

il ne peut y avoir deux quarks identiques et dans le même état dans une même particule. C'est une conséquence de ce que l'on nomme le principe d'exclusion de Pauli. Le proton est une combinaison uud de quarks. Cela ne pose pas de problème, parce que les deux u peuvent être dans des états de spin différents. Mais en 1964, une particule nommée Ω^- fut découverte au Laboratoire américain de Brookhaven. Elle avait été prédite comme le membre ultime d'un décuplet de la voie octuple. Or sa composition en quarks est sss , ce que le principe d'exclusion de Pauli n'autorisait pas.

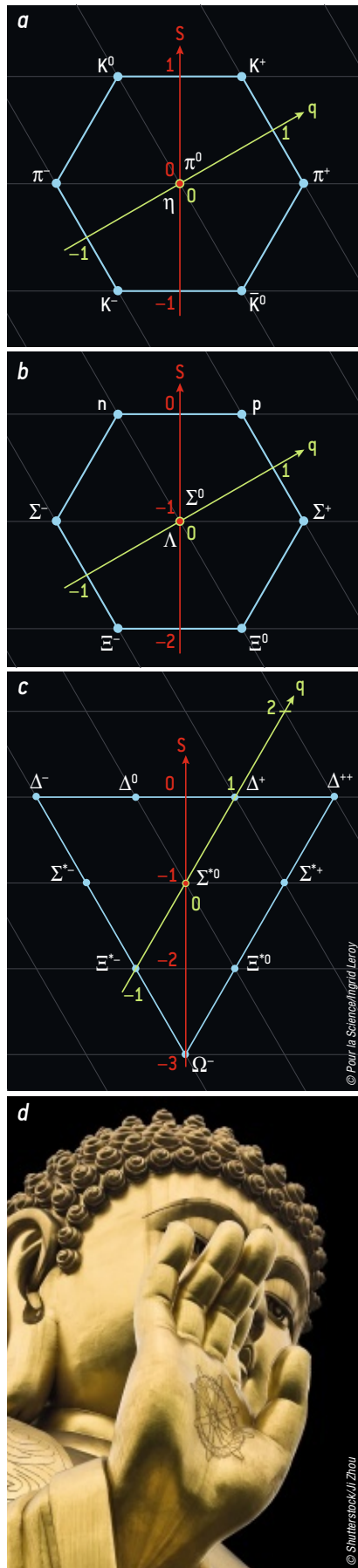
Pour résoudre cette difficulté, les théoriciens supposèrent que les quarks présentent une propriété quantique supplémentaire, la « couleur ». Les quarks peuvent être de trois couleurs différentes. Il ne s'agit pas de couleurs au sens usuel, mais d'un nouveau type de charge. Ainsi, lorsqu'on écrit que le Ω^- est constitué de trois quarks s , on suppose qu'ils ont chacun une couleur différente. Seules les particules élémentaires portant une charge de couleur sont sensibles à l'interaction forte, de même que seules les particules ayant une charge électrique sont sensibles à l'interaction électromagnétique.

Briser des symétries

Il était reconnu dès le départ que la symétrie utilisée dans la voie octuple n'était qu'une symétrie approchée. Si la symétrie était exacte, toutes les particules d'un même multiplet auraient eu la même masse. Les pions sont placés dans un octet qui inclut également les mésons K (ou kaons) dont la masse est trois fois supérieure à celle du pion. De fait, quand on examine les propriétés de ces particules, il est difficile de les rapprocher et de voir quelle symétrie les unit.

La symétrie sous-jacente à la voie octuple est donc brisée. Il existe plusieurs façons de briser une symétrie. La plus

3. LA « VOIE OCTUPLE » de Murray Gell-Mann s'appuie sur la théorie des groupes de symétrie pour organiser les particules de la famille des hadrons. Trois exemples de multiplets sont présentés, des mésons [duos quark-antiquark] (a) et des baryons (trios de quarks) (b et c). L'axe rouge indique la charge d'étrangeté de la particule (un quark s a une charge d'étrangeté égale à -1). L'axe vert indique la charge électrique. Le nom du modèle de Gell-Mann s'inspire de la philosophie bouddhiste, dont le symbole de la voie octuple est gravé dans la paume de la statue (d).



simple est de déranger l'ordre du système symétrique avec une perturbation. Ce type de brisure fut étudié par le mathématicien allemand Hermann Weyl et le physicien hongrois Eugene Wigner, qui l'appliqua à l'étude des spectres atomiques. Les électrons qui entourent le noyau des atomes occupent des « orbites » quantifiées. Si l'atome n'est pas perturbé, les électrons s'installent sur les orbites de plus basse énergie, les « états fondamentaux ». Mais si un choc électrique excite l'atome, les électrons sont propulsés sur des orbites plus énergétiques. Puis ils retournent à l'état fondamental en émettant un rayonnement.

Cette émission se traduit par une raie dans le spectre atomique caractéristique de l'élément et permet de l'identifier lorsqu'on étudie la lumière d'une étoile, par exemple. Ces raies reflètent la symétrie (de rotation notamment) du système atomique qui produit ces niveaux énergétiques. Mais en plongeant les atomes dans un champ magnétique, on brise cette symétrie. Ce qui était une raie spectrale unique devient un ensemble de plusieurs raies (il s'agit de l'effet Zeeman). Le nombre et l'intensité de ces raies peuvent être déterminés d'après la symétrie qui a été brisée.

Ce type de brisure de symétrie de Wigner-Weyl intervient dans la voie octuple. On ajoute une perturbation qui brise la symétrie, si bien que les masses des particules du multiplet se différencient. On obtient ainsi des relations entre les masses, vérifiées empiriquement, ce qui renforce la confiance dans le mécanisme de brisure.

En 1961, le physicien américain d'origine japonaise Yoichiro Nambu et son étudiant Giovanni Jona-Lasinio publièrent deux articles sur un type complètement différent de brisure de symétrie, la brisure spontanée de symétrie. Supposez que vous posiez verticalement une tige rectiligne. Vu du dessus, le système est parfaitement symétrique, aucune direction ne se distingue. L'équilibre est cependant instable et la tige bascule. La probabilité de tomber est la même dans toutes les directions. Une fois la tige au sol, la symétrie est perdue. Autrement dit, les équations peuvent présenter des symétries sans que les solutions ne les respectent. Ce type de brisure de symétrie est dit spontané, pour le distinguer du type Wigner-Weyl où l'on ajoute à l'équation présentant la symétrie un terme perturbateur non symétrique.

