

L'interaction électrofaible d'un accélérateur à l'autre : La feuille de route du LHC à l'aune des mesures du LEP

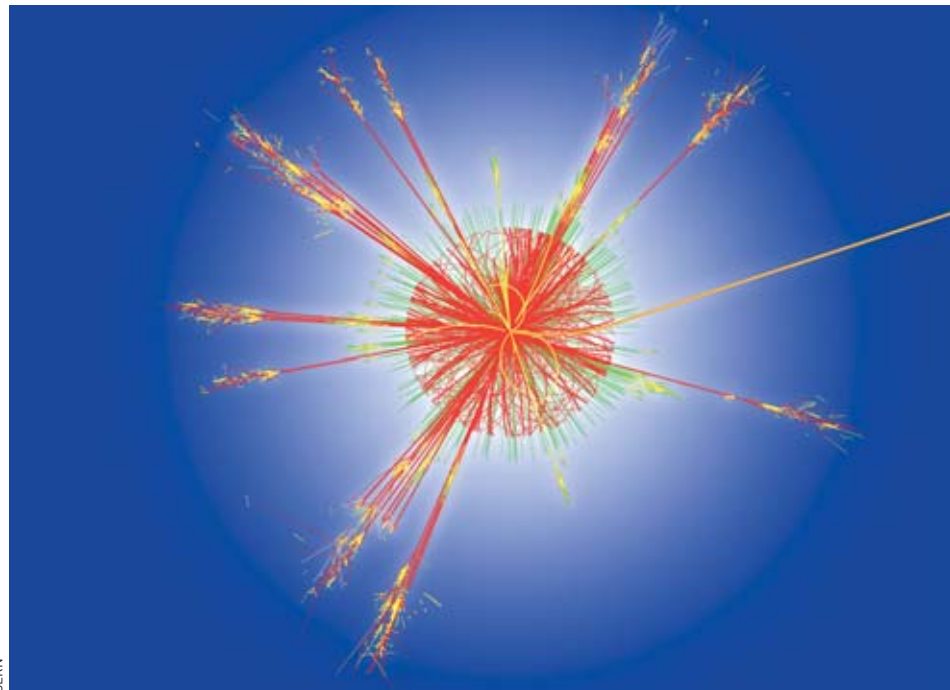
En 2007, des expériences cruciales pour l'avenir de la physique des particules commenceront au LHC. Leur préparation devra beaucoup à la précision des mesures faites auprès de son prédécesseur, le LEP. Loin d'être une fin en soi, cette précision était indispensable pour valider la théorie quantique électrofaible. Retour sur des résultats dont une partie n'a été finalisée que dans les derniers mois et qui feront pour longtemps encore autorité.

À la fin 2000, le LEP (*Large Electron Positron*), grand collisionneur **électron-positon** du Cern, le laboratoire européen de la physique des particules, délivrait ses dernières collisions. Ainsi s'achevait une décennie d'un programme expérimental extrêmement fécond, dont le résultat clef a été la validation de la **théorie quantique électrofaible** (encadré B, **Interactions fondamentales et particules élémentaires**).

L'interaction électrofaible au banc d'essai du LEP

Le LEP a été, dans les années 90, le plus grand **accélérateur de particules** du Cern. Installé dans un tunnel souterrain quasi circulaire de 27 km de circonférence, l'accélérateur permettait d'établir des collisions frontales de haute énergie entre électrons et positons, **anti-particules** des électrons. Les produits issus des collisions étaient enregistrés par quatre détecteurs. Le LEP a connu deux phases : de 1989 à 1995 (LEP 1), l'énergie des collisions était de 91 GeV puis, de 1995 à 2000 (LEP 2), elle a été graduellement augmentée de 130 à 209 GeV.

L'environnement expérimental au LEP est illustré sur la figure 1 qui représente la **section efficace** des collisions (liée à la probabilité d'interaction) en fonction de leur énergie. À haute énergie, contrairement au cas classique, les processus de collision aboutissent le plus souvent à des états finals différents de l'état initial. Deux des états finals possibles apparaissent sur la figure, le premier correspondant à la production de **hadrons**. La section efficace a une forme caractéristique de courbe de résonance dont le maximum se situe aux énergies de LEP 1. Cette forme est révélatrice du processus de



Simulation d'une collision proton/proton dans l'axe du faisceau du Large Hadron Collider. Les couleurs des trajectoires correspondent aux différents types de particules générées par l'événement. Les premières collisions dans le LHC sont prévues pour novembre 2007.

