



HAL
open science

Le boson de Higgs, une découverte historique de portée anthropologique

Gilles Cohen-Tannoudji

► **To cite this version:**

Gilles Cohen-Tannoudji. Le boson de Higgs, une découverte historique de portée anthropologique. La Pensée, 2013, N°375, pp.69 - 80. 10.3917/lp.375.0069 . hal-03719066

HAL Id: hal-03719066

<https://hal.science/hal-03719066>

Submitted on 10 Jul 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

LE BOSON DE HIGGS, UNE DÉCOUVERTE HISTORIQUE DE PORTÉE ANTHROPOLOGIQUE

[Gilles Cohen-Tannoudji](#)

Fondation Gabriel Péri | « La Pensée »

2013/3 N° 375 | pages 69 à 80

ISSN 0031-4773

DOI 10.3917/lp.375.0069

Article disponible en ligne à l'adresse :

<https://www.cairn.info/revue-la-pensee-2013-3-page-69.htm>

Distribution électronique Cairn.info pour Fondation Gabriel Péri.

© Fondation Gabriel Péri. Tous droits réservés pour tous pays.

La reproduction ou représentation de cet article, notamment par photocopie, n'est autorisée que dans les limites des conditions générales d'utilisation du site ou, le cas échéant, des conditions générales de la licence souscrite par votre établissement. Toute autre reproduction ou représentation, en tout ou partie, sous quelque forme et de quelque manière que ce soit, est interdite sauf accord préalable et écrit de l'éditeur, en dehors des cas prévus par la législation en vigueur en France. Il est précisé que son stockage dans une base de données est également interdit.

LE BOSON DE HIGGS, UNE DÉCOUVERTE HISTORIQUE DE PORTÉE ANTHROPOLOGIQUE

Gilles
Cohen-Tannoudji *

L'annonce, le 4 juillet 2012, de la découverte au CERN, à l'aide du grand collisionneur de hadrons (LHC), de la particule appelée *boson de Higgs* a eu un retentissement médiatique considérable : son annonce, faite sur le web, a été suivie par un milliard d'internautes et téléspectateurs ; elle a fait l'objet de plusieurs ouvrages, dont celui que j'ai publié avec Michel Spiro, dans la collection folio essais de Gallimard, *Le boson et le chapeau mexicain – un nouveau grand récit de l'univers*. De fait, cette découverte, à six mille signataires (deux collaborations impliquant chacune trois mille physiciens) est le couronnement de ce que l'on a pu qualifier de plus grande expérience scientifique jamais entreprise ; elle est le résultat de recherches expérimentales menées depuis près de cinquante ans, après la publication en 1964 d'abord par Brout et Englert, puis par Higgs, de deux articles théoriques prédisant l'existence de cette particule, qu'il serait d'ailleurs plus conforme à la justice d'appeler le boson de Brout Englert Higgs (BEH).

C'est à tenter de faire apprécier aux lecteurs de *La Pensée* la signification scientifique de cette découverte, la hauteur des défis qu'il a fallu relever pour mener à bien les recherches qui l'ont rendue possible, ainsi que son immense portée au plan philosophique, voire anthropologique, qu'est consacré le présent article.

MODÈLES STANDARDS ET RÉVOLUTIONS SCIENTIFIQUES

Le boson BEH était le chaînon manquant de ce que l'on appelle le *modèle standard* de la physique des particules, une discipline née au xx^e, siècle qui vise à identifier les constituants

* Laboratoire de recherche sur les sciences de la matière (LARSIM) CEA-Saclay.

élémentaires de la matière et à étudier les interactions qualifiées de fondamentales (l'interaction gravitationnelle, l'interaction électromagnétique et les deux interactions nucléaires, la forte et la faible) dans lesquelles ils sont impliqués. Il est nécessaire, pour pouvoir faire apprécier la portée de la découverte du boson, de s'expliquer sur la signification de ce concept de modèle standard. Historiquement, c'est en physique des particules que cette expression 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.