L'influence de Y. Nambu sur la physique a été notable. Il a appliqué ses idées aux aimants, aux cristaux et aux supraconducteurs ainsi qu'à la théorie des particules élémentaires. Dans le cadre de cette dernière, la brisure spontanée de symétrie fait apparaître une particule inattendue. Il s'agit d'un boson. Ce terme vient du nom du physicien indien Satyendra Nath Bose, qui a étudié le comportement statistique de ces particules qui ne suivent pas le principe d'exclusion de Pauli. Les photons, les pions et les kaons sont des exemples de bosons. L'autre classe de particules, qui inclut l'électron, le proton et le neutrino, constitue les fermions (en hommage à Fermi).

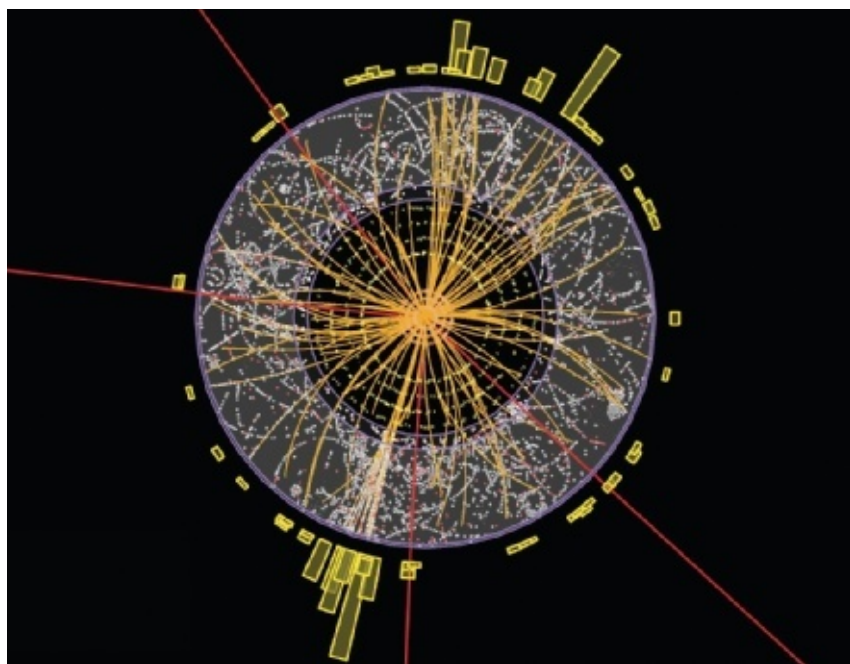
La particule du modèle de Y. Nambu est un boson de masse nulle. Mais on ne connaissait aucun boson de masse nulle, à part le photon. Au départ, on pensait que cela pourrait être un artefact du modèle ; mais, en 1961, le physicien d'origine britannique Jeffrey Goldstone trouva un autre modèle avec de telles particules, maintenant nommées bosons de Nambu-Goldstone.

En 1964, les physiciens belges Robert Brout et François Englert, d'une part, et le Britannique Peter Higgs, d'autre part, ont mis en évidence l'importance de la brisure spontanée de symétrie en physique des particules. P. Higgs donna l'exemple d'un modèle avec des bosons et un « photon » sans masse qui interagissent. Cette théorie présentait une symétrie apparente qui se brise spontanément. On montre alors que, dans ce modèle, le photon, dépourvu de masse, en acquiert une, et la théorie s'enrichit d'un boson supplémentaire de masse non nulle, le boson de Higgs.

La clef du modèle : le boson de Higgs

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs a eu un rôle crucial dans la construction du modèle standard de la physique des particules, qui décrit les trois interactions fondamentales autres que la gravitation : l'interaction forte, qui tient les quarks confinés par l'échange de gluons, l'interaction électromagnétique, qui s'exerce par l'échange de photons, et l'interaction faible, responsable de réactions telles que la désintégration bêta.

Pour comprendre l'importance du mécanisme de Englert-Brout-Higgs, il faut se pencher sur les travaux qui ont conduit à la description de l'interaction faible.



4. RECONSTITUTION SUR ORDINATEUR d'une collision proton-proton au sein du détecteur ATLAS, au CERN. Dans ce choc, de nombreuses particules sont produites. Certaines ont une durée de vie trop courte pour être détectées par les instruments. Pour d'autres, il est possible de déterminer leur trajectoire.

En 1933, Fermi avait modélisé l'interaction faible par une force de portée nulle, ce qui signifie que les particules impliquées devaient être en contact pour interagir. La théorie expliquait beaucoup de choses, mais son comportement à haute énergie n'était pas correct. Les physiciens supposèrent alors que l'interaction faible devait se faire par l'échange de bosons très lourds.

Vers 1967, les travaux de plusieurs théoriciens, en particulier les Américains Sheldon Glashow et Steven Weinberg et le Pakistanais Abdus Salam, ont convergé vers une théorie décrivant de façon unifiée l'interaction faible et la force électromagnétique. Dans cette théorie dite électrofaible, l'interaction faible est véhiculée par deux particules chargées nommées bosons W (pour *weak*, faible) et une neutre, le boson Z.

Cependant, il n'était pas possible d'attribuer explicitement une masse aux bosons W et Z sans violer certains principes de symétrie de la théorie. En 1967, S. Weinberg et, indépendamment, A. Salam ont su appliquer le mécanisme de Englert-Brout-Higgs à la théorie électrofaible. On part d'une situation symétrique où le photon et les bosons de l'interaction faible n'ont pas de masse. Par brisure spontanée de la symétrie, les bosons W et Z acquièrent une masse, mais pas le photon. Le boson de Higgs, issu de la brisure de symétrie, acquiert aussi une masse. La théorie a été depuis

confirmée, en particulier avec la mise en évidence en 1983, au CERN, des bosons W et Z avec une masse d'environ 80 et 91 fois celle du proton. Malgré ce succès, le boson de Higgs manquait à l'appel.