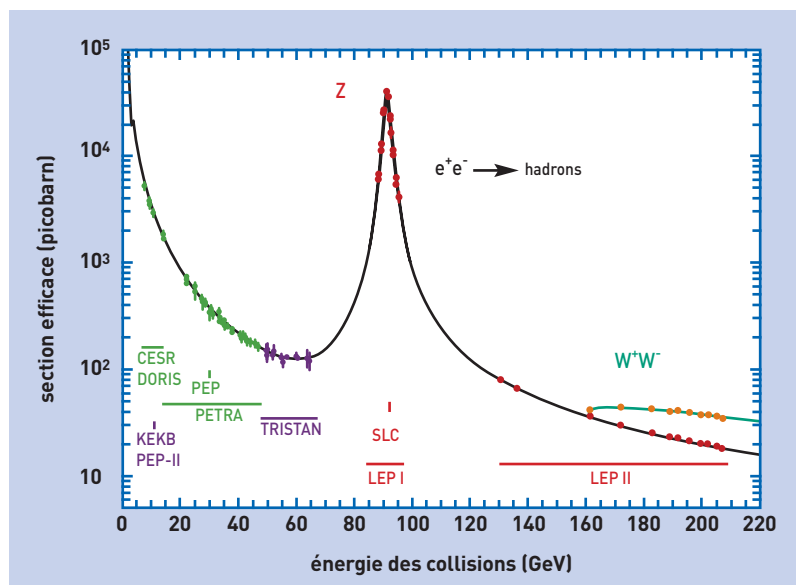
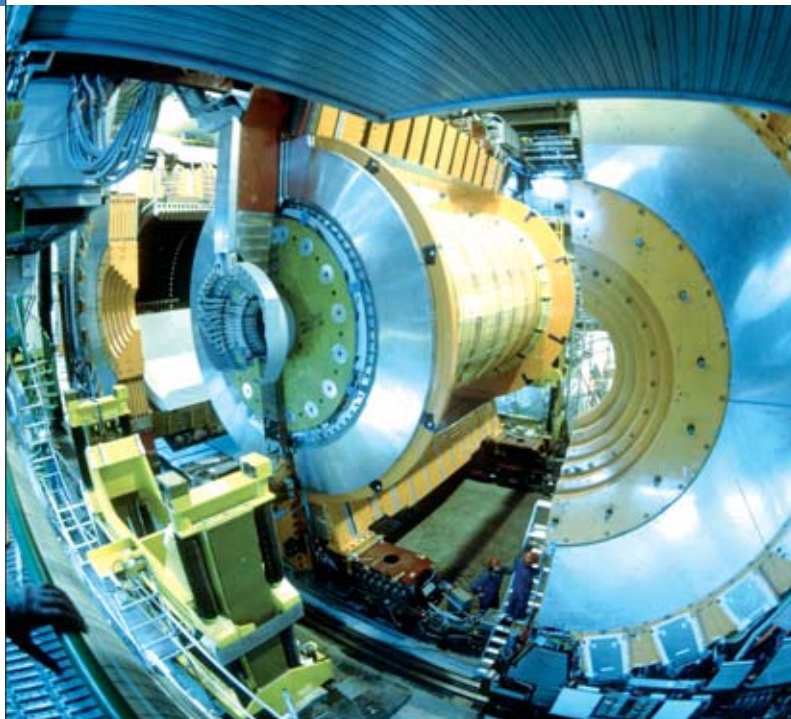


Figure 1. Section efficace de collision électron-positon en fonction de l'énergie de collision pour les processus produisant des hadrons ou une paire de W. Les points sont les mesures expérimentales, dont celles du LEP aux plus hautes énergies. Les courbes correspondent aux prédictions théoriques, les tirets verticaux à des mesures à une énergie précise (par exemple 91,2 GeV au SLC) et les traits horizontaux à des mesures sur une plus large gamme d'énergies (par exemple de 88,2 à 94,2 GeV à LEP 1).



Vue "éclatée" du détecteur Opal du LEP au cours de son montage en 1989. Le cœur est entouré des deux demi-coques qui vont l'enserrer. Les techniciens donnent l'échelle.

collision qui s'effectue par l'annihilation de la paire électron-positon initiale pour former un **boson Z**, particule caractéristique de l'**interaction faible**, de masse proche de 91 GeV. Après un temps extrêmement bref ($2,6 \cdot 10^{-25}$ seconde), le Z se désintègre et ce sont ses produits de **désintégration** qui sont reconstruits dans les appareillages, en l'occurrence des hadrons, matérialisation d'une paire **quark-antiquark**. Si la section efficace est traduite en nombre de collisions, ce processus aura fourni 17 millions d'états finals de désintégration du Z, enregistrés par les quatre détecteurs à LEP 1.

La seconde courbe de section efficace prend naissance aux énergies de LEP 2, croît puis atteint un plateau. Elle correspond à la production d'une paire de **bosons W^+W^-** qui, comme le Z, sont des particules caractéristiques de l'interaction faible, de masse proche de 80 GeV. Cinquante mille paires W^+W^- ont été enregistrées par les quatre détecteurs à LEP 2. Les nombres de collisions collectées au LEP sont importants du fait de la multiplicité des états finals à étudier et de la précision de mesure souhaitée, qui requiert de répéter les mesures un grand nombre de fois.

La figure 1 montre également des prédictions théoriques du **modèle standard de la physique des particules**. Établi au cours des années 60 sur la base de toutes les observations expérimentales accumulées jusqu'à alors, ce modèle est une véritable théorie, au contenu prédictif fort. Ses ingrédients sont en premier lieu les constituants **élémentaires**, c'est-à-dire non sécables, de la matière (encadré B, **Interactions fondamentales et particules élémentaires**). Une description correcte des résultats expérimentaux nécessite douze constituants, tous des **fermions**, qui se regroupent en trois familles. Chaque famille contient un **lepton** chargé, un **neutrino** léger et deux quarks. La première famille permet de reconstituer les atomes de la matière ordinaire et de comprendre la désintégration des **noyaux radioactifs**. Les constituants des deux autres familles sont plus lourds. Le modèle standard ne prédit pas les

valeurs exactes de certaines caractéristiques de ces constituants, comme la charge électrique ou la masse, dont la détermination revient à l'expérience. Il en est de même pour d'éventuelles familles supplémentaires sur lesquelles le modèle standard ne dit rien.

Le second ingrédient du modèle standard est la description des trois interactions fondamentales qui interviennent au niveau microscopique: **électromagnétisme**, **interactions faible** et **forte**. En postulant des propriétés d'invariance des interactions sous certaines lois de transformation, le modèle standard aboutit à la description en termes d'interactions propagées par des bosons de **spin 1**: le **photon γ** , pour l'interaction électromagnétique, les W^+ , W^- et Z pour l'interaction faible, et huit **gluons** pour l'interaction forte. La figure 2 illustre une telle description pour un processus de collision au LEP.