La physique des particules ne s'est constituée comme une branche à part entière de la recherche fondamentale qu'après la Seconde Guerre mondiale ; elle est au cœur de la révolution scientifique du xx^e siècle initiée par les remises en causes majeures de la physique classique par la théorie de la relativité et par la mécanique quantique. Au tournant du xx^e siècle, la physique classique était parvenue à une véritable apogée qui représentait l'aboutissement de la première grande révolution scientifique qui marque le début, à la Renaissance, de la science moderne et qui est un élément constitutif du vaste mouvement culturel et philosophique qui s'est épanoui au xviii^e siècle, le siècle des Lumières. Cette apogée consacrait le succès de trois grandes synthèses théoriques rendant possible une compréhension satisfaisante de l'ensemble des phénomènes physiques qui se prêtaient alors à l'observation ou à l'expérimentation :

- La synthèse de la mécanique terrestre et de la mécanique céleste réalisée grâce à la *mécanique rationnelle* et à la *théorie de la gravitation universelle* de Galilée, Kepler et Newton.
- La synthèse de l'électricité, du magnétisme et de l'optique réalisée grâce à la *théorie électromagnétique de la lumière* de Faraday, Maxwell et Hertz.
- La synthèse de la conception atomiste des philosophes de l'Antiquité et de la mécanique grâce au recours à la statistique dans la *théorie moléculaire de la matière* et la *thermodynamique statistique* de Maxwell et Boltzmann.

C'est à l'ensemble de ces trois synthèses, théoriques que peut, à mon avis, s'appliquer le concept de modèle standard comme marqueur de la révolution scientifique de la physique classique : en effet, si chacune de ces trois théories a été généralisée et englobée dans celles apparues au xx^e siècle, aucune d'elles n'a été complètement invalidée, toutes gardent leur pertinence comme approximations de celles qui les ont dépassées. Au tournant du xx^e siècle, les succès des trois théories de l'apogée de la physique classique étaient tels qu'ils faisaient dire à certains que la physique était pour l'essentiel achevée et qu'il ne restait plus qu'à améliorer de quelques décimales la précision des mesures. Cependant, les quelques problèmes qui restaient en suspens et qui semblaient n'être que purement académiques, comme l'effet photoélectrique, le rayonnement du corps noir ou l'avance du périhélie de Mercure, ont suffi à mettre toute la physique classique en crise et à rendre nécessaire la révolution scientifique du xx^e siècle.

Les trois coups de ce grand chambardement ont été frappés en 1905, l'année miraculeuse d'Einstein au cours de laquelle :

- il a remis en cause la partie la plus fondamentale de la mécanique, la cinématique, qui est la doctrine de l'espace et du temps avec la théorie de la relativité ;
- il a mis en chantier la physique quantique en élucidant l'effet photoélectrique qui défait la théorie électromagnétique de la lumière, grâce à une réinterprétation des travaux de Planck sur le rayonnement du corps noir en termes de quanta d'énergie ;
- il a élaboré une théorie du mouvement brownien qui a conduit, quelques années plus tard, Jean Perrin à réaliser des expériences lui permettant en quelque sorte de compter les atomes et donc de prouver de manière irréfutable leur réalité.

Ces travaux d'Einstein sont le point de départ de la révolution scientifique du xx^e siècle marquée par le dépassement du modèle standard de la physique classique. Le premier dépassement du modèle standard intervenu concerne la gravitation : la théorie de la *relativité générale* d'Einstein, qui étend la théorie de la relativité dite restreinte qu'il avait établie en 1905, 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 dépassement du modèle standard, avec l'élaboration de l'*électrodynamique quantique* (QED pour Quantum Electro-Dynamics), 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 l'archétype de la *théorie quantique des champs* qui prend simultanément en compte les contraintes de la relativité et de la mécanique quantique. Une fois qu'eut été découvert le niveau des quarks, les constituants élémentaires du proton et du neutron et des hadrons (les particules qui participent à toutes les interactions, y compris l'interaction forte), QED a servi de modèle à l'élaboration de la *chromodynamique quantique* (ou QCD pour Quantum ChromoDynamics), d'une part, qui est la théorie de l'interaction forte au niveau des quarks, et la *théorie unifiée électrofaible*, 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.

LE GRAND RÉCIT DE L'UNIVERS : LA DIMENSION COSMOGONIQUE DE LA RÉVOLUTION SCIENTIFIQUE DU XX^e SIÈCLE

Cette rapide mise en perspective historique, 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 : il s'agit du rapprochement de la physique des particules et du modèle cosmologique du big bang qui leur confère une dimension temporelle. La représentation qui se dégage de ce rapprochement est celle d'un univers

qui n'est pas seulement en expansion, mais aussi *en devenir, en évolution*, depuis une phase primordiale, 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, de nouvelles structures émergent, des nouveaux états de la matière apparaissent. La transition, objet des recherches qui ont abouti à la découverte du boson, serait intervenue à la plus haute énergie, c'est-à-dire dans le passé le plus lointain, qu'il est possible d'explorer expérimentalement, celle dans laquelle la synthèse électrofaible se serait défaire 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.