La recherche de cette particule a nécessité la construction de collisionneurs gigantesques. Trois accélérateurs ont participé à cette traque, le LEP (*Large Electron-Positron collider*), puis le LHC (*Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons), au CERN, et le *Tevatron* au Fermilab, près de Chicago. Le LEP, en service de 1989 à 2000, n'a pas détecté le boson de Higgs, mais a fourni une limite inférieure à sa masse, de l'ordre de 114 gigaélectronvolts. Le *Tevatron*, qui a fonctionné jusqu'en septembre 2011, a amélioré les contraintes sur la masse et a détecté un début de signal qui a été confirmé au LHC. Le 4 juillet 2012, les porte-parole des expériences du LHC, inauguré en 2009, ont annoncé la découverte d'un nouveau boson avec une masse d'environ 125 gigaélectronvolts. Cette particule est très probablement le boson de Higgs.

Cinquante ans auront ainsi été nécessaires pour confirmer pleinement la théorie électrofaible. Mais les physiciens ne s'arrêtent pas en si bon chemin pour comprendre les interactions fondamentales. De nouvelles questions se posent, de nouvelles expériences sont à imaginer pour de nouvelles découvertes. ■

Le boson de Higgs, et après ?

John Ellis

La découverte d'une nouvelle particule a été annoncée en juillet 2012 au CERN. Il s'agit probablement du boson de Higgs. Il reste aux physiciens non seulement à le vérifier, mais aussi à s'attaquer aux nombreuses questions associées à cette particule.

La découverte au CERN d'une nouvelle particule, début juillet, est un événement important pour les physiciens des particules. Cette particule est-elle le « boson de Higgs », dont l'existence a été postulée dans les années 1960 ? Les physiciens doivent en déterminer les propriétés pour s'assurer qu'elles correspondent bien à celles attendues du boson de Higgs. Si c'est bien le cas, cette découverte marquera le plein succès du modèle standard de la physique des particules. Mais elle ne sera pas un point final. Le boson de Higgs soulève en effet de nombreuses questions théoriques qui soulignent les limites du modèle standard et la nécessité de rechercher des signes d'une théorie plus fondamentale.

Le modèle standard de la physique des particules décrit toute la matière visible de l'Univers à partir d'un nombre limité de particules élémentaires, qui sont des fermions (des particules de spin – ou moment cinétique intrinsèque – demi-entier, dans les unités atomiques) : les quarks qui forment les protons et les neutrons des noyaux atomiques, les élec-

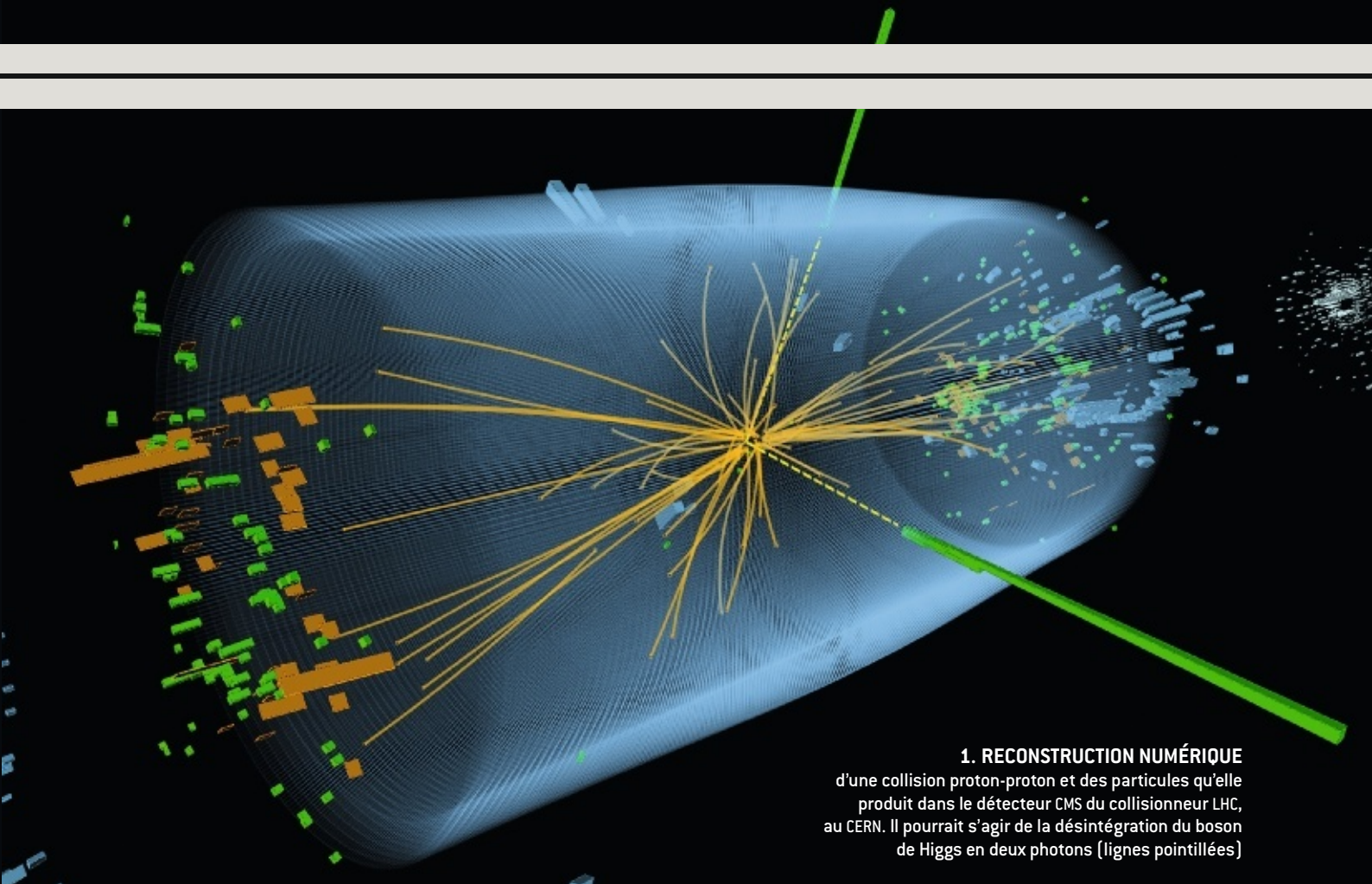
trons et ses deux versions plus lourdes (le muon et le tau), ainsi que trois neutrinos. Mise à part la gravitation, non prise en compte par le modèle standard, on distingue trois interactions fondamentales entre ces particules : la force électromagnétique, l'interaction forte, qui assure la cohésion des noyaux, et l'interaction faible, responsable notamment de la radioactivité bêta. Les équations les plus simples du modèle standard ne font pas de réelle distinction entre les particules de matière, ce qui suggère qu'elles devraient toutes être de masse nulle. Or aucune ne vérifie cette propriété, toutes ont une masse. Cela n'est pas sans importance : les atomes ne pourraient pas exister si les électrons avaient une masse nulle, car ils pourraient s'en échapper à la vitesse de la lumière.