Retour vers le passé de l'Univers

Mais le modèle standard va plus loin. Il suppose que les interactions électromagnétique et faible sont indiscernables à haute énergie, autrement dit dans le passé de l'Univers. À un moment donné de l'évolution de ce dernier, cette symétrie électrofaible a été brisée, individualisant les deux interactions qui ont des propriétés différentes à basse énergie, donc aux énergies accessibles à l'expérience. Cette **brisure de symétrie** est responsable de la génération des masses des particules, de matière ou médiatrices des interactions. Ainsi, le photon reste de masse nulle, expliquant la portée infinie de l'interaction électromagnétique. Les bosons W et Z acquièrent des masses, en accord avec la portée finie de l'interaction faible. Contrairement au cas des particules de matière, le modèle standard prédit la valeur de ces masses, soit 91 GeV pour le Z et 80 GeV pour les W. À titre de comparaison, la masse d'un proton est équivalente à une énergie de 1 GeV. Ces valeurs, ainsi que l'existence des bosons Z et W, ont reçu une confirmation expérimentale éclatante au Cern au début des années 80.

Cette confirmation n'était cependant qu'une première étape. En effet, la découverte des bosons Z et W équivaut, pour l'interaction électrofaible, à la découverte des ondes hertziennes pour l'interaction électromagnétique: il restait à mettre en évidence les effets quantiques fins équivalents à ceux révélés pour l'électromagnétisme à la fin des années 50 (déplacement de

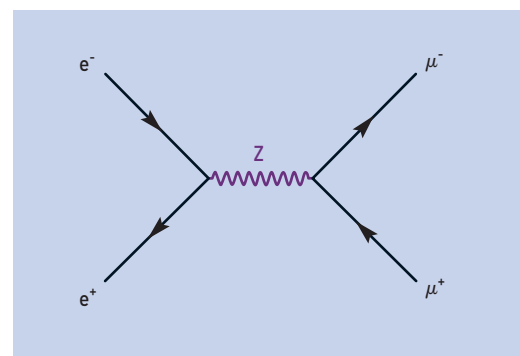


Figure 2. Annihilation d'une paire électron-positon en paire muon-antimuon, par le chemin le plus probable en théorie quantique (donné par l'ordre le plus bas du développement perturbatif de la théorie): l'état intermédiaire est un Z.

Lamb des niveaux de l'atome d'hydrogène et moment magnétique anormal de l'électron, dus à la quantification du rayonnement électromagnétique). Le LEP a été l'instrument majeur qui a permis de franchir ce pas, grâce aux mesures précises et nombreuses effectuées sur le Z et le W. Il aura été épaulé par deux collisionneurs situés aux États-Unis, le Tevatron et le SLC. Enfin, le LEP a également abordé la question du mécanisme exact de la brisure de la symétrie électrofaible, qu'on peut réaliser de multiples manières. La piste privilégiée par le modèle standard revient à relier les masses des particules à leur couplage avec un boson scalaire dit **boson de Higgs**. Cette solution, minimale puisqu'elle ne rajoute qu'une seule particule au spectre déjà connu, permet de prédire les propriétés de ce boson, sauf sa masse, très peu contrainte par la théorie, qui donne comme intervalle possible une fenêtre entre 0 à 1 000 GeV environ ! Explorer la fenêtre entière requiert des moyens expérimentaux de très grande envergure, dont le premier aura été le LEP.

La précision de mesure est une des raisons des avancées permises par le LEP. La mesure de la courbe de résonance du Z (figure 3) en est un bon exemple. Les mesures sont comparées aux prédictions obtenues pour trois hypothèses du nombre d'espèces de neutrinos légers (i.e. de masse inférieure à la moitié de la masse



Maximilien Brice/CERN

Une vue transversale du CMS (Compact Muon Solénoïd), une des quatre principales expériences du LHC. En décembre 2005, CMS a pour la première fois enregistré des rayons cosmiques dans un secteur complet, constitué des quatre stations de mesure des muons.

du Z), à savoir 2, 3 ou 4. Toute espèce de neutrino léger ouvre un canal de désintégration pour le Z, donc modifie son temps de vie et, partant, la largeur et la hauteur de la courbe de résonance, ce qui explique les différences notables entre les trois courbes. La précision expérimentale permet sans ambiguïté de rejeter les hypothèses de 2 et 4 neutrinos légers. Il n'y a donc que trois familles de constituants élémentaires contenant un neutrino léger et fortement couplé au Z. De cette courbe on déduit également la valeur de la masse du Z, à savoir $91,1875 \pm 0,0021$ GeV. La précision de $2 \cdot 10^{-5}$, à comparer à 1 % avant le LEP, met la masse du Z au rang des constantes fondamentales de la physique des particules élémentaires.

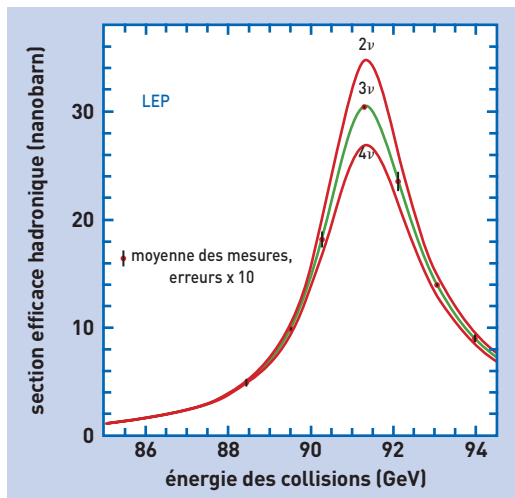


Figure 3. Courbe de résonance du Z dans le mode hadronique mesurée à LEP 1 et comparée à trois prédictions théoriques correspondant à un nombre d'espèces de neutrinos légers de 2, 3 ou 4.

