

LA PARTICULE DE DIEU

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

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.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} 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

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.

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).



© Dunod, Paris, 2013, pour la traduction française

ISBN 978-2-10-059717-8

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o 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 avons 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.

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 devions 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 pouvons 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

Préface

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^e 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

AVANT-PROPOS

L'annonce de la découverte d'un événement ressemblant étrangement au boson de Higgs, au CERN à Genève le 4 juillet 2012, a fait le tour du monde à la vitesse de l'éclair, tel un virus informatique particulièrement contagieux. Ce dernier triomphe de la physique des hautes énergies a été largement relayé dans la presse. La découverte était à la une des revues, elle fut annoncée dans tous les journaux télévisés, si bien qu'elle toucha le plus large public. Des signaux compatibles avec une particule ayant été supposée ou « inventée » en 1964 venaient d'être finalement découverts, 48 ans après, au prix de plusieurs milliards d'euros.

Alors, pourquoi tout ce remue-ménage ? Qu'est-ce que le boson de Higgs et pourquoi est-il si important ? Si cette nouvelle particule est vraiment le Higgs, qu'est-ce qu'elle nous enseigne au sujet du monde matériel et de l'évolution de l'Univers primordial ? Sa découverte méritait-elle vraiment tous ces efforts ?

Les réponses à ces interrogations résident dans l'histoire de ce que nous appelons le Modèle standard de la physique des particules. Comme son nom l'indique, c'est le cadre que les physiciens utilisent pour interpréter les constituants élémentaires de toute la matière et les forces qui assurent sa cohésion, ou sa dislocation. C'est un domaine d'étude élaboré après plusieurs décennies d'un incessant effort, qui incarne le plus bel accomplissement des physiciens afin d'appréhender le monde physique qui nous entoure.

Le Modèle standard n'est cependant pas une « théorie du Tout ». Il ne tient pas compte de la force de gravité. Ces dernières années, vous avez peut-être eu connaissance de nouvelles théories exotiques de la physique qui s'évertuent à unifier les forces fondamentales, y compris

la gravitation, comme, par exemple, la supersymétrie et les supercordes. En dépit des efforts de centaines de théoriciens impliqués dans ces projets, ces nouvelles théories demeurent spéculatives et sont peu ou pas étayées par des expériences. Pour le moment, et ce malgré quelques imperfections relevées dès sa naissance vers la fin des années 1970, c'est le Modèle standard qui est au cœur de l'action.

Le boson de Higgs est crucial dans le Modèle standard parce qu'il implique l'existence d'un champ de Higgs, un champ invisible d'énergie dans lequel baigne l'Univers entier. Sans celui-ci, les particules élémentaires qui nous constituent, vous et moi, ainsi que l'Univers visible, n'auraient pas de masse. Sans le champ de Higgs, la masse ne pourrait émerger et rien ne pourrait *exister*.

Il s'avère que nous tenons énormément à l'existence de ce champ. C'est l'une des raisons pour lesquelles le boson de Higgs, la particule du champ de Higgs, avait été désigné par les revues de vulgarisation comme la *particule de Dieu*. C'est une désignation cordialement méprisée par les scientifiques, car elle exagère l'importance de cette particule en plus de faire allusion à la relation parfois inconfortable entre physique et théologie. C'est, malgré tout, un nom très prisé des journalistes scientifiques et des vulgarisateurs.

Un grand nombre des conséquences prédites par le champ de Higgs furent corroborées dans les expériences des collisionneurs de particules, au début des années 1980. Mais inférer l'existence du champ est une chose bien différente que de détecter sa particule. Il est par conséquent extrêmement rassurant de savoir que ce champ est très probablement omniprésent. L'éventualité que le boson de Higgs ne puisse pas être découvert était palpable, et les conséquences pour le Modèle standard auraient été dévastatrices.

J'ai commencé à écrire ce livre en juin 2010, deux ans avant la découverte. Je venais de mettre la dernière main au manuscrit d'un autre ouvrage, intitulé *The Quantum Story: A History in 40 Moments*, qui, comme son nom l'indique, relate l'histoire de la physique quantique de 1900 à nos jours. Le présent livre couvre les développements du Modèle standard et l'invention du champ de Higgs, ainsi que sa particule. Il y a quelques mois, le *Large Hadron Collider* (Grand collisionneur de

hadrons) du CERN atteignait le record de 7 milliards d'électronvolts dans les énergies de collision proton-proton, et j'ai réalisé qu'une découverte *pouvait* être possible dans les années qui suivraient. Par chance, j'avais raison.

The Quantum Story a été publié en février 2011 et le présent ouvrage se fonde en partie sur ce travail antérieur.