LE BOSON DE BROUT ENGLERT HIGGS, LA CLÉ DE VOÛTE DU NOUVEAU MODÈLE STANDARD DE LA PHYSIQUE

Je reviendrai à la fin de l'article sur le bilan épistémologique, philosophique et anthropologique qu'il devient maintenant possible de tirer de cette révolution scientifique, mais si, comme je le pense, le nouveau modèle standard est le marqueur de cette révolution scientifique, il est nécessaire de prendre le temps d'expliquer à un public non spécialiste, en termes aussi peu techniques que possible, en quoi le boson BEH en est, avec le mécanisme qui lui est associé, la clé de voûte. De telles explications peuvent être trouvées dans notre livre écrit avec Michel Spiro cité plus haut : elles en occupent plus de la moitié des 544 pages de l'ouvrage ; il ne peut être question de les reprendre ici en détail, mais nous pouvons au moins en résumer les grandes lignes.

L'invariance de jauge, un principe directeur

À première vue, l'interaction électromagnétique et l'interaction faible semblent aussi différentes l'une de l'autre que possible : l'interaction faible, responsable de la radioactivité β et des réactions de fusion thermonucléaire transformant l'hydrogène en hélium au cœur des étoiles, est une interaction de très faible intensité et de très courte portée, elle viole de façon maximale l'invariance par *parité d'espace* (changement de signe des coordonnées d'espace) alors que l'interaction électromagnétique (qui a des effets macroscopiques) est d'assez forte intensité et de portée infinie et est invariante par *parité d'espace*. Pourtant, l'aspect le plus attrayant du modèle standard est la perspective de l'unification de ces deux interactions fondamentales : tous ses succès renforcent en effet l'idée qu'elles ont une origine commune.

En théorie quantique des champs, la théorie à la base du modèle standard de la physique des particules, toute l'information concernant une interaction fondamentale, à

savoir les propriétés (masses, spins, charges) des constituants élémentaires de la matière qui y sont impliqués, celles des particules qui la transmettent, les paramètres de couplage qui déterminent son intensité au niveau élémentaire, et, de manière générale, ses propriétés d'invariance et les lois de conservation auxquelles elle obéit, est encodée dans ce que l'on appelle son *lagrangien*, en quelque sorte, son « ADN ». Une fois connu ce lagrangien, il devient possible, en principe, de calculer par approximations successives, au moyen de ce que l'on appelle *le développement perturbatif*, les probabilités des événements expérimentalement produits dans des réactions relevant de l'interaction fondamentale considérée. Encore faut-il, pour que ce calcul soit possible, que l'on ait pu surmonter la difficulté des infinis qui peuvent apparaître dans les calculs de ce développement perturbatif. Les théories pour lesquelles cet obstacle peut être surmonté sont dites « *renormalisables* », et ce sont de telles théories qui peuvent, de manière fiable, être comparées à l'expérience que l'on a recherchées pour toutes les interactions fondamentales.

Dans le modèle standard, le *principe d'invariance de jauge* a joué le rôle d'un véritable principe directeur, car il permet, d'une part, de déterminer la forme même du lagrangien et, d'autre part, de prouver que les théories qui le satisfont sont renormalisables. On dit d'une théorie qu'elle est à *invariance locale de jauge*, ou que c'est une *théorie de jauge*, si son lagrangien est invariant par les transformations d'un groupe de symétrie dépendant du point d'espace-temps où elles sont appliquées. L'électrodynamique quantique, la théorie quantique de l'interaction électromagnétique des électrons, vérifiée expérimentalement avec une incroyable précision dès la fin des années quarante, est l'archétype d'une théorie de jauge renormalisable. Dans cette théorie, les électrons et leurs antiparticules, les positons, interagissent par échange du photon, le *boson de jauge* qui transmet l'interaction, une particule de masse nulle.

La symétrie de jauge a été généralisée à des groupes plus complexes que celui de l'invariance de jauge de l'électrodynamique, et on s'est attaché à découvrir, pour l'interaction forte et l'interaction faible, des théories de jauge avec l'espoir qu'elles aussi soient renormalisables. La construction du modèle standard représente l'aboutissement de cette recherche.