Le modèle standard contient aussi des bosons (particules de spin entier) qui correspondent aux particules véhiculant les interactions fondamentales. Le plus connu est le photon, dont l'échange entre deux particules chargées est responsable de la force électromagnétique. Comme le photon est de masse nulle, l'interaction élec-

tromagnétique a une portée infinie. Ce n'est pas le cas de l'interaction faible, qui a une portée limitée, de l'ordre de 10^{-18} mètre. Cette courte portée est liée au fait que les trois particules véhiculant cette interaction, les bosons W^+ , W^- et Z , ont une masse élevée, d'environ 80 et 91 gigaélectronvolts (GeV), soit une masse équivalente à celle de noyaux de taille moyenne. Les bosons W et Z ont une masse si importante qu'il a fallu attendre 1983 pour les découvrir au CERN, alors que le photon est connu depuis les travaux d'Albert Einstein sur l'effet photoélectrique, en 1905.

À l'origine des masses

Comment expliquer que les bosons W et Z ont une masse élevée tandis que le photon est de masse nulle ? Et d'où vient la masse des particules de matière ? En attribuant explicitement et de façon *ad hoc* une masse aux particules dans les équations, on obtenait une théorie incohérente et des prédictions absurdes. Vers 1964, les physiciens belges François Englert et Robert



1. RECONSTRUCTION NUMÉRIQUE

d'une collision proton-proton et des particules qu'elle produit dans le détecteur CMS du collisionneur LHC, au CERN. Il pourrait s'agir de la désintégration du boson de Higgs en deux photons (lignes pointillées)

Brout, et, indépendamment, le physicien britannique Peter Higgs proposèrent un mécanisme qui évitait les incohérences. Cette solution est celle adoptée dans le modèle standard.

Selon le mécanisme de Englert-Brout-Higgs, la propriété que nous mesurons comme étant la « masse » d'une particule est le résultat d'une interaction permanente de la particule avec un champ présent partout dans l'Univers. Certaines particules, telles le W et le Z, interagissent plus intensément avec ce champ universel, ce qui leur confère une masse élevée, tandis que d'autres, comme le photon, n'interagissent pas du tout avec le champ et gardent donc une masse nulle (voir l'encadré page 33).

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs, dans sa version élémentaire, est le modèle théorique le plus simple capable de rendre compte de la différence de masse entre le photon et les bosons W et Z, ainsi que des masses des autres particules. Il existe cependant d'autres théories qui tentent de résoudre le problème de la masse. Par exemple, l'Univers pourrait

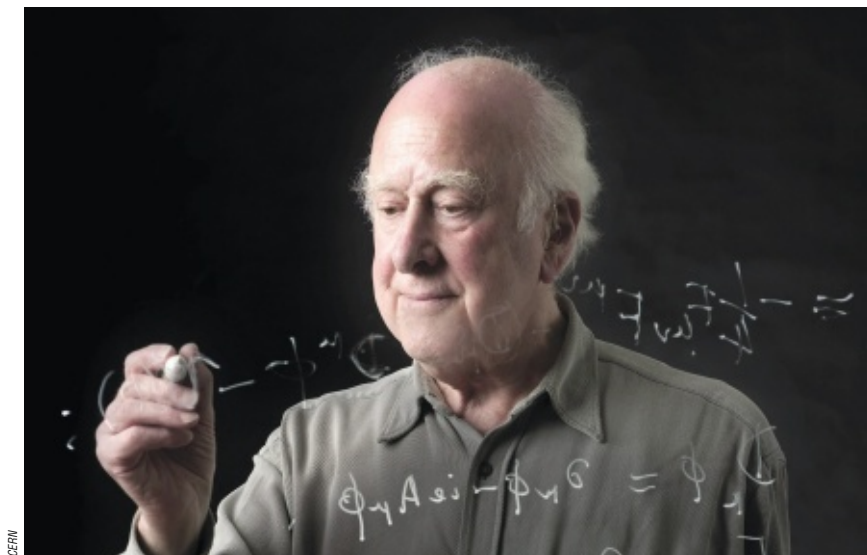
contenir des dimensions spatiales supplémentaires, compactes et imperceptibles à notre échelle; les particules n'auraient pas toutes le même comportement dans ces dimensions, ce qui leur conférerait des masses différentes.

L'existence du champ de Englert-Brout-Higgs sera prouvée si l'on découvre la particule associée à ce champ (dans la théorie quantique, toute particule élémentaire est un quantum d'un certain champ). Sa présence dans la théorie fut soulignée en 1964 par P. Higgs, d'où son nom de boson de Higgs. Dans la théorie la plus simple, celle du modèle standard, il n'y a qu'un seul boson de Higgs; mais d'autres théories n'y font pas du tout appel ou, au contraire, en nécessitent plusieurs. Seule l'expérience permettra de départager ces différentes pistes.

Quelques articles publiés au début des années 1970 examinaient la possibilité de produire et détecter le boson de Higgs dans un collisionneur de particules. La première étude systématique a été proposée par Mary Gaillard, Dimitri Nanopoulos et moi en 1975. Nous discussions

L'ESSENTIEL

- La nouvelle particule observée au CERN est une particule de spin entier et sa masse est d'environ 125 GeV. Il faut s'assurer qu'elle a bien les propriétés du boson de Higgs.
- Le boson de Higgs est une particule de spin nul, ses couplages aux autres particules sont proportionnels à leur masse et il peut se coupler à lui-même.
- L'étude de la nouvelle particule donnera peut-être des indices sur la physique au-delà du modèle standard et sur la nature de la matière noire.



CERN

2. LE PHYSICIEN BRITANNIQUE PETER HIGGS a développé, en même temps que les Belges Robert Brout et François Englert, un mécanisme qui permet de donner une masse aux particules. P. Higgs est le premier à avoir prévu l'existence d'une particule associée à ce mécanisme, et cette particule porte désormais son nom.