Je remercie Latha Menon et les représentants d'*Oxford University Press*, qui furent prêts, non sans risque, à prendre en charge un livre au sujet d'une particule qui n'avait pas encore été découverte. J'ai suivi les développements au CERN à travers les communiqués officiels, mais je dois aussi beaucoup à un grand nombre de blogueurs sur la physique des hautes énergies, parmi eux Philip Gibbs, Tommaso Dorigo, Peter Woit, Adam Falkowski, Matt Strassler et Jon Butterworth. Je remercie également Jon Butterworth, Sophie Tesauri, James Gillies, Laurette Ponce et Lyndon Evans pour avoir pris le temps d'échanger avec moi et m'avoir fait partager le sentiment d'excitation grandissant. Je voudrais également exprimer ma reconnaissance envers les professeurs David Miller et Peter Woit, qui ont lu et commenté l'épreuve manuscrite, et au professeur Steven Weinberg, qui a également lu le manuscrit et aimablement contribué en donnant son point de vue personnel dans la préface. Soyez assurés que les erreurs qui demeurent sont de moi.

Prologue

FORME ET SUBSTANCE

De quoi le monde est-il fait ?

C'est le genre de question très simple qui taraude l'esprit de l'Homme depuis qu'il est capable de raisonnement. Certes, nous nous la posons dorénavant de façon plus raffinée et subtile, et les réponses sont devenues de plus en plus complexes, et ardues à découvrir. Mais ne vous méprenez pas : au fond, cette question reste élémentaire.

Il y a 2 500 ans, tous les philosophes de la Grèce antique devaient se contenter de leur sens de la beauté et de l'harmonie dans la nature, ainsi que du pouvoir de l'imagination et de la logique appliqué aux choses qu'ils percevaient avec un discernement limité. Rétrospectivement, il est extraordinaire qu'ils aient embrassé une connaissance aussi vaste.

Les Grecs établirent avec soin la distinction entre forme et substance. Le monde est composé d'une substance matérielle qui peut prendre quantité d'aspects différents. Empédocle, philosophe sicilien du V^e siècle av. J.-C., suggéra que cette pluralité pouvait se réduire à quatre formes fondamentales, que nous appelons aujourd'hui les « éléments classiques » : la terre, l'air, le feu et l'eau. On considérait ces éléments comme éternels et indestructibles, unis selon des alliances romantiques par le truchement de la force attractive de l'Amitié et séparés par la force répulsive de la Haine, afin de constituer toutes choses dans le monde.

Une autre école de pensée, qui vit le jour avec le philosophe du V^e siècle av. J.-C. Leucippe (et plus étroitement associée à son disciple Démocrite), imaginait le monde constitué de minuscules particules matérielles

insécables et indestructibles (appelées atomes) et d'espace inoccupé (le vide). Les atomes représentaient les constituants élémentaires de toute substance matérielle, rendant compte de toute la matière observée. Comme l'argumenta Leucippe, puisque la substance ne peut, à coup sûr, être indéfiniment divisée, la nécessaire existence des atomes était une question de principe. Si cela avait été possible, alors nous aurions pu diviser la matière indéfiniment jusqu'à ce qu'il ne reste plus rien, en contradiction flagrante avec la loi de la conservation de la matière, considérée comme irréfutable à l'époque.

Environ un siècle plus tard, Platon développa une théorie qui expliquait comment les atomes (la substance) sont structurés afin de composer les quatre éléments (les formes). Il identifiait chacun de ces éléments à un solide géométrique (dit « de Platon »), et alléguait dans le *Timée* que les faces de chaque solide pouvaient en dernier ressort se décomposer en systèmes de triangles, représentant les atomes constitutifs des éléments. En réarrangeant les motifs de triangles – les atomes – il devenait possible de convertir un élément en un autre et de combiner plusieurs d'entre eux pour produire de nouvelles formes¹.

Il semble logique qu'il y ait des constituants ultimes, une réalité indéniable qui donne corps au monde que nous contemplons autour de nous et qui lui lègue sa forme et son apparence. Si la matière était infiniment divisible, nous pourrions parvenir au point où les constituants eux-mêmes deviennent éphémères – au point de non-existence. Il n'y aurait alors aucun composant élémentaire, et tout ce qui subsisterait serait ces interactions entre fantômes sibyllins et immatériels qui engendreraient l'*illusion* de la substance.

Aussi rebutante que paraisse cette éventualité, c'est précisément celle que la physique moderne a révélée, dans une large mesure. La masse, nous en sommes désormais persuadés, n'est pas une propriété intrinsèque ou une qualité « primordiale » des composants élémentaires ultimes de la nature. En réalité, il n'existe rien de tel. La masse dérive entièrement de l'énergie des interactions mettant en jeu des particules élémentaires naturellement dénuées de masse.

Les physiciens ont persisté à diviser et, une fois parvenus au bout, ils n'ont rien trouvé du tout.