

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.

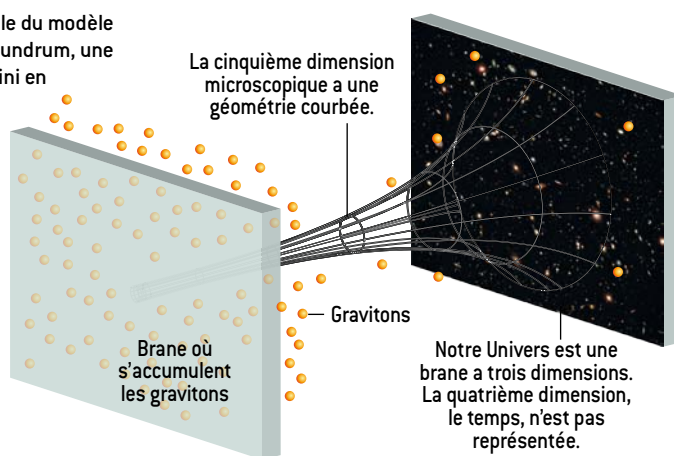
Sur CMS (et sur ATLAS), ils avaient élaboré un plan détaillé des analyses à effectuer sur les données du LHC pour découvrir la supersymétrie. Ils s'étaient préparés pour détecter des particules de matière noire dans des signaux de supersymétrie, non pas directement visibles mais sous forme d'« énergie 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

qualités qu'on attendait de la supersymétrie naturelle. Rappelons que la supersymétrie est avant tout un cadre qui permet de développer des modèles du monde des particules, et non un modèle en lui-même, si bien que les données futures pourraient conforter l'idée de supersymétrie même si tous les modèles actuels sont exclus.

Nima Arkani-Hamed, physicien à l'Institut d'études avancées de Princeton, aux États-Unis, expliquait dans un exposé ce qui pourrait être l'avenir de la supersymétrie: «Si on ne trouve pas de trace de la supersymétrie au LHC, alors les théoriciens bâtiront de nouveaux modèles supersymétriques qui placent les superpartenaires juste hors de portée des expériences.»

Cette fidélité indéfectible à la supersymétrie est partagée. Cependant, les physiciens des particules admettent que l'idée de la supersymétrie naturelle est déjà mal en point et qu'elle finira dans les oubliettes de l'histoire si l'on ne trouve pas bientôt des superpartenaires.

Et si la supersymétrie ne décrivait pas le monde, quelles sont les alternatives? Comme

nous l'avons expliqué, le modèle standard pose des questions sans réponses telles que la stabilité de la masse du boson de Higgs et pourquoi elle ne devient pas très grande. Il est donc indispensable de s'aventurer au-delà du modèle standard. Voici trois pistes possibles. Toutes entraînent la réflexion en physique fondamentale et en cosmologie dans des directions radicalement différentes.

SI LA SUPERSYMÉTRIE EST ABSENTE à la fin de cette campagne, la physique fondamentale se trouvera à la croisée des chemins: abandonner la supersymétrie ou persévérer.

Une première approche est d'invoquer le multivers: notre Univers ne serait qu'un parmi un très grand nombre. Pourquoi cette idée? Les intensités des forces fondamentales et les valeurs des masses des particules font intervenir des nombres dont l'origine est un mystère. Et la moindre variation sur ces nombres aurait conduit à un univers très différent. Par exemple, avec d'autres valeurs, même légèrement différentes, les atomes seraient instables et

la vie ne pourrait pas apparaître. Dans le jargon de la physique théorique, on dit que l'Univers est «finement ajusté». On peut tenter d'expliquer ces valeurs, comme avec la supersymétrie, ou considérer qu'elles sont le fruit du hasard. Cette idée n'est pas très satisfaisante, mais elle devient plus séduisante si l'on postule un multivers.

Dans ce scénario, le Big Bang a produit non seulement l'Univers que nous voyons, mais aussi un grand nombre d'autres univers – que nous ne percevons pas. Dans ce cas, la réponse aux questions telles que «Pourquoi l'électron a-t-il cette masse-là?» serait du type: «C'est juste le hasard, d'autres parties du multivers ont des électrons de masse différente.» Ces supposés ajustements fins qui nous intriguent tant ne seraient que des accidents de l'histoire cosmique. Seuls les univers dont les paramètres ont les bonnes valeurs, compatibles avec le développement de la vie, contiendront à terme des physiciens qui vont s'étonner de ne pas trouver la supersymétrie naturelle au LHC.

Pour de nombreux physiciens, l'hypothèse du multivers est troublante et se rapproche trop de l'idée que les anomalies de la physique des particules sont dues à des «armées d'anges invisibles». Comme le dit le physicien américain et prix Nobel David Gross, faire appel au multivers, à des conditions initiales impossibles à connaître, c'est un peu «s'avouer vaincu et jeter l'éponge».

Une autre possibilité pour obtenir les valeurs des paramètres du modèle standard est explorée par Lisa Randall, de l'Université Harvard, et Raman Sundrum, de l'Université du Maryland. Ces deux physiciens ont montré qu'une dimension supplémentaire présentant une géométrie «tordue» peut expliquer la faiblesse de la gravitation comparée aux autres forces connues. Si de telles dimensions supplémentaires sont microscopiques, nous pourrions ne pas les avoir encore remarquées, mais leur taille et leur forme pourraient jouer un rôle important en physique des particules de haute énergie.

Dans ces modèles, plutôt que de trouver des superpartenaires au LHC, nous pourrions découvrir des modes de Kaluza-Klein, des particules exotiques lourdes dont la masse correspond en fait à l'énergie de leur mouvement dans les dimensions supplémentaires (voir l'encadré pages 44 et 45).

AU BORD DE LA CATASTROPHE

Le champ de Higgs, associé au boson du même nom, est un champ qui imprègne tout l'espace. Il confère aux particules leur masse et semble stable. Mais les masses mesurées du boson de Higgs et du quark top (une autre particule élémentaire) indiquent que le champ de Higgs se trouve dans un état métastable (stable pendant un temps limité). Des effets quantiques pourraient le faire passer dans un état plus stable, d'énergie inférieure. La masse de toutes les particules changerait alors subitement, ce qui transformerait brutalement l'Univers. La supersymétrie contribuerait cependant à stabiliser le champ de Higgs.

