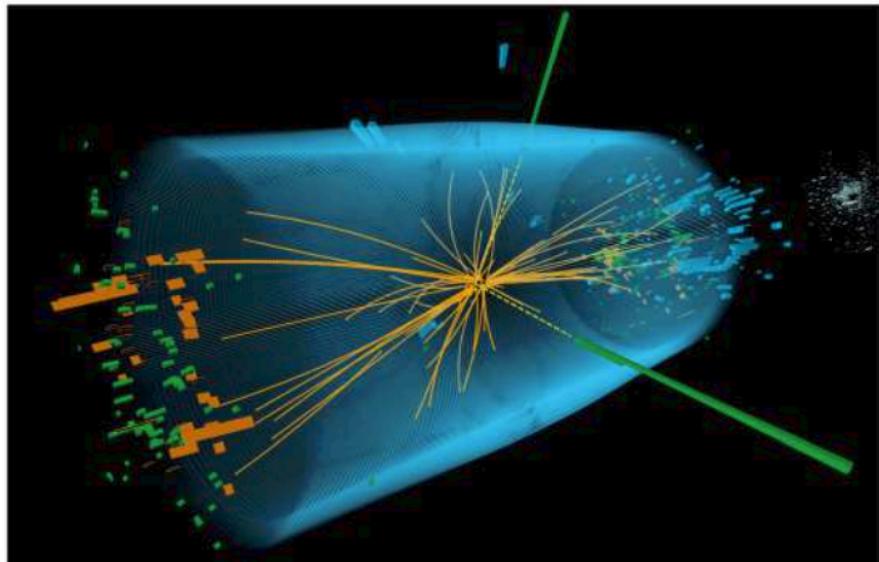


Gilles Cohen-  
Tannoudji  
Michel Spiro

# Le boson et le chapeau mexicain



folio **essais**  
IN ÉDIT

COLLECTION  
FOLIO ESSAIS

Gilles Cohen-Tannoudji  
Michel Spiro

# Le boson et le chapeau mexicain

UN NOUVEAU GRAND RÉCIT  
DE L'UNIVERS

Postface de Michel Serres  
*de l'Académie française*

Gallimard

© *Éditions Gallimard, 2013.*

Michel Spiro, président du Conseil du CERN depuis janvier 2010 jusqu'à fin 2012, a été directeur de l'IN2P3 (Institut national de physique nucléaire et de physique des particules) au CNRS, chef de département au CEA et président du comité scientifique des expériences auprès du LEP (Grand Collisionneur électron-positon du CERN) de 1998 à 2001.

Gilles Cohen-Tannoudji, chercheur émérite au laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LAR-SIM) du CEA, est co-directeur du Centre de recherche Ferdinand Gonseth à Lausanne. Il a enseigné le modèle standard à l'université d'Orsay et l'histoire des idées en physique à la Sorbonne.

Michel Spiro est co-auteur, avec Gilles Cohen-Tannoudji, de *La matière-espace-temps* (Fayard, 1986) et Gilles Cohen-Tannoudji a publié, avec Jean Pierre Baton, *L'horizon des particules* (Gallimard, 1989).

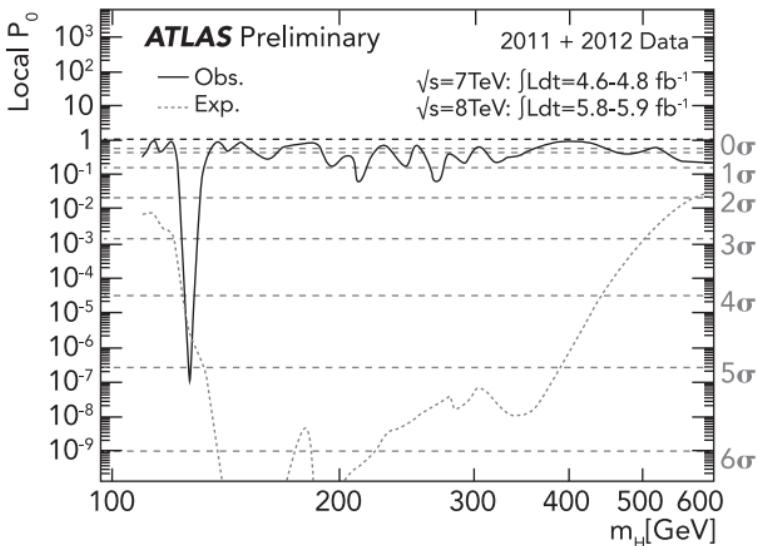


*À la mémoire  
de deux grandes figures disparues du CERN,  
Georges Charpak, prix Nobel,  
et Maurice Jacob,  
qui dirigea la thèse de l'un d'entre nous.*



