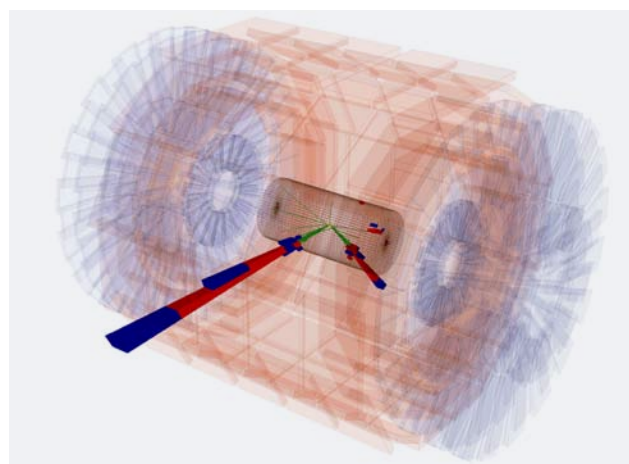




CERN/CMS

2. L'AUGMENTATION DE L'ÉNERGIE DES COLLISIONS permettra à l'expérience CMS (à gauche) de rechercher des particules supersymétriques plus massives. Un signal positif de supersymétrie pourrait ressembler à cette fausse alerte enregistrée en 2012 (à droite) : deux jets de particules (rouge et bleu) partent vers le bas, ce qui suggère que des superpartenaires, invisibles pour le détecteur, s'échappent vers le haut.

La supersymétrie est une solution efficace et mathématiquement élégante pour expliquer des tracas qui tourmentent les physiciens depuis longtemps. Cette théorie apporte des réponses à toute une série de questions importantes. Pourquoi les particules ont-elles ces masses-là ? Pourquoi les forces ont-elles ces intensités-là ? En d'autres termes : pourquoi l'Univers est-il tel qu'il est ? De plus, la supersymétrie prévoit l'existence de particules nouvelles, des « superpartenaires » de celles qu'on connaît, et jusqu'ici non observées. Ces particules pourraient constituer la matière noire, qui représente 85 pour cent de la matière de l'Univers et qui se manifeste uniquement par des effets gravitationnels.

Pour de nombreux physiciens des particules, la théorie de la supersymétrie est nécessairement vraie, tant elle est convaincante. Ils espèrent que le LHC découvrira ces superpartenaires, ce qui prouverait sa validité.

Quand nous avons téléchargé les données de la collision mentionnée plus haut, nous avons immédiatement pensé y voir un signal de la supersymétrie. Deux jets de particules partaient du centre du détecteur, vers le bas. Des particules invisibles pour les détecteurs étaient-elles parties vers le haut, peut-être des superpartenaires ? Mais l'analyse détaillée des différents signaux nous a rapidement fait supposer un mauvais fonctionnement du détecteur (voir la figure 2). Et en effet, c'était bien là l'explication.

Les résultats de la première campagne de fonctionnement du LHC ont exclu presque toutes les versions les mieux étudiées de la supersymétrie, celles où les superpartenaires

sont plutôt légers. Pour l'instant, ces résultats négatifs n'ont pas provoqué une crise à grande échelle de la physique des particules, mais plutôt une inquiétude généralisée. Le LHC entamera sa prochaine campagne au début de 2015, avec des collisions à des énergies plus élevées (14 téraélectronvolts), ce qui permettra aux chercheurs des expériences ATLAS et CMS de débusquer (s'ils existent) des superpartenaires plus lourds que dans les modèles précédents. Si, à la fin de cette campagne, la supersymétrie se dérobe toujours, la physique fondamentale se trouvera à la croisée des chemins : abandonner les travaux de toute une génération faute de preuves, ou persévérer dans la même voie en espérant qu'un collisionneur plus puissant révélera un jour des particules liées à la supersymétrie.

La supersymétrie, hypothèse nécessaire

L'histoire des sciences a connu de longues quêtes couronnées de succès – ne serait-ce que la découverte récente, au LHC, du boson de Higgs, particule qui s'est fait attendre près de 40 ans. Mais pour le moment, la plupart des théoriciens des particules s'impatientent, tandis qu'au LHC on se prépare à tester les fondations de l'édifice théorique qu'ils ont mis un demi-siècle à bâtir.

Nous disposons en physique subatomique d'une théorie prédictive très efficace, le modèle standard, qui décrit les particules et leurs interactions. Dans ce modèle, qui est une théorie quantique des champs (fondée sur la physique quantique et la théorie de

la relativité restreinte d'Einstein), la matière est constituée d'un type de particules, les fermions (du nom du physicien italien Enrico Fermi). Ces particules de matière interagissent *via* l'échange d'une autre variété de particules, les bosons (du nom du physicien indien Satyendranath Bose).

Le modèle standard décrit fort bien ce qui se passe au niveau subatomique. Il a été testé depuis les années 1970 sans présenter de faille. Mais les ennuis commencent quand on s'interroge sur l'origine des caractéristiques du modèle standard. Par exemple, ce modèle stipule qu'il existe trois types différents de leptons (des fermions) : l'électron, le muon et le tau. Pourquoi trois ? