

ne les a pas encore repérées au LHC. Mais ces particules qui semblent incontournables soulèvent des difficultés par leur influence sur les particules ordinaires. Comment ? La réponse se trouve du côté de l'étrangeté quantique.

En théorie quantique des champs, les particules interagissent *via* l'échange de particules dites virtuelles qui n'ont qu'une existence très brève. Par exemple, la répulsion électrique entre deux électrons est décrite, en première approximation, par l'échange d'un photon virtuel entre les deux électrons. Dans les années 1940-1950, le physicien américain Richard Feynman a conçu des règles élégantes pour transcrire les calculs correspondant à ces processus sous la forme de diagrammes visuellement parlants.

Mais en physique quantique, tout ce qui n'est pas strictement interdit se produit effectivement, au moins de temps à autre. Ainsi, les électrons peuvent interagir entre eux, mais aussi avec toutes les particules très massives dont l'existence est prédite par les extensions du modèle standard. Or ces interactions conduisent à des difficultés – à moins qu'une propriété telle que la supersymétrie ne vienne les résoudre.

Voyons comment un tel problème se manifeste dans le cas du boson de Higgs. Cette particule confère aux autres particules élémentaires leur masse par son interaction avec elles. S'il existe des particules superlourdes, alors le boson de Higgs interagirait aussi avec elles par l'intermédiaire de particules virtuelles. Or le boson de Higgs acquiert une partie de sa propre masse par des interactions virtuelles. En présence de particules superlourdes, il deviendrait lui-même superlourd. Par conséquent, toutes les particules que nous connaissons devraient être superlourdes et les conséquences seraient catastrophiques pour l'Univers. Nous deviendrions tous des trous noirs. Or ce n'est pas ce que nous observons. Il existe donc un mécanisme qui empêche cette catastrophe. Et rien n'explique aussi bien que la supersymétrie pourquoi cela n'arrive pas.

Les principes fondamentaux de la supersymétrie ont été développés dans les années 1970 par des physiciens qui s'intéressaient aux relations entre les symétries et la physique des particules. La supersymétrie n'est pas à proprement parler une théorie, mais plutôt un cadre théorique. De nombreux modèles sont qualifiés de

supersymétriques, car ils sont fondés sur le même type de symétries.

Plusieurs symétries classiques sont intégrées dans les lois physiques portant sur les particules et leurs interactions. En effet, ces lois ne doivent pas dépendre de l'endroit où vous êtes, de la direction considérée, de votre état de mouvement. La physique est la même dans toutes ces situations et les symétries le garantissent. À ces symétries spatio-temporelles (symétries par translation dans le temps et dans l'espace, symétrie par rotation) correspondent des lois de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et du moment cinétique.

Les symétries font la loi

La physique quantique semble respecter toutes ces symétries. Les scientifiques ont même utilisé les symétries pour prévoir de nouveaux phénomènes. Par exemple, le physicien britannique Paul Dirac a montré en 1930 que quand on combine la mécanique quantique avec la relativité restreinte, les symétries de l'espace-temps impliquent qu'à chaque type de particule correspond une antiparticule (de même masse mais de charge opposée). Cette idée semblait folle à l'époque parce que personne n'avait jamais observé d'antiparticule. Mais les expériences ont prouvé que Dirac avait raison : le zoo des particules élémentaires est dédoublé.

La théorie de la supersymétrie repose sur un argument similaire à celui de Dirac. Elle postule qu'il existe une extension quantique de l'espace-temps nommée le superspace, par rapport auquel les particules ont une symétrie.

Le superspace ne présente pas de dimensions spatiales ordinaires telles que gauche-droite ou haut-bas, mais plutôt des dimensions « fermioniques ». Le mouvement dans une dimension fermionique est très limité. Dans une dimension spatiale ordinaire, vous pouvez vous déplacer aussi loin que vous voulez dans toutes les directions, sans restriction de la taille ou du nombre de pas que vous faites. En revanche, dans une dimension fermionique, vos pas sont quantifiés, et une fois que vous avez fait un pas vous avez atteint l'extrémité de cette dimension fermionique. Si vous voulez faire d'autres pas, vous devez soit passer à une autre dimension fermionique, soit reculer d'un pas.

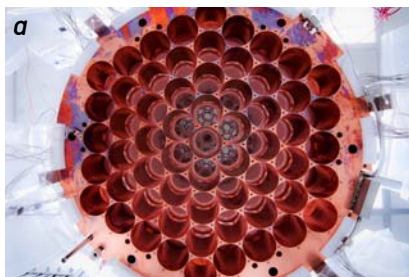
LES AUTEURS



Joseph LYKKEN est physicien théoricien au Laboratoire américain de l'accélérateur Fermi de Batavia, dans l'Illinois.



Maria SPIROPULU est physicienne des particules expérimentatrice à l'Institut de technologie de Californie. Après avoir travaillé au Tevatron du Laboratoire Fermi, elle participe désormais à l'expérience CMS, au LHC du CERN.



Carlos H. Falham



Armand Flasson

3. LA RECHERCHE DE MATIÈRE NOIRE sous forme de particules supersymétriques se fait par différentes approches, outre le LHC. Dans l'expérience LUX, dans le Dakota du Sud (a), les physiciens cherchent des collisions très rares de ces particules avec la matière ordinaire. Les télescopes HESS-2, en Namibie (b), étudient par exemple le rayonnement énergétique provenant du centre galactique. Il pourrait être produit par l'annihilation de paires de particules de matière noire.

Un boson qui fait un pas dans une dimension fermionique se transforme en fermion; inversement, un fermion se transforme en un boson après un pas. De plus, si la particule effectue un pas dans une dimension fermionique et qu'elle revient ensuite en arrière, elle se sera déplacée d'une petite quantité dans l'espace ou le temps ordinaires. Autrement dit, dans les théories supersymétriques, le mouvement dans les dimensions fermioniques est lié de façon complexe au mouvement dans l'espace-temps ordinaire.

Pourquoi tout cela est-il important? Parce que dans un monde supersymétrique, les symétries entre les dimensions fermioniques restreignent la façon dont les particules peuvent interagir. En particulier, les supersymétries dites naturelles éliminent dans une large mesure les effets des particules virtuelles. Les supersymé-

tries naturelles empêchent le boson de Higgs d'interagir avec les particules les plus lourdes et d'augmenter ainsi inconsiderablement sa masse. Les théories qui sont supersymétriques mais non « naturelles » obligent à trouver des mécanismes complémentaires pour réprimer les effets des particules virtuelles. Ainsi, la supersymétrie naturelle fournit aux physiciens des solutions aux difficultés du modèle standard.

Toutes les théories supersymétriques impliquent que chaque boson a une particule partenaire fermionique, un « superpartenaire », et inversement. Or aucune particule connue n'est le superpartenaire d'une autre. Si la supersymétrie existe, les superpartenaires de toutes les particules du modèle standard sont à découvrir.

Et c'est bien là le problème. Dans les versions les plus simples et les plus efficaces de la supersymétrie (la supersymétrie

naturelle), les superpartenaires ne devraient pas être beaucoup plus lourds que le boson de Higgs. Cela signifie que nous devrions être capables de les détecter au LHC. Et si l'on avait posé la question aux physiciens il y a dix ans, la plupart auraient prédit que l'on aurait désormais trouvé des preuves de l'existence des superpartenaires.

La traque au LHC commence

Mais ce n'est pas le cas. Maria Spiropulu, l'une d'entre nous, garde en mémoire cette nuit de 2009 où elle est allée prendre le poste de chef de quart au détecteur CMS peu avant minuit. Dans la salle de contrôle, une foule de physiciens suivaient chacun un sous-système de l'énorme détecteur complexe de 14 000 tonnes. À deux heures du matin, elle reçut un appel du centre de contrôle du

Une voie alternative : un monde aux dimensions cachées

Le terrain de jeu des physiciens est l'espace-temps où ils vivent et travaillent. Il existe plusieurs bonnes raisons de penser que cet espace-temps comporte quatre dimensions. Mais imaginer qu'il pourrait en cacher davantage apporte des solutions à certains problèmes du modèle standard.

L'intensité des forces électromagnétique et gravitationnelle, celles qui gouvernent l'essentiel de notre vie au quotidien, décroît comme l'inverse du carré de la distance aux sources de ces forces. Cela serait lié au fait que l'espace comporte trois dimensions. La raison est géométrique : d'une part, le champ associé à une source ponctuelle a une symétrie sphérique et, d'autre part, la surface d'une sphère est proportionnelle au carré de son rayon... dans un espace euclidien à trois dimensions. Et pour conserver le flux associé au champ, l'intensité doit décroître comme l'inverse du carré de la distance à la source.

Mais ce raisonnement s'applique à des échelles macroscopiques. Le monde microscopique, celui des particules élémentaires – quarks, leptons,

boson de Higgs et autres bosons de jauge –, est le règne de la physique quantique et de la relativité restreinte qui n'ont que faire de notre perception macroscopique de l'espace et du temps. L'intensité de la force électrostatique entre deux électrons est-elle toujours proportionnelle à l'inverse du carré de la distance qui les sépare? Pas exactement. Il y a des facteurs correctifs, mesurés aujourd'hui avec une grande précision, qui sont d'autant plus importants que les deux électrons sont proches. Doit-on y voir le signe que les électrons ne se propagent plus dans un espace-temps à quatre dimensions? Non, bien au contraire. Car ces corrections sont exactement celles prédites par le modèle standard et sont la signature du comportement quantique des particules

élémentaires. Pourquoi alors imaginer un monde avec des dimensions en plus? Parce qu'un espace-temps plus grand a bien d'autres avantages.

Ainsi, dès les années 1920, les physiciens Theodor Kaluza et Oskar Klein ont montré que l'existence de dimensions supplémentaires pourrait conduire à une description unifiée des interactions fondamentales. Ils ont montré que les équations à quatre dimensions de la gravité et de l'électromagnétisme pouvaient être déduites simultanément des seules équations de la gravité à cinq dimensions. Dans les années 1980, le développement de la théorie des cordes a permis de comprendre que réconcilier gravité et physique quantique demandait plus d'espace : seuls des espaces-temps à 10, 11 ou 26 dimensions possédaient les propriétés de symétries nécessaires pour rendre la théorie viable.

La nécessité de ces dimensions supplémentaires pour formuler une théorie quantique de la gravitation a encouragé

l'émergence d'idées révolutionnaires. À la fin des années 1990, on a compris que ces dimensions supplémentaires pouvaient offrir une alternative à la supersymétrie pour comprendre pourquoi la gravité est une force si faible comparée aux autres interactions fondamentales. Deux scénarios importants ont été proposés.

Selon la première idée, émise par Nima Arkani-Hamed, de l'Institut d'études avancées de Princeton, Savvas Dimopoulos, de l'Université Stanford, et Gia Dvali, des Universités de New-York et de Munich, la force de gravitation serait faible parce que diluée dans de grandes dimensions supplémentaires, mais hermétiques à la matière ordinaire et donc à nos sens. Le mariage de la gravité et de la physique quantique aurait lieu à des échelles d'énergies accessibles au LHC. Dans les débris des collisions de protons, les restes de l'évaporation de mini-trous noirs pourraient apparaître.

Une autre idée est celle de Lisa Randall, de l'Université Harvard,