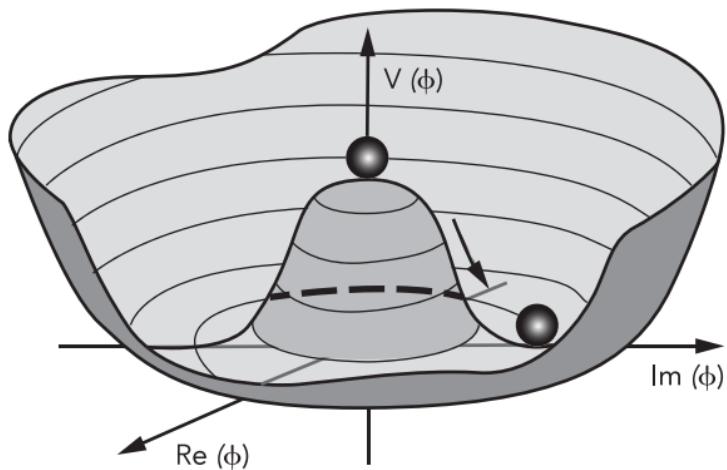
Il faut rêver l'impossible pour réaliser tout ce qui est possible.

GOETHE



Signal du boson BEH observé  
par le détecteur ATLAS

Sur cette figure est portée, en fonction de la masse supposée du boson BEH, la probabilité que le signal observé ne soit pas un vrai signal, mais qu'il ne soit dû qu'à une fluctuation statistique du bruit de fond estimé. Le signal est dit à « cinq écarts standards » ( $5\sigma$ ), ce qui signifie que cette probabilité est inférieure au millionième.



Potentiel en forme de chapeau mexicain

Potentiel d'auto-interaction en fonction de la partie réelle et de la partie imaginaire du champ complexe BEH. La symétrie de révolution de la figure correspond à l'invariance par changement de la phase du champ BEH.



## *Avant-propos*

### LE BOSON ET LE CHAPEAU MEXICAIN : UNE AVENTURE DU CERN

Le 4 juillet 2012, le CERN, l'organisation européenne pour la physique des particules, annonçait, dans une conférence mondialement retransmise, que deux expériences, menées chacune par plus de trois mille chercheurs du monde entier, avaient permis de découvrir dans les collisions produites par le LHC, le Grand Collisionneur de protons du CERN près de Genève, une nouvelle particule, le *boson*, qui a jusqu'à présent toutes les caractéristiques attendues de la pièce manquante pour compléter le modèle standard de la physique des particules et pour éventuellement le dépasser.

Le LHC est le plus puissant et le plus grand (27 km de circonférence) accélérateur de protons jamais construit. Produisant des collisions de protons d'une violence inouïe, il réalise en laboratoire des « mini » big bang permettant d'explorer la matière dans des conditions extrêmes. Cette découverte, au CERN, avec le LHC, est l'aboutissement de quarante années de recherche, un grand bond en avant dans la compréhension de la matière et de ses origines. Elle concrétise l'idéal des fondateurs du CERN : redonner à l'Europe

après la Seconde Guerre mondiale un flambeau scientifique, rassembler autour de ce flambeau par-delà les frontières, par-delà les différences culturelles, dans un idéal de connaissance, de découverte et d'innovation partagées.

Pour apprécier les enjeux du gigantesque programme de recherche qui vient d'aboutir à ce premier résultat, une mise en perspective historique s'impose.