Les défis théoriques de l'unification électrofaible

Une des implications universelles de l'invariance de jauge est que, dans toutes les théories de jauge, la masse des bosons de jauge (les analogues du photon en QED) qui transmettent l'interaction est nécessairement nulle. Or, en théorie quantique des champs, la masse de la particule qui transmet une interaction est inversement proportionnelle à sa portée. Comme il était apparu que l'interaction faible est de très courte portée, on en a conclu que si l'interaction faible est transmise par un boson d'interaction, la masse de ce boson est certainement très élevée, voire infinie. Il semblait donc difficile d'envisager une théorie de jauge pour l'interaction faible. Cependant, cette circonstance n'a pas empêché de continuer à tenter l'unification des interactions électromagnétiques et faibles. C'est ce

qui est fait avec le modèle dit des *bosons vecteurs intermédiaires*, selon lequel l'interaction faible est transmise par des bosons d'interaction dont la masse est de l'ordre de quelques dizaines de fois celle du proton. Mais, hélas, ce modèle n'est pas renormalisable !

Néanmoins, si les constituants de la matière impliqués dans les interactions électromagnétiques et faibles (les quarks et les leptons) voulaient bien être de masse nulle, alors il serait possible de construire une théorie de jauge, la *théorie électrofaible*, dont les bosons de jauge seraient aussi de masse nulle, qui unifierait les interactions électromagnétiques et faibles, qui rendrait compte de la violation de la parité d'espace dans l'interaction faible et de l'invariance par parité d'espace en électrodynamique, et qui serait renormalisable. Encore faudrait-il, pour qu'une telle théorie de jauge eût quelque chance de correspondre à la réalité expérimentale, lui adjoindre un mécanisme susceptible de rendre massifs les fermions et les bosons de l'interaction faible, de préserver la masse nulle du photon et, si possible, d'en sauvegarder le caractère renormalisable. Un tel mécanisme a été proposé en 1964 par Brout, Englert et Higgs, c'est le mécanisme de *brisure spontanée de la symétrie électrofaible*, qui implique l'existence du fameux boson BEH.

Le vide quantique et le paradigme du potentiel en forme de chapeau mexicain

En théorie quantique des champs, le vide, qui n'est pas le néant¹, est l'état fondamental d'énergie minimale du système de champs quantiques : c'est l'état où tous les nombres de quanta d'énergie (les particules et leurs antiparticules) associés aux champs quantiques impliqués dans l'interaction sont nuls. Les relations d'incertitude de Heisenberg, valides pour toute la physique quantique, s'appliquent aussi à la théorie quantique des champs : lorsque le champ a une valeur bien déterminée, le nombre de ses quanta d'énergie n'est pas déterminé, et réciproquement, lorsque le nombre de quanta est bien déterminé, la valeur du champ ne l'est pas. Dans le vide, le nombre de quanta est bien déterminé, il est nul ; le champ n'y a donc pas une valeur bien déterminée ; il *fluctue* et seule sa valeur moyenne y est bien déterminée.

Pour qu'une théorie quantique de champs puisse être utilisée en physique des particules, il est nécessaire que le vide (état d'énergie minimum) soit un état stable du système de champs en interactions ; lorsque le vide est stable, son énergie, qui est définie à une constante additive près, peut être posée à zéro. Le mécanisme BEH susceptible d'induire une brisure de la symétrie de jauge électrofaible s'inspire de développements en physique de la matière condensée dans lesquels les phénomènes de brisure spontanée de symétrie

1. Avec une très surprenante clairvoyance, Blaise Pascal avait, en son temps, entrevu que l'espace vide n'est pas le néant, lorsqu'il écrivait : « D'où l'on peut voir qu'il y a autant de différence entre le néant et l'espace vide, que de l'espace vide au corps matériel ; et qu'ainsi l'espace vide tient le milieu entre la matière et le néant. C'est pourquoi la maxime d'Aristote dont vous parlez, "que les non-êtres ne sont point différents", s'entend du véritable néant, et non pas de l'espace vide. » Réponse de Blaise Pascal au très révérend père Noël, recteur de la Société de Jésus, à Paris, 29 octobre 1647, Pascal, Œuvres complètes, La Pléiade, p 384, éd. 1998.

jouent un rôle très important. Il y a brisure spontanée de symétrie lorsqu'un état d'énergie extrême, invariant sous les transformations de la symétrie, candidat à servir de vide, ne convient pas parce qu'il est instable, alors que les seuls états stables ne sont pas symétriques : on est donc contraint à utiliser un vide non symétrique.