Une mesure... sans mesure directe

La précision de mesure, loin d'être une fin en soi, était indispensable pour mesurer des effets quantiques extrêmement fins, appelés *corrections quantiques*. La figure 4 illustre le premier ordre des corrections au processus de la figure 2. Alors que le *quark top* a une masse trop élevée pour qu'un Z se désintègre en paire top-antitop détectable, les corrections quantiques permettent la matérialisation, pendant un temps très bref, de paires top-antitop virtuelles (figure 4 gauche), au sens de paires dont les éléments ont les mêmes nombres quantiques qu'un top mais une masse bien plus faible, respectant la conservation de l'impulsion et de l'énergie. Mais,

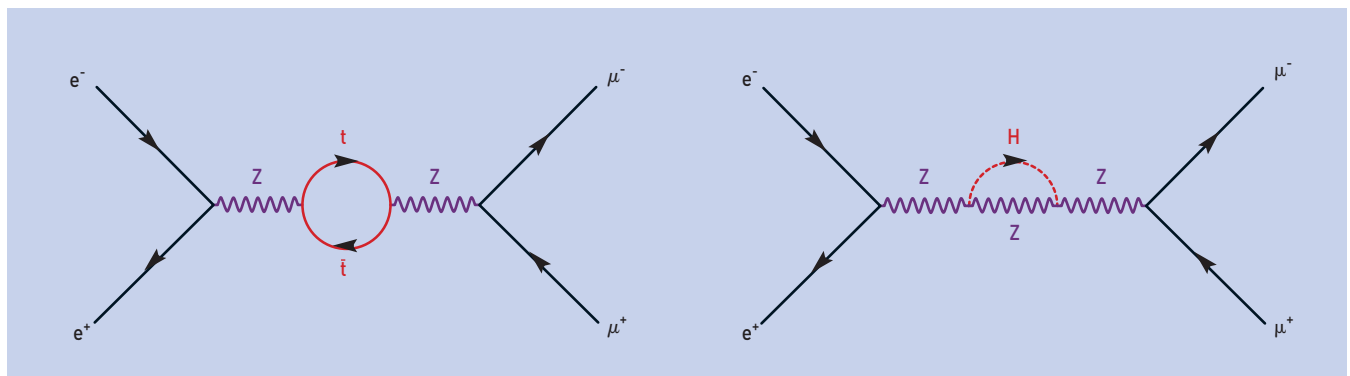


Figure 4. Annihilation d'une paire électron-positon en paire muon-antimuon, par des chemins moins probables de la théorie quantique (donnés par l'ordre 1 du développement perturbatif de la théorie) : à gauche, un Z se matérialise pendant un temps très bref en une paire top-antitop virtuelle ; à droite, un Z émet puis réabsorbe un boson de Higgs H virtuel.



Maximilien Brice/CERN

Vue générale du détecteur Atlas (A Toroidal LHC ApparatuS) avec ses huit aimants toroïdaux installés, en novembre 2005. Après avoir détecté ses premiers rayons cosmiques *in situ* dans son calorimètre hadronique, Atlas a commencé à faire fonctionner deux de ses trajectographes en juin 2006, pour enregistrer de tels rayons.

fait extraordinaire, ces corrections dépendent de la masse véritable du top, M_{top} . De même, les corrections quantiques permettent la matérialisation d'un boson de Higgs virtuel, H, lors de la propagation du boson Z intermédiaire (figure 4 droite). Mais leur valeur dépend de la masse véritable du boson de Higgs, M_H . Tout l'intérêt d'une mesure précise des corrections quantiques réside dans la possibilité de contraindre par l'expé-

rience les paramètres clés du modèle standard, tels que les masses du quark top et du boson de Higgs, *sans les mesurer directement*.

Progrès dans la traque du "Higgs"

Concrètement, ceci consiste à comparer, sur un même ensemble d'observables, les mesures expérimentales et les prédictions théoriques qui sont fonction de M_{top} et M_H , pour en déduire les valeurs les plus probables de ces paramètres, c'est-à-dire celles qui conduisent au meilleur accord entre données et prédictions. La précision expérimentale se reflétera directement dans l'incertitude sur le résultat de telles dérivations. Ainsi, en combinant toutes les mesures de précision, sauf la mesure directe de M_{top} au Tevatron, la valeur de la masse du top a pu être prédite à 177,6 GeV à une dizaine de GeV près, en excellent accord avec la mesure directe de M_{top} , $171,4 \pm 2,1$ GeV, effectuée au Tevatron, qui a seul l'énergie nécessaire pour produire des quarks top dans les états finals de collision.

La figure 5 illustre cette comparaison. L'accord entre théorie et expérience valide le modèle standard jusque dans sa description des effets quantiques les plus fins de l'interaction électrofaible. De même que pour M_{top} , les mesures de précision permettent de contraindre la masse du boson de Higgs. Cet ajustement est cependant moins précis que celui de M_{top} , car les corrections quantiques ne dépendent que du logarithme de M_H . C'est pourquoi le résultat est converti en limite supérieure à la masse du boson de Higgs, $M_H < 166$ GeV. Ceci représente un net progrès par rapport à la contrainte théorique, seule existante avant le LEP, $M_H < 1000$ GeV.