■ L'AUTEUR



John ELLIS est professeur de physique théorique au King's College de Londres

et chercheur au CERN à Genève.

■ BIBLIOGRAPHIE

The ATLAS collaboration, *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC*, soumis à *Physics Letters B*, <http://arxiv.org/abs/1207.7214>

The CMS collaboration, *Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC*, soumis à *Physics Letters B*, <http://arxiv.org/abs/1207.7235>

C. Quigg, *Le Higgs et autres quêtes du LHC*, *Dossier Pour la Science*, n° 62, janvier-mars 2009.

notamment de la production de bosons de Higgs à partir de bosons W et Z et de leur désintégration en deux photons ou en particules de masses non nulles.

Les premiers programmes de recherche du boson de Higgs ont démarré au LEP, l'accélérateur d'électrons et positrons (antiparticules de l'électron) du CERN, entre 1989 et 2000. Le boson de Higgs n'a pas été découvert dans ces expériences, mais ces dernières ont permis de conclure que sa masse devait être supérieure à 114 GeV. Les travaux au collisionneur *Tevatron*, au Fermilab, près de Chicago, ont, eux, exclu un intervalle de masses autour de 160 GeV. Parallèlement, des mesures précises de l'interaction électrofaible – une description unifiée de l'électromagnétisme et de l'interaction faible – au LEP, au *Tevatron* et dans d'autres expériences ont indiqué que la masse du boson de Higgs se trouvait avec une bonne probabilité entre les deux zones exclues.

La recherche du boson de Higgs est l'une des priorités du programme expérimental du LHC (*Large Hadron Collider*), le grand collisionneur proton-proton et successeur du LEP au CERN. Les physiciens ont optimisé la conception des détecteurs ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*) et CMS (*Compact Muon Solenoid*) pour mettre en évidence cette particule. Après le démarrage du LHC en 2009, les premiers signes d'une particule de type boson de Higgs ont été détectés à la fin de l'année 2011. L'accumulation de données expérimentales supplémentaires a permis d'annoncer le

4 juillet 2012 la découverte d'une particule d'une masse d'environ 125 GeV, qui pourrait être le boson de Higgs.

Sa durée de vie étant trop courte, le boson de Higgs ne peut pas être décelé directement par les détecteurs. Il se désintègre rapidement en d'autres particules qui, elles, peuvent être détectées par les appareils de mesure : en particulier, la désintégration en deux photons, en paires de bosons Z ou W, ou encore en paires quark-antiquark *b*. Les expériences ATLAS et CMS ont recueilli des signaux forts de désintégrations d'une nouvelle particule en photons et en bosons Z. Par ailleurs, les détecteurs DØ et CDF du *Tevatron* ont obtenu quelques signaux venant de la désintégration en paires quark-antiquark *b*.

Ces données suffisent pour affirmer aujourd'hui qu'une particule différente de celles connues a été découverte. L'étude de son spin indique qu'elle prend une valeur entière ; il s'agit donc d'un boson. Cependant, nous savons déjà que le spin de cette particule diffère de celui du photon et du boson W ou Z, qui ont un spin égal à un. Son spin vaut soit zéro, comme le prédit la théorie de Englert-Brout-Higgs, soit deux. Vérifier que le spin est bien nul fait partie des priorités. Pour ce faire, il faut par exemple mesurer la distribution angulaire des photons et des autres particules produites par la désintégration de la nouvelle particule. Ce type d'études nécessite plus de données, mais devrait être possible dès la fin de l'année 2012.

Sonder les propriétés du boson de Higgs

Une autre propriété du boson de Higgs qu'il faudra étudier est son couplage aux autres particules, c'est-à-dire l'intensité de l'interaction directe du boson de Higgs avec chacune d'elles. La théorie indique que, parce qu'il confère leur masse aux particules, son couplage avec une particule dotée d'une masse doit être proportionnel à cette dernière. Certaines informations sur les couplages peuvent être obtenues directement par l'étude des canaux de désintégration en Z, en W, en paires de quarks *b* ou en paires de taus. D'autres sont obtenues indirectement à partir de la désintégration en photons : ce processus fait apparaître des quarks *t* intermédiaires couplés au boson de Higgs, d'une part, et aux photons, d'autre part. Dans un article récent, j'ai montré avec

Tevong You, de l'Imperial College à Londres, que les couplages de la nouvelle particule ressemblent approximativement à ceux du boson de Higgs. Des données plus nombreuses permettront de vérifier leur dépendance vis-à-vis des masses avec une précision de dix pour cent.

Une troisième propriété clef est le couplage du boson de Higgs avec lui-même. Dans le cadre du modèle standard, le boson de Higgs a des couplages trilinéaire et quadrilinéaire (correspondant, dans les diagrammes, à des interactions entre trois ou quatre bosons de Higgs connectés en un point). La mesure du couplage quadrilinéaire semble très difficile. En revanche, si le LHC produit assez de collisions, on observera peut-être des paires de bosons de Higgs issues d'un processus où la particule intermédiaire est un boson de Higgs, auquel cas le couplage trilinéaire pourra être estimé.

En même temps que ces mesures des propriétés de la nouvelle particule seront réalisées, le modèle le plus simple du mécanisme de Englert-Brout-Higgs sera comparé à des modèles alternatifs, et les données expérimentales permettront d'éliminer certains scénarios.

Il y a de bonnes raisons de penser que le modèle le plus simple, où il n'y a qu'un seul boson de Higgs, ne peut expliquer complètement la question de l'origine de la masse des particules. Dans le cadre du modèle standard, si la masse du boson de Higgs est réellement inférieure à 127 GeV, le champ de Higgs ne serait pas aujourd'hui dans son état de plus basse énergie. Il serait dans un état instable et pourrait basculer à tout instant vers un niveau d'énergie plus bas (voir la figure 3). Les lois de la physique changeraient brusquement et l'Univers tel que nous le connaissons cesserait d'exister. Certes, l'Univers pourrait subsister dans cet état instable durant un temps très supérieur à l'âge actuel de l'Univers. Cette instabilité serait cependant le signe d'une théorie incomplète.

