

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,

CERN de l'autre côté de l'anneau du LHC, long de 27 kilomètres : ils allaient effectuer les collisions de protons aux plus hautes énergies jamais réalisées.

Elle a donné le signal pour qu'on active avec précaution chaque portion du détecteur. Un mur d'écrans a commencé à s'animer, les dispositifs électroniques ultrarapides affichant à toute vitesse les collisions qui se produisaient au rythme de 20 millions par seconde à 100 mètres sous terre. Après avoir traqué la supersymétrie pendant une décennie au collisionneur *Tevatron* du Fermilab, aux États-Unis, elle avait le cœur qui palpitait à l'idée de reconnaître certains motifs caractéristiques de la supersymétrie. Il est tentant d'analyser les collisions par inspection visuelle, mais il est impossible de faire des découvertes de cette façon. Difficile de se raisonner et de rester calme ! Mais elle savait que ce n'était que le début.

Et, quand on construit un collisionneur à sept milliards d'euros avec ses détecteurs géants, on ne le met pas en route en s'attendant à des découvertes la première nuit – ni même la première année. Et pourtant les attentes de M. Spiropulu et ses collègues étaient grandes dès le début.

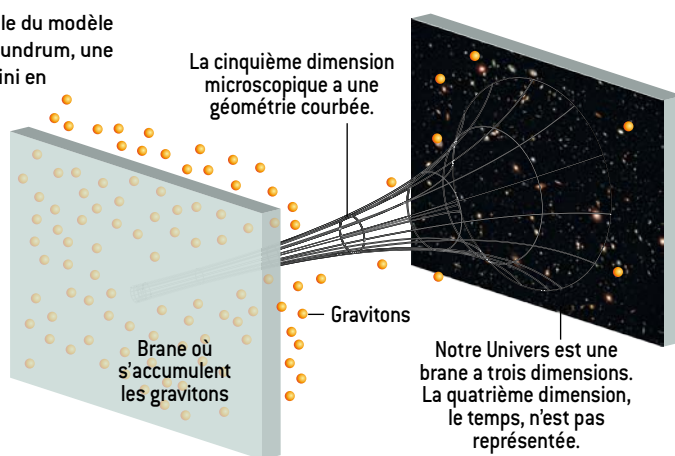
Sur CMS (et sur ATLAS), ils avaient élaboré un plan détaillé des analyses à effectuer sur les données du LHC pour découvrir la supersymétrie. Ils s'étaient préparés pour détecter des particules de matière noire dans des signaux de supersymétrie, non pas directement visibles mais sous forme d'« énergie manquante » : la matière noire n'interagit pas avec les détecteurs, mais emporte une partie de l'énergie totale de la collision, ce qui trahit leur présence (d'autres types d'expériences traquent la matière noire, voir la figure 3).

Nous étions allés jusqu'à rédiger une ébauche d'article annonçant la découverte.

Cet article n'a pas été écrit, car les physiciens du LHC n'ont toujours rien trouvé. Ils procèdent de façon systématique et rigoureuse, ce qui leur a permis d'éliminer de nombreux scénarios possibles. Les superpartenaires ne peuvent pas être trop légers, car ils auraient déjà été mis en évidence. Et on suppose qu'ils ne peuvent pas être trop lourds, parce qu'alors ils ne satisferaient pas les critères nécessaires pour supprimer les effets gênants des particules virtuelles. Si le LHC ne les découvre pas dans sa prochaine campagne, la crise dans ce domaine de la physique prendra de l'ampleur.

Malgré ces difficultés, les théoriciens ne sont pas prêts à abandonner la supersymétrie, même s'ils doivent se replier sur une version plus générale qui n'a pas toutes les

DANS LA VERSION originale du modèle de Lisa Randall et Raman Sundrum, une brane (un objet étendu défini en théorie des cordes) à trois dimensions contient notre Univers. Ce dernier est séparé d'une autre brane par une cinquième dimension fortement courbée. La gravité est faible dans notre brane car les gravitons, particules hypothétiques véhiculant cette force, se concentrent sur l'autre brane.



et Raman Sundrum, de l'Université du Maryland : la gravité est faible parce que les dimensions supplémentaires seraient fortement courbées sous l'effet d'une énergie du vide importante. Cette courbure éloignerait les gravitons – les hypothétiques particules véhiculant la gravité qui peuvent se déplacer dans les dimensions supplémentaires – de la matière ordinaire. Cela réduirait l'intensité de la gravité. Même si ce modèle prédit lui aussi de nouvelles particules accessibles aux détecteurs d'ATLAS et CMS, la gravitation

conserverait un comportement classique jusqu'à des énergies proches de l'échelle de Planck, soit 10^{19} gigaélectronvolts.

Le cadre de ces deux scénarios est suffisamment riche pour, par exemple, expliquer l'abondance de la densité de matière noire dans l'Univers ou rendre compte de l'accélération de l'expansion de l'Univers.

Toutefois la récente observation de la polarisation des photons du fond diffus cosmologique par l'expérience BICEP2, interprétée comme la

manifestation d'ondes gravitationnelles primordiales engendrées à l'époque de l'inflation, semble peu compatible avec une faible échelle de gravitation quantique telle que la prédit le premier scénario.

Le champ d'application des théories physiques intégrant des dimensions supplémentaires s'est encore élargi lorsqu'on a compris que ces dernières pouvaient être un artefact mathématique pour décrire des systèmes fortement couplés dans un simple espace à quatre dimensions. Ce nouveau

chapitre a débuté avec la conjecture audacieuse d'un théoricien des cordes, Juan Maldacena, à Princeton, qui a postulé en 1997 que, de la même façon qu'en mécanique quantique ondes et particules sont deux descriptions équivalentes d'une même réalité, une nouvelle force peut être décrite de façon équivalente par une nouvelle dimension d'espace. Cette dualité est très féconde pour décrire une interaction intense qui ne peut être appréhendée par les méthodes de calcul habituelles, et offre une description géométrique dans laquelle les calculs peuvent être conduits simplement. Cette approche a été appliquée avec succès pour étudier, par exemple, l'interaction forte dans le cadre de la chromodynamique quantique. Ces idées ont même trouvé des applications pour comprendre certaines propriétés de matériaux supraconducteurs et de superfluides.

– **Christophe Grojean**
Institut catalan de recherches
et d'études avancées et Institut
de physique des hautes énergies
de Barcelone