Mais le LEP en a dit plus sur le boson de Higgs. En effet, l'énergie y était suffisante pour produire directement un boson de Higgs léger, typiquement jusqu'à

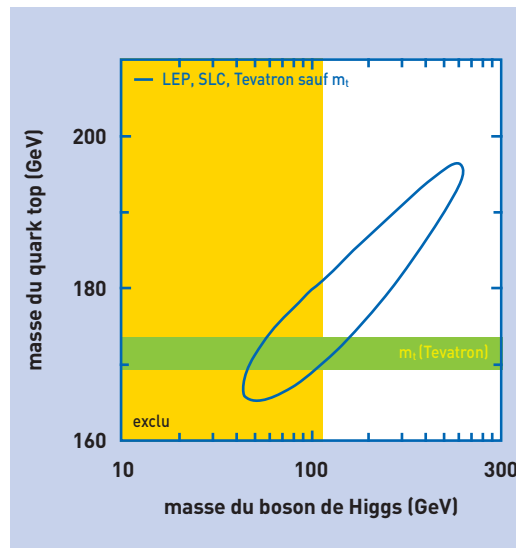


Figure 5. Comparaison des mesures expérimentales et des prédictions théoriques qui sont fonction des masses du boson de Higgs (M_H) et du quark top (M_{top}). Dans le plan (M_H, M_{top}) , le contour issu des mesures de précision (hors mesure directe de M_{top}) et tenant compte des incertitudes expérimentales (ellipse) est comparé à la mesure directe de M_{top} (bande horizontale). Les deux régions se recouvrent pour des valeurs de M_H entre 50 et 200 GeV environ. La bande verticale est la région exclue par les recherches directes du boson de Higgs.

120 GeV de masse. Une telle particule aurait donné des états finals de collisions aisément identifiables parmi les millions d'états finals enregistrés. En recherchant de tels états dans les données accumulées, les expériences LEP n'ont trouvé aucun signe d'un boson de Higgs jusqu'à une masse de 114,4 GeV (figure 5). Là encore, il s'agit d'un progrès notable puisque la contrainte expérimentale avant le LEP s'établissait à $M_H > 100$ MeV.

Cependant, dans les dernières données, le LEP a détecté une poignée d'états finals compatibles avec la production directe d'un boson de Higgs de masse supérieure à 114 GeV. L'un d'eux est représenté sur la figure 6. Les résultats combinés des quatre expériences ont ainsi révélé quelques états finals compatibles avec l'hypothèse d'un signal de masse entre 115 et 118 GeV. Les chercheurs ont estimé à 15 % la compatibilité de ces états avec l'hypothèse d'un boson de Higgs de 115 GeV et à 9 % leur compatibilité avec l'hypothèse d'une fluctuation du fond des processus standard. La réponse du LEP sur l'existence d'un boson de Higgs léger est donc ambiguë et ne pourra être affinée qu'avec l'aide des expériences auprès des collisionneurs hadroniques qui prennent le relais du LEP, à savoir le Tevatron, puis le LHC (*Large Hadron Collider*) qui démarrera en 2007 au Cern.

Comprendre le mécanisme exact de la brisure de symétrie

Grâce au LEP, des progrès significatifs ont été accomplis dans notre compréhension du monde microscopique. La théorie quantique de l'interaction électrofaible est définitivement validée: les interactions faible et électromagnétique sont propagées par des bosons vecteurs, elles étaient unifiées dans le passé lointain de l'Univers et leur symétrie, brisée lors du refroidissement de ce dernier, a déclen-

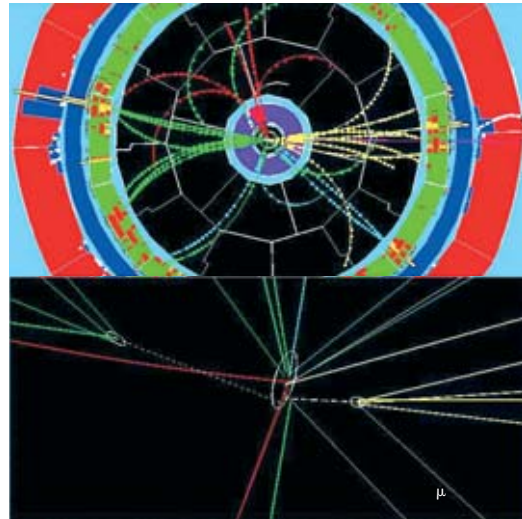
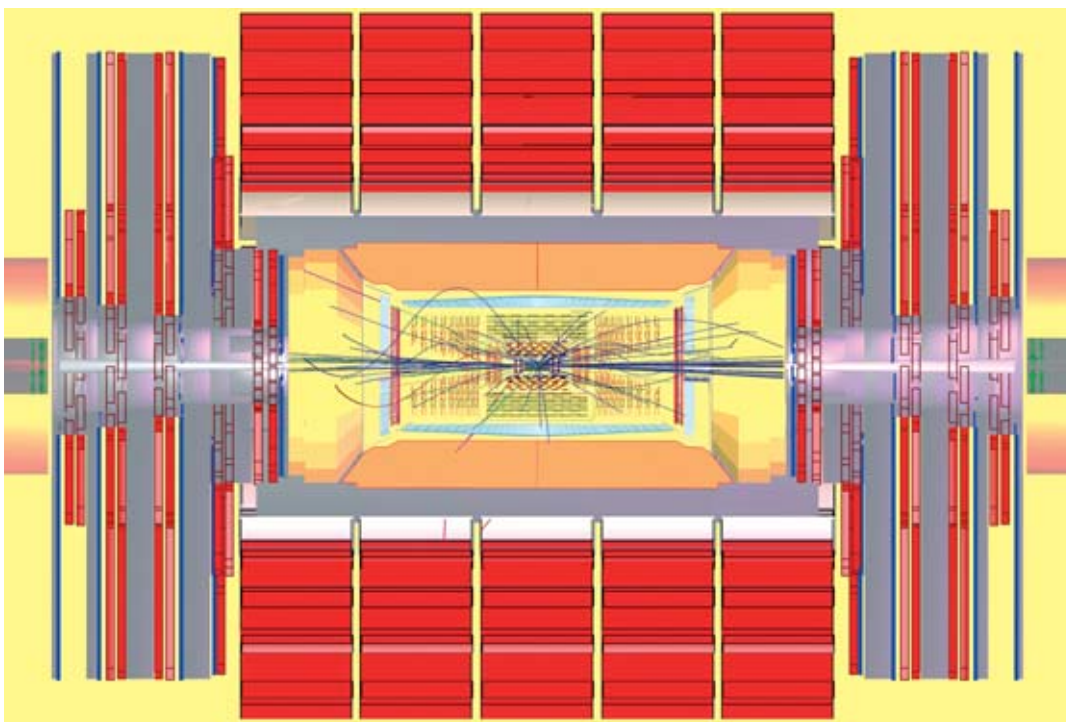