Une autre difficulté est celle de la masse du boson de Higgs. Dans le modèle standard, c'est un paramètre libre, que nous pourrions fixer à 125 GeV (si la particule découverte au LHC est bien le boson de Higgs). Cependant, il faut prendre en compte des corrections dues à des processus quantiques qui, mathématiquement, rendent cette masse infinie. Il est possible d'absorber ces corrections infinies en

imposant *in fine* la valeur expérimentale de la masse, mais cela ne peut se faire qu'au prix de réglages très fins des paramètres du modèle standard. Une alternative évitant ce genre d'ajustements, qui paraissent artificiels, serait préférable.

Une façon de contourner ce problème de la masse du boson de Higgs est de supposer qu'il ne s'agit pas d'une particule élémentaire, mais d'un objet composite, ayant des constituants internes – de la même façon que le proton est composé

de trois quarks ou que le méson π est composé d'un quark et d'un antiquark. Dans les théories de la supraconductivité et de l'interaction forte, des brisures spontanées de symétrie analogues à celle en jeu dans le mécanisme de Englert-Brout-Higgs naissent de champs composites, et de nombreux théoriciens se disent que cela pourrait être le cas dans le modèle standard. Si aucun scénario complet et satisfaisant n'a pu être construit dans ce cadre, il existe des modèles partiels permettant

DES PARTICULES DE MASSES DIFFÉRENTES

Le mécanisme de Englert-Brout-Higgs confère une masse non nulle aux bosons W et Z et à toutes les particules du modèle standard. Les particules n'ont pas toutes la même masse, car elles se couplent différemment au champ de Englert-Brout-Higgs. Plus une particule interagit avec ce champ, plus son inertie est grande, ce qui revient à dire que sa masse est élevée. Ce mécanisme peut être comparé à la résistance au mouvement que subit une personne qui traverse un champ de neige.



Une skieuse aux skis bien fartés glisse vite sur la neige, comme si sa masse était très faible, à l'image du photon qui n'interagit pas avec le champ de Englert-Brout-Higgs.



Avec des raquettes, la progression est plus lente. Cette situation illustre celle d'une particule qui interagit légèrement avec le champ de Englert-Brout-Higgs, à l'instar de l'électron.



Un randonneur avec ses chaussures s'enfonce dans la neige. Il interagit beaucoup avec la neige et progresse alors lentement, comme s'il était très lourd. Cela illustre le cas des bosons W et Z, qui se couplent fortement au champ de Englert-Brout-Higgs.

Bruno Vacaro

La découverte du boson de Higgs

L'annonce de la découverte d'une nouvelle particule, le 4 juillet 2012 au CERN, est l'épilogue d'un processus complexe. Pour comprendre comment les physiciens des particules ont mis en évidence cette particule, qui semble être le boson de Higgs prévu par les théoriciens, revenons sur les différentes étapes de ce projet.

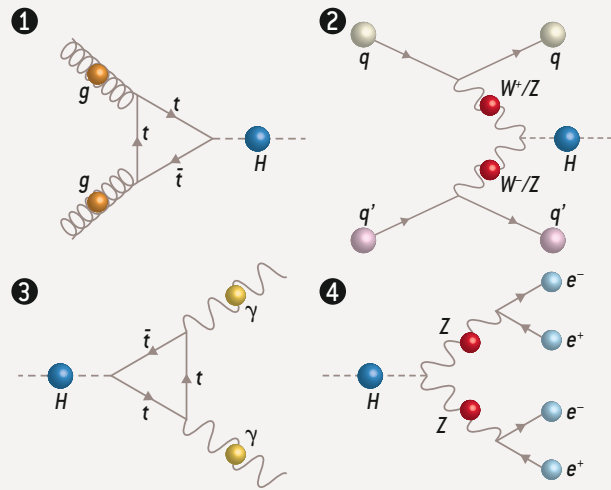
Il faut, avant tout, produire cette particule dans un environnement contrôlé : un collisionneur de particules. Plus la particule recherchée a une masse importante, plus l'énergie de la collision doit être élevée. Le boson de Higgs peut être produit par différents processus, ou modes : la fusion de deux gluons (les bosons véhiculant l'interaction forte), ou la fusion de deux bosons W^+ et W^- ou deux bosons Z (véhiculant l'interaction faible) (voir les diagrammes ① et ②).

Comme la théorie ne donne pas précisément la masse du boson de Higgs, il est nécessaire de fournir beaucoup d'énergie pour garantir sa production. Le LHC (*Large Hadron Collider* ou Grand collisionneur de hadrons) fonctionne à une énergie de huit téraélectronvolts par collision proton-proton. La totalité de l'énergie n'entre pas dans la réaction de production du boson de Higgs, car seul un élément de chaque proton (un quark ou un gluon) interagit, et il ne transporte qu'une fraction de l'énergie totale. La production d'un boson de Higgs lors de ces collisions est un événement rare : en moyenne, une fois tous les 65 milliards de collisions. Le LHC produit 20 millions de collisions par seconde, ce qui permet de créer suffi-

samment de bosons de Higgs, ainsi que d'autres processus également étudiés. La quantité de données étant gigantesque, un système rapide et automatisé utilise les informations brutes des détecteurs pour effectuer une présélection des événements intéressants, réduisant leur nombre à environ 300 par seconde.

Le boson de Higgs, particule instable, a une durée de vie si courte qu'il n'est pas directement détectable. Il se désintègre en d'autres particules pour produire, par exemple, deux photons ou quatre leptons (voir les diagrammes ③ et ④). Le rôle des détecteurs est d'enregistrer les caractéristiques des particules produites.

Un détecteur tel que celui de l'expérience ATLAS est constitué de plusieurs couches concentriques. La couche la plus proche de la collision, baignant dans un fort champ magnétique de deux teslas, sert à mesurer les points de passage des particules chargées afin de reconstruire leur trajectoire, ce qui permet de calculer leur impulsion et leur charge électrique. Ensuite, des calorimètres stoppent la plupart des particules et mesurent leur énergie. Le premier calorimètre est dédié à la mesure de l'énergie des électrons et des photons, le deuxième est spécifique aux hadrons. Les muons, qui interagissent peu, atteignent les détecteurs les plus externes. Les neutrinos, qui traversent l'ensemble des détecteurs sans interagir, se traduisent par un déficit dans le bilan d'énergie. En combinant les informations des différents détecteurs, on peut ainsi reconstituer tous les produits de la collision.



