges », qui n'étaient en fait pas observées. J'aurais aimé que ma raison fût aussi objective. En vérité, je n'ai pas fait allusion aux quarks dans la théorie tout simplement parce qu'en 1967 je ne croyais pas en leur existence. Personne n'en avait jamais observé, et il était difficile d'y croire parce que les quarks sont beaucoup plus lourds que les particules déjà observées à l'époque, telles que les protons et les neutrons, que nous supposions constituées de quarks !

Comme de nombreux autres théoriciens, je n'ai pleinement accepté l'existence des quarks qu'après le travail de David Gross, Frank Wilczek et David Politzer en 1973. Ils ont montré que dans la théorie des quarks et des forces nucléaires fortes, que l'on appelle la chromodynamique quantique, l'interaction forte devient plus faible lorsque la distance décroît. Certains d'entre nous réalisèrent alors que, dans cette situation non intuitive, la force forte entre les quarks deviendrait plus intense à mesure que ceux-ci s'éloignent, probablement si intense qu'il serait impossible de les séparer. Il n'existe toujours aucune preuve de cela, mais c'est ce que nous croyons en général. La chromodynamique quantique



est dorénavant une théorie largement validée, et personne n'a encore vu un quark isolé.

Je suis ravi de voir ce livre débiter à l'aube du XX<sup>e</sup> siècle avec Emmy Noether, qui appréhenda avant quiconque l'importance des principes de symétrie dans la nature. Cela permet de nous rappeler que l'œuvre des scientifiques contemporains n'est que l'ultime étape d'une grande tradition, consistant à tenter de deviner comment la nature fonctionne, en soumettant constamment nos intuitions au jugement de l'expérience. Le livre de Jim Baggott transmettra au lecteur la sensation enivrante de cette aventure historique.

Steven Weinberg

Le 6 juillet 2012.



# SOMMAIRE

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| PRÉFACE .....                                                  | V   |
| AVANT-PROPOS .....                                             | 1   |
| Prologue. Forme et substance .....                             | 5   |
| PARTIE I. L'INVENTION .....                                    | 17  |
| Chapitre 1. La poésie des idées logiques .....                 | 19  |
| Chapitre 2. Une excuse insuffisante .....                      | 35  |
| Chapitre 3. Les gens vont se sentir ridicules .....            | 47  |
| Chapitre 4. Appliquer les bonnes idées au mauvais problème ... | 63  |
| Chapitre 5. Je peux le faire .....                             | 81  |
| PARTIE II. LA DÉCOUVERTE.....                                  | 95  |
| Chapitre 6. Les courants neutres alternatifs .....             | 97  |
| Chapitre 7. Ce doit être des W ! .....                         | 113 |
| Chapitre 8. Passer en profondeur .....                         | 129 |
| Chapitre 9. Un instant magique .....                           | 141 |
| Chapitre 10. Le dilemme shakespearien .....                    | 161 |
| Épilogue. La construction de la masse .....                    | 185 |
| NOTES .....                                                    | 187 |
| GLOSSAIRE .....                                                | 201 |
| BIBLIOGRAPHIE .....                                            | 227 |
| Index .....                                                    | 231 |