Figure 6. Reconstitution graphique d'un état final de collision compatible avec la production d'une paire HZ. En haut, coupe transversale révélant quatre jets de particules. En bas, vue rapprochée de la région d'interaction montrant l'émission de deux particules neutres qui se sont désintégrées à distance du point de collision, comme on l'attend des particules formées à partir des quarks b. Cet état final contient donc eux jets issus de quarks b et deux autres jets, ce qui est la configuration la plus probable pour la production d'une paire HZ.

ché la génération des masses de toutes les particules! Il reste à comprendre le mécanisme exact de cette brisure: boson de Higgs de 115 GeV, peut-être vu au LEP, ou autre mécanisme accompagné de particules plus massives? Aux successeurs du LEP de répondre...

> **Vanina Ruhlmann-Kleider**
 Direction des sciences de la matière
 CEA Dapnia centre de Saclay



Simulation d'une détection "signant" la présence du boson de Higgs dans l'expérience CMS.

B Interactions fondamentales et particules élémentaires

Le **modèle standard** de la physique des particules est le cadre théorique de référence qui décrit toutes les **particules élémentaires** connues (tableau 1) et les **interactions** fondamentales auxquelles ces particules participent (tableau 2). Les constituants élémentaires de la matière, appelés **fermions**, se partagent en deux grandes catégories déterminées par leur participation aux interactions ou forces fondamentales (**gravitationnelle**, **électromagnétique**, **faible** et **forte**) par l'intermédiaire de **bosons vecteurs**, particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature⁽¹⁾ (tableau 2). L'appartenance d'une particule à la catégorie des fermions ou à celle des bosons est liée à son **spin** (moment angulaire ou moment de rotation interne intrinsèque), suivant qu'il est de valeur demi-entière (fermion) ou entière (**boson**). À chaque constituant de la matière est par ailleurs associée son **antiparticule**, une particule de même masse mais de charge opposée. Le **positon** est ainsi l'antiparticule de charge positive de l'**électron**, dont la charge est négative.

Leptons et quarks

Les fermions comportent, d'une part les **leptons**, qui peuvent se déplacer librement et ne participent pas à l'**interaction forte** qui assure la cohésion des **noyaux atomiques** (elle est pour cette raison qualifiée de **nucléaire**), et d'autre part les **quarks**, qui participent à toutes les interactions mais ne sont pas observés individuellement, imbriqués qu'ils sont au sein des **hadrons**, les particules sensibles à l'interaction forte dont ils sont les constituants⁽²⁾.

Dans la catégorie des leptons, les **leptons chargés** participent à l'**interaction électromagnétique** (qui assure la cohésion des **atomes** et des **molécules**) et à l'**interaction faible** (à la base de phénomènes de désintégration et en particulier de la **radioactivité β**). Les **leptons neutres** ou **neutrinos**, pour leur part, ne participent qu'à l'interaction faible. De masse très réduite, il en existe un type pour chaque type de lepton chargé.

Indépendamment de leur participation aux interactions, les constituants élémentaires de la matière sont classés en trois **générations** ou **familles** de particu-

les. D'une famille à l'autre, les quarks et les leptons de mêmes charges ne diffèrent que par leurs masses, chaque famille étant plus lourde que la précédente.

L'**électron**, le quark haut (u pour *up*) et le quark bas (d pour *down*), qui appartiennent à la première génération, sont les particules massives les plus légères et sont stables. Ce sont les constituants exclusifs de la **matière ordinaire**, dite **baryonique** (un **baryon** est un assemblage de quarks) faite de **protons** et de **neutrons** qui ne représente pourtant qu'environ 4 % du contenu énergétique de l'Univers!

Les particules des deux autres familles sont plus lourdes et instables, à l'exception des neutrinos, qui ont cependant une masse non nulle mais qui sont stables. Elles ne peuvent être observées ou détectées que dans les états finals des collisions produites dans les **accélérateurs** ou dans le **rayonnement cosmique** et se désintègrent rapidement en particules stables de première génération. C'est la raison pour laquelle toute la matière stable de l'Univers est faite des constituants de la première famille.