Alors qu'il avait fallu près de vingt-cinq siècles pour que l'hypothèse atomique fût acceptée comme une véritable conception scientifique du monde, en quelques dizaines d'années, plusieurs niveaux d'élémentarité dans la structure de la matière ont été mis en évidence : l'atome sous la molécule, le noyau sous l'atome, le hadron sous le noyau, et, au milieu des années soixante, le quark sous le hadron. En même temps que se dévoilaient ces niveaux d'élémentarité, se faisait jour l'idée que, dans tout l'univers, la dynamique de ces structures emboîtées relevait de quatre et seulement quatre interactions qualifiées de fondamentales, l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique et les deux interactions nucléaires, la forte et la faible, qui n'ont été découvertes qu'au xx<sup>e</sup> siècle. Au xix<sup>e</sup> siècle, les deux premières interactions fondamentales étaient décrites par des théories prédictives qui ont constitué le socle de ce que l'on appelle maintenant le modèle standard : la théorie électromagnétique de la lumière de Maxwell pour l'interaction électromagnétique et la théorie de la gravitation universelle de Newton pour l'interaction gravitationnelle.

Historiquement, c'est dans le domaine de la physique des particules que l'expression de modèle standard a été adoptée, mais elle est maintenant largement

utilisée pour désigner la théorie de référence d'une discipline scientifique, l'ensemble des connaissances théoriques historiquement accumulées et expérimentalement confirmées, qui ne seront plus complètement invalidées mais qui risquent seulement d'être dépassées ou englobées dans de nouvelles théories plus générales. Ainsi, on peut dire que la théorie de Maxwell et celle de Newton ont fait partie du modèle standard, mais qu'elles ont ensuite été dépassées et englobées dans des théories plus précises prenant en compte les contraintes de la relativité et des quanta, qui sont celles du modèle standard d'aujourd'hui.

Le premier déplacement du modèle standard intervenu au xx<sup>e</sup> siècle concerne la gravitation : la théorie de la relativité générale d'Einstein est au fondement d'une théorie de la gravitation universelle qui dépasse celle de Newton, la redonne à l'approximation non relativiste et sert maintenant de base au modèle standard de la cosmologie contemporaine, le modèle du big bang. À la fin des années quarante s'est produit le second déplacement du modèle standard, avec l'élaboration de l'*électrodynamique quantique* (QED pour *quantum electrodynamics*), théorie relativiste et quantique de l'interaction électromagnétique, qui dépasse celle de Maxwell, la redonne à l'approximation non quantique, et constitue la première pierre de l'édification du modèle standard de la physique des particules et des interactions fondamentales non gravitationnelles. QED est la théorie sur le modèle de laquelle ont été élaborées dès les années soixante, une fois qu'eut été découvert le niveau des quarks, la *chromodynamique quantique* (ou QCD pour *quantum chromodynamics*), d'une part, qui est la théorie de l'interaction forte au niveau élémentaire, et la *théorie unifiée* élec-

*trofaible*, d'autre part, qui est la synthèse de QED et d'une théorie quantique de l'interaction faible. C'est dans le cadre de cette unification électrofaible que se situait la recherche du fameux boson qui a abouti à la découverte annoncée en juillet 2012.

Soit dit en passant, il est peut-être temps maintenant d'expliquer le titre que nous avons choisi pour cet ouvrage : la clé de voûte de l'unification électrofaible réside dans un mécanisme dit de brisure spontanée de symétrie, inspiré de la physique de la matière condensée, qui fait intervenir une particule, le *boson*, qui donne de la masse aux particules avec lesquelles elle interagit et qui est autocouplée dans un potentiel en *forme de chapeau mexicain*. Ce mécanisme de brisure de symétrie, impliquant cette forme de potentiel, a été imaginé en 1964 par trois physiciens, Robert Brout (1929-2011) et François Englert<sup>1</sup>\*, d'une part, et Peter Higgs<sup>2</sup>, d'autre part, qui l'ont publié indépendamment à quelques semaines d'intervalle. Pour des raisons que nous ne souhaitons pas discuter, la particule, le boson qui a découlé de l'intégration de ce mécanisme au modèle standard de la physique des particules, a été baptisée le boson de Higgs. Nous l'appellerons dans les chapitres qui suivent le boson de Brout, Englert et Higgs, ou en abrégé le boson BEH, et le mécanisme auquel il est associé, le mécanisme BEH. Nous consacrerons la deuxième partie de l'ouvrage, intitulée « La nécessité du boson », à démontrer le mécanisme BEH, à tenter d'expliquer à un public non spécialiste en quoi il consiste, à montrer les défis théoriques, expérimentaux, instrumen-

\* Les notes sont regroupées en fin de volume, p. 481.

taux et organisationnels, qu'il a fallu relever pour mener à bien les recherches qui ont abouti à la découverte annoncée en juillet 2012. Nous essaierons aussi d'analyser les raisons du succès obtenu.