Le boson de Higgs (H) peut être produit par l'un ou l'autre des deux processus suivants : la fusion de gluons (g) avec une boucle de quarks t virtuelle ① et la fusion de deux bosons W^+ et W^- (ou deux bosons Z) émis par des quarks ②. Il peut se désintégrer, par exemple, en deux photons (γ) ③ ou en deux paires de leptons, ici deux paires électron-positron ④.

L'étude des désintégrations du boson de Higgs, en deux photons par exemple, est complexe, car d'autres processus bien connus produisent les mêmes états finals et dans des quantités bien plus importantes ; on parle de bruit de fond, par opposition au signal (les processus où intervient le boson de Higgs).

Une analyse fine des propriétés des particules produites permet de séparer le signal du bruit de fond. Il faut d'abord modéliser les collisions avec les processus du signal et ceux du bruit de fond, ainsi que les interactions des particules avec le détecteur. L'étude de ces simulations permet de mettre en évidence les critères de sélection qui serviront à d'isoler le signal du bruit de fond. Pour s'assurer que les simulations reproduisent bien ce qui se passe dans le détecteur, une étape de comparaison entre les données et la simulation est effectuée sur des processus bien connus, où le boson de Higgs n'intervient pas. Ce test permet de vérifier que les effets du détecteur sont bien simulés et que les processus physiques sont bien compris. Cette étape peut prendre des semaines, voire des années.

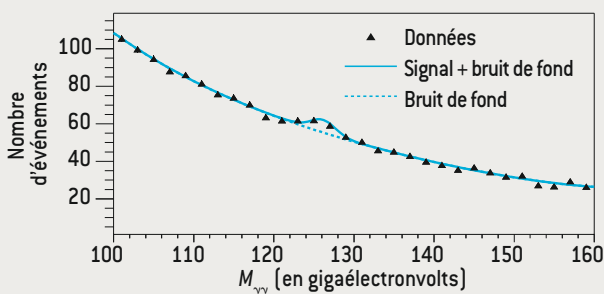
On peut ensuite étudier les processus où le signal correspondant au boson de Higgs pourrait se manifester.

C'est le cas, par exemple, de l'étude des signaux à deux photons : leurs caractéristiques permettent de calculer la masse de la particule qui leur a donné naissance. On obtient, en fonction de cette masse, une distribution statistique des événements, où le bruit de fond est reconnaissable grâce à sa forme d'exponentielle décroissante, alors que le signal apparaît comme une bosse au-dessus du bruit de fond (voir la figure en bas et à gauche).

À cause du faible nombre d'événements, nos yeux ne décèlent pas toujours un signal. On utilise des méthodes statistiques, dont l'une des indicateurs est la probabilité que le bruit de fond produise un excès ressemblant au signal. Si cette probabilité est inférieure à une chance sur trois millions (correspondant à cinq écarts-types d'une distribution gaussienne), on peut considérer qu'on a découvert un signal. C'est ce que les équipes du CERN ont obtenu. Cette particule, avec une masse de l'ordre de 125 gigaélectronvolts, ressemble au boson de Higgs recherché. Comme l'explique John Ellis, un long travail reste à faire pour mesurer les propriétés de cette nouvelle particule.

Fabien Tarrade

ATLAS – CERN
Université de Carleton, Canada



La distribution des événements obtenue par l'expérience ATLAS en fonction de la masse $M_{\gamma\gamma}$, calculée *a posteriori* et dont provient la paire de photons détectés, a une forme caractéristique. Le bruit de fond décroît de façon exponentielle, tandis que la bosse, centrée sur environ 125 gigaélectronvolts, correspondrait au signal du boson de Higgs.

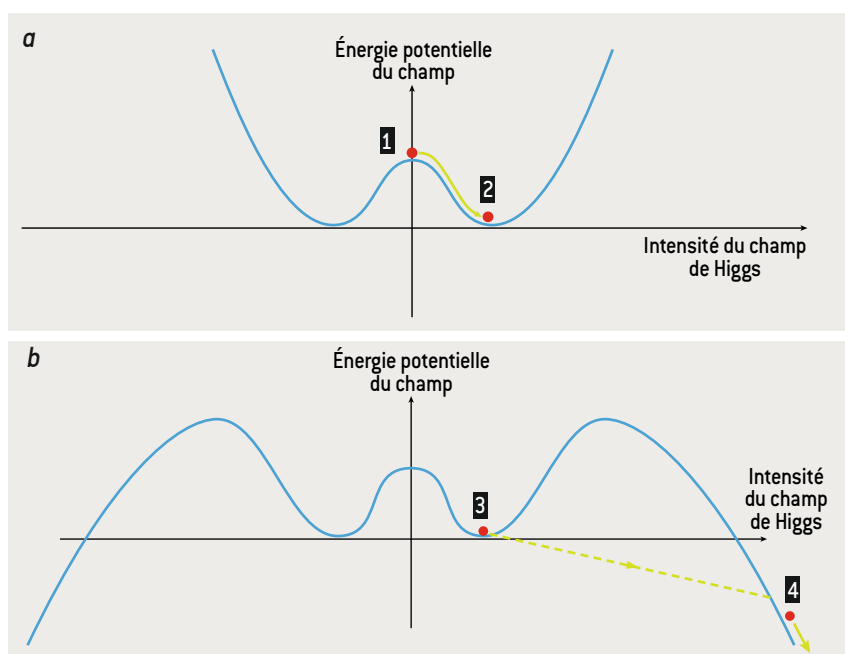
de calculer les couplages du boson de Higgs aux autres particules. Comme ces couplages diffèrent de ceux du modèle standard, les données du LHC devraient mettre à l'épreuve ces scénarios et en exclure certains.

Si, au contraire, le boson de Higgs est bien une particule élémentaire, de nombreux théoriciens pensent qu'il devra être intégré à un cadre plus vaste que le modèle standard, telle la supersymétrie. Dans cette théorie, chaque particule du modèle standard aurait un partenaire ayant des propriétés semblables, à l'exception du spin. Les corrections sur la masse du boson de Higgs dues aux particules supersymétriques compenseraient alors celles des particules du modèle standard. La masse du boson de Higgs ne deviendrait pas infinie. Qui plus est, dans l'hypothèse de la supersymétrie, l'état actuel de l'Univers serait stable et la masse du boson de Higgs serait inférieure à 130 GeV, comme observé.

Un ou plusieurs bosons de Higgs ?