D'après la **mécanique quantique**, pour qu'il y ait une interaction entre particules de matière ordinaire, il faut qu'au moins une particule élémentaire (un boson) soit émise, absorbée ou échangée. Le **photon** est le boson **intermédiaire** (ou **vecteur**) de l'interaction électromagnétique, les **W^+** , **W^-** et **Z** sont les bosons intermédiaires de l'interaction faible, et les **gluons** sont ceux de l'interaction forte au niveau des quarks. Quant au **graviton**, vecteur supposé de l'interaction gravitationnelle, il n'a pas été découvert expérimentalement. La **force gravitationnelle**, qui s'exerce sur tous les fermions proportionnellement à leur masse, n'est pas incluse dans le modèle standard, d'autant que la théorie des champs quantiques appliquée à la gravitation n'est pas viable en l'état. Si les effets gravitationnels sont négligeables dans les mesures de physique des particules, ils deviennent dominants aux échelles astronomiques.

La portée des interactions

Les quarks et les leptons chargés échangent des photons. Le photon ayant une charge électrique nulle, ces particules conservent leur charge électrique après

l'échange. Comme la masse du photon est nulle, la portée de l'interaction électromagnétique est infinie. Dépourvus de charge électrique, les neutrinos sont les seuls fermions élémentaires à ne pas être sensibles à l'interaction électromagnétique.

Dans la théorie électrofaible (unification des interactions faible et électromagnétique), l'interaction faible présente deux aspects : l'**interaction faible par courants chargés**, où les vecteurs de l'interaction sont **W^+** et **W^-** , et l'**interaction faible par courant neutre** où le médiateur de l'interaction est **Z^0** . Ces deux formes de l'interaction faible agissent entre tous les fermions élémentaires (quarks, leptons chargés et neutrinos). La masse de ces bosons étant très élevée (environ 80 GeV/c² pour **W^\pm** et 91 GeV/c² pour **Z^0**), la portée de l'interaction faible est donc infime, de l'ordre de 10⁻¹⁸ m. Les bosons **W^\pm** possédant une charge électrique non nulle, les fermions qui les échangent changent de charge électrique et également de nature (saveur). En revanche, le boson **Z^0** étant dépourvu de charge électrique, les fermions ne changeront pas de nature. En fait, l'interaction faible par courant neutre est assez similaire à l'échange d'un photon. En règle générale, si deux fermions peuvent échanger un photon, ils sont capables aussi d'échanger un **Z^0** . De son côté, un neutrino a la faculté d'échanger un **Z^0** avec une autre particule, mais pas un photon.

Seuls les quarks qui possèdent une charge de couleur⁽¹⁾ échangent des gluons, lesquels portent eux-mêmes

(1) La participation des constituants élémentaires aux interactions fondamentales est conditionnée par leurs charges d'interaction (charge électrique, charge de couleur) ou "nombres quantiques conservés". La charge de couleur, nombre quantique qui détermine la participation aux interactions fortes, peut prendre trois valeurs : "rouge", "verte" ou "bleue" (ces couleurs n'ayant rien à voir avec les couleurs visibles). Chaque quark porte l'une des trois charges de couleur et chaque antiquark l'une des trois charges d'anticouleur. Les gluons sont dotés de charges doubles couleur-anticouleur (huit combinaisons possibles).

(2) Exemple des **nucléons** : le proton contient deux quarks haut et un quark bas, le neutron deux quarks bas et un quark haut. Un **méson** n'est composé que de deux quarks (un quark et un antiquark).

B (suite)

une charge de couleur. Ainsi, lors d'un échange de gluons entre quarks, ces derniers échangent leurs couleurs respectives. La masse des gluons est nulle, mais puisqu'ils sont dotés d'une charge

de couleur, ils peuvent interagir entre eux, ce qui complique grandement le traitement théorique de cette interaction. La portée de l'interaction forte est donc très courte, de l'ordre de 10^{-15} m.

La quête de l'unification

Le cadre théorique du modèle standard est la **théorie quantique des champs** qui permet de décrire quantitativement les interactions fondamentales des parti-

	leptons peuvent se déplacer librement		quarks s'assemblent en triplets ou en paires quark-antiquark pour former les nombreuses particules subatomiques	
Fermions La matière ordinaire est composée de particules de ce groupe. Pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui, on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs.	première famille électron (e) responsable de l'électricité et des réactions chimiques sa charge est -1 masse : 0,511 MeV/c ²	neutrino électronique (ν_e) sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas (d) sa charge électrique est -1/3 le proton en contient un, le neutron deux masse : 4 - 8 MeV/c ²	haut (u) sa charge électrique est +2/3 le proton en contient deux, le neutron un masse : 1,5 - 4 MeV/c ²
	deuxième famille muon (μ) un compagnon plus massif de l'électron masse : 105,658 MeV/c ²	neutrino muonique (ν_μ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	étrange (s) un compagnon plus lourd du "bas" masse : 80 - 130 MeV/c ²	charmé (c) un compagnon plus lourd du "haut" masse : 1,15 - 1,35 GeV/c ²
	troisième famille tau (τ) encore plus lourd masse : 1776,99 ± 0,29 MeV/c ²	neutrino tauique (ν_τ) propriétés similaires à celles du neutrino électronique	beauté (b) encore plus lourd masse : 4,1 - 4,4 GeV/c ²	top (t) le plus lourd de la famille (observé en 1995) masse : 171,4 ± 2,1 GeV/c ²
Bosons vecteurs Particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature.	photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte entre quarks	W[±], Z⁰ porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	
Boson de Higgs? responsable de la "brisure de symétrie électrofaible"				

Tableau 1.