Pour relever le défi de l'unification électrofaible, le mécanisme BEH consiste à ajouter un nouveau champ (en plus de ceux des quarks et des leptons), un champ *scalaire* (c'est-à-dire un champ dont les quanta sont des particules de spin zéro), appelé *champ BEH*, lui aussi impliqué dans la théorie de jauge électrofaible et auto-interagissant par un potentiel adéquat, dit en forme de *chapeau mexicain* (voir la figure). Cette forme de chapeau mexicain intervient dans une représentation du potentiel d'auto-interaction dans l'espace (abstrait) des états du champ : dans la figure, l'énergie potentielle d'auto-interaction est portée en fonction de la partie réelle et de la partie imaginaire du champ BEH ; dans cette représentation, la symétrie de jauge électrofaible (invariance par changement de la phase du champ) correspond à la symétrie de révolution de la forme de chapeau mexicain. Il est clair sur cette figure que l'état du champ correspondant au sommet du chapeau ne peut pas, bien que satisfaisant la symétrie de révolution, servir de vide puisqu'il correspond à un maximum de l'énergie. Par contre, chaque état correspondant à un point de la « rigole » peut être utilisé comme vide (énergie minimum). Si la symétrie était une symétrie globale (invariance par un changement de la phase du champ indépendant du point d'espace-temps où ce changement est appliqué), on aurait bien une situation de brisure de symétrie : seul un point de la rigole peut être choisi comme vide, il correspondrait à un vide non symétrique. Mais si, comme c'est le cas dans la théorie de jauge électrofaible en construction, la symétrie est une invariance par tous les changements de la phase du champ qui dépendent du point d'espace-temps où ils sont appliqués, c'est l'ensemble de la rigole qui peut être utilisée comme vide. Or cet ensemble est symétrique (la rigole a la symétrie de révolution.) On peut donc dire qu'avec le mécanisme BEH, la symétrie de jauge électrofaible n'est pas brisée ! Mais alors, que se passe-t-il ? Il se trouve que, dans le cas d'un potentiel en forme de chapeau mexicain, le champ BEH comporte deux types de composantes (on dit aussi de degrés de liberté), d'une part, celles liées au « mouvement »² dans le fond de la rigole sans échange d'énergie, donc correspondant à des particules de masse nulle, que l'on appelle des bosons de Nambu-Goldstone, et d'autre part, celle liée au « mouvement » au-dessus de la rigole, correspondant au boson BEH, qui est massif. Dans le cas d'une invariance de jauge locale, il y a d'autres particules de masse nulle liées au « mouvement » dans le fond de la rigole, ce sont les bosons de jauge de l'interaction. Cela signifie que les bosons de Nambu-Goldstone deviennent partie intégrante des champs de jauge. Et c'est là qu'intervient un des nombreux miracles attribués à la physique quantique : les bosons de Nambu-Goldstone et les bosons

2. J'ai mis des guillemets au mot mouvement car ce « mouvement » se produit dans un espace abstrait, celui des états du champ.

de jauge, tous deux de masse nulle, fusionnent pour former des bosons de jauge massifs³ ! Ainsi, avec le mécanisme BEH, la symétrie de jauge n'est pas brisée, seulement les bosons de jauge ne sont plus nécessairement de masse nulle ! Mais si les composantes du champ BEH, les bosons de Nambu-Goldstone, (correspondant au « mouvement » dans le fond de la rigole) sont absorbées par les champs de jauge pour former des bosons massifs, que devient son autre composante, (celle correspondant au « mouvement » au-dessus de la rigole) ? Eh bien elle devient le boson scalaire massif, le boson BEH !