En fait, la théorie de la supersymétrie prévoit non pas un, mais cinq bosons de Higgs, dont le moins lourd aurait un comportement légèrement différent de celui du boson de Higgs du modèle standard. La chasse est donc ouverte pour trouver ces autres bosons de Higgs et mesurer des signes caractéristiques de la supersymétrie dans la production et la désintégration du boson qui a été découvert.

En plus d'étudier de près la nouvelle particule et chercher d'autres bosons de Higgs, les physiciens du LHC traquent des signes directs de la production de particules supersymétriques. Dans de nombreux modèles, la particule supersymétrique la plus légère est électriquement neutre, interagit faiblement avec les autres particules et est stable. Elle aurait été produite dans les premiers instants de l'Univers et serait présente en grandes quantités aujourd'hui sous la forme de matière noire. L'existence de cette dernière a été postulée par les astrophysiciens et les cosmologistes pour expliquer de nombreuses observations. Au LHC, les particules supersymétriques seraient détectées sous la forme d'événements dans lesquels une partie de l'énergie et de la quantité de mouvement de la collision serait manquante, car emportée par les



3. LE MÉCANISME DE BRISURE DE SYMÉTRIE proposé par F. Englert, R. Brout et P. Higgs suppose que les équations de la théorie vérifient une certaine symétrie, mais pas les solutions des équations. On peut représenter de façon simplifiée le potentiel supposé du champ de Higgs en fonction de l'intensité du champ [a, courbe bleue]. Une intensité nulle du champ [1] correspond à une solution symétrique, mais pas à l'état de plus basse énergie : cette solution est donc instable. On a alors une transition spontanée vers une position stable [2 par exemple], mais qui n'est plus symétrique. Le champ a alors une intensité non nulle, ce qui est à l'origine de la masse des particules. Pour un boson de Higgs de masse inférieure à 127 GeV, si on inclut des corrections quantiques, l'équation du potentiel est modifiée (b). La position [3] n'est plus celle de plus basse énergie. Par effet tunnel, le champ pourrait passer en position [4] et son intensité continuer à croître sans limite, ce qui modifierait profondément la physique de l'Univers.

particules de matière noire. De tels signaux n'ont pas encore été observés assez fréquemment pour être attribués à des processus en dehors du modèle standard. Les chances d'observer de tels événements augmenteront à partir de 2015, quand le LHC fonctionnera avec une énergie de collision plus importante (14 téraélectronvolts au lieu de 8 actuellement).

Le boson de Higgs pourrait nous éclairer sur d'autres questions encore en physique des particules et en cosmologie. Dans le modèle du Big Bang, matière et antimatière auraient été produites dans des proportions égales, mais se seraient annihilées en produisant des photons. Si ce scénario est correct, toute la matière et l'antimatière devraient avoir disparu. Dans ce cas, pourquoi l'Univers contient-il de la matière et pas du tout d'antimatière ? Cela pourrait s'expliquer par une asymétrie de comportement entre la matière et l'antimatière, qui serait responsable d'un léger excès de matière et qui aurait donc survécu à l'annihilation. Le modèle standard présente une telle asymétrie, mais elle

est insuffisante. La supersymétrie et divers modèles contiennent d'autres sources d'asymétrie susceptibles d'expliquer la disparition de l'antimatière. Ces asymétries supplémentaires pourraient apparaître directement ou indirectement dans les propriétés du boson de Higgs.

Si la nouvelle particule découverte au LHC est bien le boson de Higgs, elle complètera notre description de la matière visible de l'Univers et des processus qui ont régi le Big Bang après le premier milliardième de seconde. Comme nous l'avons vu, le boson de Higgs pourrait être lié à la matière noire et avoir joué un rôle dans la production de la matière dans l'Univers. C'est cependant une particule très différente de toutes celles que nous connaissons, et elle pose presque autant de questions qu'elle n'apporte de réponses. Son existence même et la valeur de sa masse suggèrent que le modèle standard ne peut être le fin mot de l'histoire, et que le LHC pourrait nous révéler des pans d'une nouvelle physique. La quête se poursuit. ■

LES SALPES

reines du plancton marin

Jean-Claude Braconnot

Les salpes, une des formes les plus abondantes de plancton animal, filtrent l'eau de mer à une vitesse remarquable. Cette propriété leur confère un rôle important dans le fonctionnement du milieu marin.

Avila Beach, comté de San Luis Obispo, Californie. Le 26 avril 2012, la centrale nucléaire locale, Diablo Canyon, au bord de l'océan Pacifique, est contrainte de stopper d'urgence son fonctionnement. Le circuit de refroidissement de ses deux réacteurs est alimenté à l'eau de mer; or, depuis deux jours, des vents du Sud charrient vers l'entrée du circuit... des salpes. Ces organismes gélatineux en forme de tonneau, longs de un à une trentaine de centimètres selon les espèces, se sont agglutinés en si grand nombre sur le filtre du circuit qu'ils l'ont bouché pendant plusieurs jours.

Les salpes, deuxième forme la plus abondante de zooplancton – le plancton animal – après les copépodes (de petits crustacés), sont de vieux ennemis des pêcheurs marins. Le 13 avril 1979, notamment, entre Saint-Tropez et la frontière italienne, la pêche sur la côte méditerranéenne fut catastrophique suite à une invasion de l'espèce *Salpa fusiformis*: «Il y avait en suspension, et en profondeur, des millions de "choses" [qui] sem-

blaient respirer», rapporta un pêcheur dans le quotidien *Nice-matin*. Cette espèce est aussi bien connue des baleiniers industriels chassant dans l'Antarctique: là où les salpes abondent, il n'y a aucune chance de capturer des baleines à fanons, car celles-ci n'y trouvent plus de crevettes du krill, leur nourriture, et migrent à leur recherche. Les salpes, comme le krill, se nourrissent de phytoplancton, le plancton végétal, mais se reproduisent plus vite, si bien qu'elles l'emportent sur leur compétiteur...

La place de ces animaux gélatineux, très peu consommés, dans l'écosystème marin, n'a pas toujours été comprise. On a longtemps pensé qu'ils représentaient une sorte d'impasse dans la chaîne alimentaire, où ils ne retombaient que lors de leur décomposition. Aujourd'hui, grâce à l'étude de leur cycle de vie et de l'impact de ce cycle sur les quantités de carbone organique disponible dans les fonds marins, on comprend mieux leur rôle fondamental dans le milieu. Gros consommateurs de plancton végétal, sans