Table des douze constituants élémentaires de matière dont le modèle standard décrit les interactions. Les trois leptons chargés (électron, e⁻, muon, μ⁻, tau, τ⁻) sont sensibles aux interactions électromagnétique et faible, les neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) ne sont sensibles qu'à l'interaction faible et les six quarks (up, charm et top - ou u, c, t - de charge 2/3 et down, strange, bottom - ou d, s, b - de charge -1/3) sont sensibles aux trois interactions. Chaque constituant élémentaire possède son antiparticule, de même masse et de nombres quantiques algébriques (comme la charge électrique) de signe inversé.

B (suite)

cules élémentaires en respectant les principes de la *relativité restreinte* et ceux de la mécanique quantique. D'après cette dernière, pour observer une structure microscopique à haute résolution temporelle et spatiale, il est nécessaire de lui transférer une énergie-impulsion d'autant plus élevée que la résolution souhaitée est fine. Mais d'après la théorie de la relativité, ce transfert d'énergie-impulsion peut se transformer en apparition de particules qui n'étaient pas présentes dans l'état initial : les fermions peuvent être produits ou annihilés par paires particule/antiparticule, les bosons peuvent l'être en nombre arbitraire.

Tous les processus relevant d'une même interaction fondamentale sont reliés les uns aux autres. La démarche de la théorie quantique des champs, dans laquelle les propriétés de **symétrie** jouent un rôle fondamental, vise à décrire l'ensemble des processus relatifs à chaque interaction fondamentale au sein de grandes synthèses théoriques.

L'interaction forte et l'interaction électromagnétique sont respectivement formalisées dans les théories de la **chromodynamique quantique** et de l'**électrodynamique quantique**. L'interaction faible, quant à elle, n'est pas décrite isolément, mais en conjonction avec l'interaction électromagnétique dans le formalisme unifié de la **théorie électrofaible**. Des théories de grande *unification* de toutes les interactions fondamentales existent, mais n'ont pas encore reçu de validation expérimentale.

Toutes les prédictions du modèle standard ont été confirmées par l'expérience, à l'exception jusqu'à présent d'une seule, l'existence du (des ?) **boson(s) de Higgs**, particule(s) que l'on espère bien découvrir au LHC. Le **mécanisme de Higgs** serait responsable de la masse des particules élémentaires, le boson éponyme permettant de donner une masse aux fermions de masse nulle interagissant avec lui. Il permettrait l'unification, à haute énergie, des interactions électromagnétique et faible au sein de la théorie électrofaible et expliquerait efficacement la **brisure de cette symétrie électrofaible** à basse énergie, qui se traduit par deux interactions qu'on peut distinguer à ce niveau d'énergie (voir

L'interaction électrofaible d'un accélérateur à l'autre : la feuille de route du LHC à l'aune des mesures du LEP, p.23).

Dépasser ou compléter le modèle standard ?

Le modèle standard comporte une série de paramètres (tels que les masses des particules ou les intensités des forces fondamentales) qui sont "calés" sur les résultats expérimentaux. C'est, en tout état de cause, une théorie susceptible d'être améliorée ou approfondie, voire dépassée. Il ne fournit pas d'explication à la classification des constituants de la matière en trois générations de particules, alors que c'est précisément l'existence de ces trois générations qui permet de rendre compte de la **violation de l'invariance CP** charge/parité (qui fait qu'un processus physique impliquant l'interaction faible n'est pas équivalent à son image dans un miroir), violation qui est vraisemblablement à l'origine du déséquilibre matière/**antimatière** au profit de la première dans l'univers primordial. Il ne permet ni le traitement quantique de la gravitation ni ne fournit d'explication complète à la propriété fondamentale du **confinement** qui interdit aux quarks de se propager à l'état libre hors des hadrons.

Pour dépasser ou compléter le modèle standard, les chercheurs explorent principalement deux voies :

– la **supersymétrie** (communément

appelée SUSY) associerait à chaque particule (boson ou fermion) du modèle standard un partenaire, respectivement fermion ou boson. Ces partenaires seraient *a priori* très massifs, le plus léger d'entre eux serait une particule n'interagissant que très faiblement. Elle serait un candidat idéal pour expliquer la **masse cachée** (ou **matière noire**) de l'Univers qui représente quelque 21 % du contenu énergétique de l'univers, le reste (près de 75 %) étant constitué d'une **énergie noire** dont la nature reste également à déterminer. Ces WIMPs (acronyme anglais de Weakly Interacting Massive Particles) sont activement recherchés (voir *Edelweiss II, à la recherche des particules de matière noire*).

– la voie de la **sous-structure** présume qu'il existerait un nouveau niveau d'élémentarité sous-jacent aux particules du modèle standard (ou à certaines d'entre elles). Elle déboucherait sur toute une floraison de nouvelles particules composites, analogues aux hadrons, mais de masses deux à trois mille fois plus élevées.

À noter que si les théories supersymétriques donnent des prédictions en accord avec les mesures de précision faites au LEP, les théories qui proposent des sous-structures (du moins leurs versions les plus simples) n'y parviennent pas. Quant aux versions les plus complexes, elles rencontrent des problèmes au niveau théorique.

interaction fondamentale	particules associées (messagers)	actions
gravitation	graviton ?	de portée infinie, elle est responsable de la force d'attraction de deux masses entre elles et de la chute des corps
interaction électromagnétique	photon	de portée infinie, elle est responsable de l'attraction entre électrons et noyaux atomiques, et donc de la cohésion des atomes et des molécules
interaction faible	W^+ , W^- , Z^0	elle est responsable des radioactivités β^- et β^+ et de réactions impliquant des particules comme le neutrino
interaction forte	gluons (il en existe 8)	elle assure la cohésion du noyau atomique

Tableau 2. Les interactions fondamentales, leurs vecteurs et leurs effets.