Bilan épistémique du mécanisme BEH

Ainsi, le mécanisme BEH semble-t-il avoir rempli son contrat : il a été en effet démontré en 1971 par 'tHooft et Veltman (ce qui leur a valu le prix Nobel en 1999) ainsi que, en même temps et indépendamment, par Zinn-Justin et Lee, que les théories de jauge, avec ou sans mécanisme de brisure, sont renormalisables. Une fois activé le mécanisme BEH, le modèle standard devient donc une théorie prédictive, dépendant d'un nombre fini et fixé de paramètres, comportant une approximation quasi classique et des corrections quantiques calculables. Dans ce modèle standard, le boson BEH apparaît comme une clé de voûte : il confère de la masse à toutes particules avec lesquelles il interagit (y compris à lui-même puisqu'il auto-interagit) ; il laisse sans masse le photon et les gluons ; quant aux neutrinos, avec lesquels il n'interagit pas, leurs masses ne peuvent être dues qu'à une nouvelle physique, au-delà du modèle standard. Avant la découverte annoncée le 4 juillet 2012, toutes les prédictions du modèle standard, à l'exception de l'existence du boson BEH, avaient été comparées avec succès à l'expérience. La recherche du boson constituait ce que l'on appelle une expérience critique : en cas d'échec, il aurait fallu reconsidérer l'ensemble de la théorie électrofaible et donc aussi l'ensemble du modèle standard. Il sera encore nécessaire de confirmer que la particule découverte est bien celle qui était prédite. Les premiers résultats des analyses sont très satisfaisants, et les faibles écarts qui semblent apparaître entre les prédictions et ces résultats sont plutôt encourageants car ils pourraient suggérer des ouvertures vers une physique au-delà du modèle standard.

LE GRAND RÉCIT DE L'UNIVERS ET LA SIGNIFICATION ONTOLOGIQUE DU MÉCANISME BEH

Jusqu'à présent, le mécanisme que nous avons tenté d'expliquer apparaît comme une astuce *ad hoc* (relevant d'une approche épistémique) destinée à résoudre un problème purement théorique, celui de la contradiction entre l'invariance de jauge supposée de l'interaction faible et la masse différente de zéro de ses bosons intermédiaires. Mais lorsque

3. Pour simplifier le plus possible la discussion, j'ai considéré dans la figure le cas où la symétrie de jauge ne fait intervenir qu'un seul boson de jauge ; dans le cas de la théorie électrofaible, il y a en réalité quatre bosons de jauge dont trois deviennent massifs au travers du mécanisme BEH, le quatrième, le photon, restant de masse nulle.

ce mécanisme est mis en perspective cosmogonique, dans le cadre du grand récit de l'univers qui confère à la physique relativiste et quantique du xx^e siècle son caractère authentiquement révolutionnaire, il acquiert une signification authentiquement ontologique.

Dans le cadre de ce grand récit, ce n'est plus dans l'espace abstrait des états du champ qu'il convient de discuter les propriétés du vide quantique, c'est dans l'espace-temps de l'univers en expansion et en devenir au cours du temps écoulé depuis le big bang. Selon le mécanisme BEH, ce sont les fluctuations du champ BEH, qui ne s'annulent pas en moyenne dans l'espace-temps vide de particules, qui font de ce vide un *milieu complexe*, siège des fluctuations des champs, qui possède la dissymétrie permettant au phénomène de l'*émergence* des masses de se produire : une particule, initialement de masse nulle, quantum d'un champ couplé au champ BEH, donc pouvant interagir avec lui, ne se propagerait pas dans ce milieu à la vitesse de la lumière, comme elle le ferait si sa masse était nulle, mais y serait ralentie par les interactions avec le champ BEH, comme dans une sorte de « mélasse quantique visqueuse » : elle acquerrait de la masse. Et ceci concerne toutes les particules couplées au champ BEH, les bosons intermédiaires de l'interaction faible, les quarks, les leptons chargés (l'électron, le muon et le tauon), mais ni le photon, ni les gluons ni les neutrinos, qui resteraient de masse nulle. De plus l'auto-interaction du champ BEH implique que boson BEH acquiert lui aussi de la masse. Du point de vue du grand récit de l'univers qui résulte du rapprochement de la physique des particules et de la cosmologie, le mécanisme BEH est associé à une transition qui a affecté l'espace-temps, quelque 10⁻¹² seconde après le big bang, au cours de laquelle, même si la symétrie électrofaible n'a pas été brisée, les quarks, les leptons chargés et les bosons intermédiaires de l'interaction faible sont *ontologiquement devenus massifs*.