La mise en perspective historique évoquée plus haut, faisant apparaître les noms de Newton, Maxwell et Einstein, permet déjà d'apprécier la portée de ces recherches, mais un autre élément vient encore en rehausser l'enjeu : la physique des particules et la cosmologie scientifique qui s'est aussi dotée d'un modèle standard, la théorie du big bang qui rend compte de l'expansion de l'univers, ont tendance à se rapprocher, à collaborer pour nous offrir, en relation avec les autres branches de la physique et avec un grand nombre d'autres disciplines scientifiques, une authentique cosmogonie scientifique, à savoir un *grand récit*, celui d'un univers qui n'est pas seulement en expansion, mais aussi *en devenir, en évolution*, depuis une phase primordiale, quantique, relativiste de haute énergie (parce que proche du big bang) où toutes les particules sont indifférenciées et sans masse, où toutes les interactions sont unifiées, jusqu'à l'état dans lequel il se laisse aujourd'hui observer, en passant par une série de *transitions de phases*, au cours desquelles les particules se différencient (certaines d'entre elles acquérant de la masse), les interactions se séparent, les symétries se brisent, des nouveaux états et structures de la matière émergent. C'est ce grand récit, profondément renouvelé grâce à la découverte du boson et aux impressionnantes progrès récents de la cosmologie observationnelle, qui fera l'objet de la troisième partie de l'ouvrage, intitulée « L'héritage du boson ». La transition, objet des recherches qui ont abouti à la découverte du boson, serait inter-

venue à la plus haute énergie, c'est-à-dire dans le passé le plus lointain, qu'il soit possible d'explorer expérimentalement, c'est celle dans laquelle la synthèse électrofaible se serait défaite en donnant naissance d'une part à l'interaction électromagnétique dont relève la lumière (le *fiat lux* en quelque sorte !) et d'autre part à l'interaction faible de courte portée, responsable des réactions thermonucléaires fournissant l'énergie des étoiles ; de plus, c'est dans cette transition que les quarks et l'électron, les constituants de la matière dont nous sommes faits, seraient *devenus* massifs. Et voici donc expliqué le sous-titre que nous donnons à notre ouvrage.

L'élaboration, la composition dirons-nous, de ce grand récit de la matière et de l'univers, est le résultat des relations interdisciplinaires qui se nouent entre les théories au fondement du modèle standard (la théorie quantique des champs et la relativité générale) et celles — toutes les branches de la physique, voire l'ensemble des sciences de la nature et de la société — qui, au travers du recours aux méthodes statistiques, font sa place au *hasard* et qui sont susceptibles d'expliquer l'*émergence* de nouveauté. Nous nous attacherons à montrer la pertinence de la méthodologie dite des *théories effectives* qui permet d'articuler le fondamental, l'universel et l'émergent.

Mais l'héritage du boson ou, plus précisément, celui de l'aventure humaine qu'ont été sa recherche et sa découverte, ne concerne pas que l'histoire et la philosophie des sciences, il concerne aussi, nous en sommes convaincus, l'histoire tout court, l'histoire des civilisations humaines : sa portée a une dimension anthropologique que nous souhaitons évoquer en conclusion de l'ouvrage. C'est pourquoi nous ne voulons pas clore

cet avant-propos sans avoir évoqué l'histoire de l'auteur de la découverte du boson, le CERN, le contexte géopolitique de sa création, les arrière-pensées et les anticipations visionnaires qui ont présidé à sa création.

La citation de Goethe que nous avons placée en exergue de cet avant-propos nous permet d'illustrer les rapports de la physique des particules et de la société à travers l'exemple du CERN et ses fondateurs visionnaires : révéler les secrets de la nature, rassembler, comme nous l'avons dit, par-delà les frontières, innover et former, mettre en œuvre une mondialisation collaborative réussie, un héritage des Lumières.