DÉFIS TECHNIQUES EXPÉRIMENTAUX ET ORGANISATIONNELS

J'ai utilisé beaucoup de place pour évoquer les défis théoriques de l'unification électrofaible, et il me reste peu de place pour évoquer les défis techniques, expérimentaux et organisationnels qu'il a fallu relever pour parvenir au succès. Je me contenterai ici d'en dresser la liste :

- L'énergie délivrée par le LHC, (actuellement 4 TeV par faisceau, en attendant d'atteindre l'énergie nominale de 7 TeV par faisceau) est la plus élevée au monde. Pour atteindre cette énergie dans le tunnel du LEP, il a fallu développer, en grandes quantités des aimants fournissant un champ magnétique énorme (8,2 tesla).
- Pour limiter autant que possible la consommation d'électricité, on a eu recours à des aimants supraconducteurs, ce qui a nécessité de refroidir l'ensemble de l'accélérateur à 1,9 K (l'installation est ainsi devenue l'endroit le plus froid de l'univers).
- Comme le LHC est un collisionneur proton-proton, il a fallu réaliser dans le tunnel deux accélérateurs ! Chaque aimant doit avoir les deux polarités à quelques centimètres de distance, ce qui implique d'énormes forces magnétiques.

- Comme les probabilités de produire des événements intéressants est très faible, il faut maximiser ce que l'on appelle la luminosité, à savoir le nombre d'interactions par seconde (de l'ordre du milliard). Cela suppose de multiplier le nombre de paquets (2 808) circulant dans chacun des accélérateurs, le nombre de protons par paquet (100 milliards), et de minimiser la taille transverse (10 μm) des faisceaux.
- Cette très haute luminosité produit une radiation très intense pouvant détériorer les détecteurs, qu'il a fallu rendre résistants aux radiations.
- La grande majorité des interactions proton-proton relèvent de l'interaction forte et produisent un intense bruit de fond par rapport aux événements potentiellement intéressants pour la recherche : il a fallu développer des procédures de tri informatique au sein d'énormes flux d'information, à la disposition de collaborations de scientifiques éparpillés dans le monde entier.

LE CERN, UNE AVENTURE HUMAINE EXEMPLAIRE

Le CERN a été créé au lendemain de la Seconde Guerre, pour mener, dans le prolongement de l'aventure nucléaire, des recherches dans le domaine de la recherche fondamentale en physique des particules, avec, comme tâches, celles de révéler les secrets de la nature, de rassembler par-delà les frontières, d'innover et de former de nouvelles générations de travailleurs scientifiques.

Le CERN doit son succès à l'atout essentiel d'un financement stable, garanti par un traité international, qui lui a permis de mettre en œuvre une stratégie à long terme, exclusivement motivée par les besoins de la recherche fondamentale, en vue du progrès des connaissances. Pour répondre à ces besoins de manière optimale, cette stratégie vise toujours à construire du nouveau à partir de ce qui existe déjà et à continuer à faire vivre ce qui existe en y développant ce qu'il a d'unique (les anciennes machines servent d'injecteurs aux nouvelles machines, mais sont aussi l'objet de développements qui les maintiennent durablement à niveau).

Parmi de très nombreuses retombées technologiques et socio-économiques de ces recherches, il convient de mentionner l'impact spectaculaire des innovations collaboratives auxquelles le CERN a recours pour faire travailler ensemble des milliers de scientifiques répartis dans le monde entier. Le Web en est une première illustration. Sait-on que la première proposition de la toile d'araignée mondiale (le fameux *World Wide Web*, WWW) a été soumise au CERN par Tim Berners-Lee en 1989, puis affinée par lui-même et Robert Caillau en 1990 ? L'immense mérite du CERN, dont les statuts lui interdisaient de déposer un brevet, a été de rendre publics le concept et la réalisation du Web, de sorte qu'aucune compagnie ne puisse prendre de brevet sur le Web. C'est la raison pour laquelle le Web est maintenant gratuit et contribue tant à l'essor de la société de l'information.

Dans le domaine du traitement des données, le CERN a récemment mis en œuvre un nouveau paradigme. Au lieu d'avoir un supercalculateur localisé au CERN et traitant toutes les données, on réalise ce supercalculateur en répartissant les données sur tous les ordinateurs utilisés par les chercheurs qui, de par le monde, travaillent sur les expériences menées au LHC. Ainsi un utilisateur en Inde ou aux États-Unis ou en Europe a-t-il accès

à la même puissance de calcul, la grille d'ordinateurs, et a accès à toutes les données sans qu'il ait besoin de savoir où s'exécuteront les calculs qu'il a programmés et où se trouvent les données qu'il souhaite utiliser. C'est un système puissant de traitement des données, optimisé (l'achat des ressources est réparti), transparent et démocratique (tous les chercheurs sont à égalité de moyens). Ce système, qui marche donc très bien, est utilisé maintenant par des chercheurs d'autres disciplines. Pour les usages du secteur privé qui demandent plus de confidentialité et de sécurité, il a évolué en ce qu'on appelle « le *cloud computing* ». Dans le domaine collaboratif, la contribution du CERN s'est étendue aux logiciels libres (comme le Linux), à certains matériels (*hardware*) libres et aussi aux publications scientifiques.

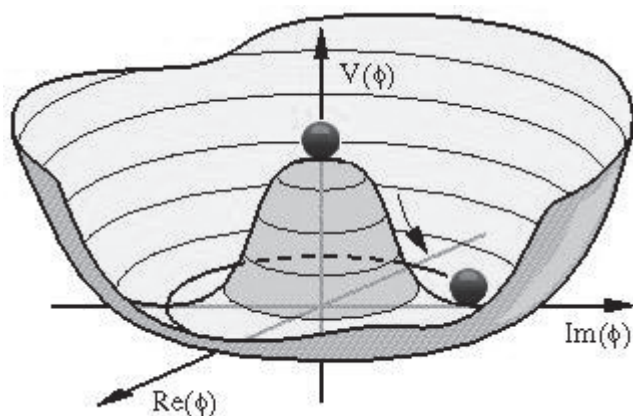
Ce qu'à mon avis prouve l'exemple des succès du CERN, c'est qu'à partir de la seule motivation du progrès partagé des connaissances, il est possible de former des équipes de jeunes travailleurs au travail au sein de grandes collaborations internationales, de mobiliser au service de l'intérêt général, de vastes communautés scientifiques où, selon un principe bien connu des lecteurs, chacun contribue selon ses moyens et reçoit selon ses besoins. Le CERN est maintenant en mesure de proposer un modèle que, dans notre ouvrage, Michel Spiro et moi avons dénommé le modèle *coopétitif* dont peuvent s'inspirer nos contemporains pour stimuler à la fois le progrès des connaissances, la créativité et l'innovation, de nouveaux outils de gestion de projets et de communication, pour rassembler par-delà les frontières, les cultures et les croyances, et plus généralement, pour répondre aux défis de notre temps. C'est d'ailleurs pour porter cet idéal que le CERN a tout récemment (en 2012) été admis comme observateur à l'Assemblée générale des Nations unies.

Compte tenu des nuages qui assombrissent actuellement notre horizon, pensons-nous que nous puissions faire l'économie d'un progrès soutenu des connaissances, dans tous les domaines ? Pourquoi ce qui a été possible avec le CERN ne serait-il pas possible dans les nombreux autres domaines où le progrès des connaissances, non soumis aux exigences de l'utilité immédiate, est plus que jamais nécessaire ?

Il faut bien voir en effet que l'extraordinaire aventure humaine qu'ont représentée la recherche et la découverte du boson BEH intervient dans un contexte qui n'est pas sans analogie avec celui du début du xx^e siècle : l'apogée actuelle du modèle standard fait penser à celle de la physique classique d'alors ; le prodigieux essor des technologies de l'information rendu possible par la révolution quantique et relativiste fait penser à celui des techniques de la révolution industrielle des xviii^e et xix^e siècles, mais, en même temps, la crise systémique dans laquelle est plongée l'économie mondiale, la perspective d'épuisement des ressources énergétiques et les inquiétantes prémices du changement global du climat font craindre la survenue, à l'échelle mondiale, de convulsions comparables à celles qui ont marqué la première moitié du xx^e siècle.

Si, comme nous l'avons dit plus haut, le nouveau grand récit de l'univers confère à la découverte du boson BEH une signification ontologique, il en souligne aussi la portée anthropologique. Toutes les civilisations, toutes les religions se sont appuyées, sans avoir à

attendre une révolution scientifique, sur un grand récit fondateur. En tant que récit fondé sur les avancées scientifiques consignées dans le modèle standard, il a une portée essentiellement épistémologique, mais cela ne l'empêche pas d'avoir aussi une portée axiologique, c'est-à-dire relative aux valeurs : le progrès des connaissances humaines n'est-il pas une valeur universelle ? Qu'une organisation internationale comme le CERN, fondée au lendemain des drames de deux guerres mondiales, avec, comme seule finalité, ce progrès des connaissances humaines, ait réussi à relever les redoutables défis de la recherche du boson BEH, n'est-ce pas un facteur d'espoir dans la capacité des civilisations humaines de refuser la fatalité et de surmonter les crises, aussi graves soient-elles ?



Représentation, dans l'espace abstrait des états du champ, de son potentiel d'auto-interaction en forme de chapeau mexicain.