Après une période où l'Europe a dominé la scène mondiale scientifique, jusqu'à l'avènement du nazisme, le mouvement s'est inversé. Le nazisme, la guerre ont provoqué l'exil des meilleurs physiciens européens : Einstein, Fermi, pour ne citer que deux des plus prestigieux. Il est vrai que, depuis le siècle des Lumières, la recherche fondamentale, qui n'a pour but principal que de faire bouger les frontières de la connaissance, rime avec liberté de penser, liberté de chercher, libre circulation des personnes et des idées. Cela est d'ailleurs maintenant inscrit dans la charte du chercheur européen. Cette activité était donc totalement incompatible avec le nazisme de même qu'elle a pu l'être, dans une certaine mesure aussi, plus tard avec le régime soviétique. La solidarité des scientifiques à travers le monde a toujours été une réalité dans ces circonstances, l'aide et l'accueil de scientifiques étrangers en difficulté, un devoir.

Aux États-Unis, les scientifiques de la physique du noyau, particules élémentaires de l'époque (souvent des Européens émigrés), se mobilisent à partir de 1942,

sous la direction de Robert Oppenheimer et du général Leslie Groves, et suite à une lettre d'Albert Einstein au président Roosevelt, à travers le projet Manhattan. Le projet Manhattan est le nom de code du projet conduit pendant la Seconde Guerre mondiale qui permit aux États-Unis, assistés par le Royaume-Uni, le Canada et des chercheurs européens de réaliser la première bombe atomique de l'histoire en 1945.

Après la guerre, l'Europe est dévastée. Première en physique avant guerre, elle a perdu ses savants, n'a plus d'installations ni de grands centres de recherche qui puissent rivaliser avec les États-Unis triomphants et l'URSS montante. Tout est à reconstruire pour éviter la poursuite de la fuite des cerveaux et créer une Europe capable de se mesurer aux deux grandes puissances dans le climat de guerre froide qui s'installe. Les circonstances sont donc favorables pour constituer une Europe de la science en commençant par l'atome.

Après la guerre, l'atome ou plus précisément le noyau de l'atome, l'infiniment petit de l'époque, jouit d'un prestige civil et militaire. Il évoque à la fois les concepts de pointe, les technologies qui donnent la supériorité civile (centrales énergétiques nucléaires) et militaire (bombe nucléaire). L'atome est ainsi au cœur des enjeux de la connaissance, au cœur de la compétitivité économique, au cœur du secret d'État et de la supériorité militaire. Cet argument va jouer pour la création du CERN dans une Europe en reconstruction. Il sera ainsi la première organisation scientifique européenne.

La suite de l'aventure nucléaire qui avait donné naissance aux premières centrales et aux premières bombes nucléaires à travers le projet Manhattan sem-

*Table des matières*

531

Théories effectives et lois fondamentales	457
Théories effectives et approche quantitative de l'émergence	460
<i>L'interprétation moderne de la physique quantique et l'émergence d'un « monde quasi classique »</i>	463
<i>L'émergence comme affleurement universel du fondamental à travers l'effectif</i>	466
Bilan épistémologique de la révolution quantique et relativiste	468
Le grand récit universaliste et l'impact politico-social de la révolution scientifique du xx <sup>e</sup> siècle	473

## APPENDICES

Remerciements	479
Notes	481

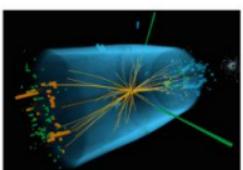
## POSTFACE

**UNE FUGUE À TROIS RÉCITS UNIVERSEL**  
*par Michel Serres*

INDEX GÉNÉRAL	515
---------------	-----

Gilles Cohen-  
Tannoudji  
Michel Spiro

Le boson et le  
chapeau mexicain



folio **essais**  
INÉDIT

# Le boson et le chapeau mexicain

## Gilles Cohen- Tannoudji et Michel Spiro

Cette édition électronique du livre  
*Le boson et le chapeau mexicain* de Gilles Cohen-Tannoudji  
et Michel Spiro  
a été réalisée le 31 mai 2013  
par les Éditions Gallimard.

Elle repose sur l'édition papier du même ouvrage  
(ISBN : 9782070355495 - Numéro d'édition : 156122).

Code Sodis : N44226 - ISBN : 9782072411649

Numéro d'édition : 229802.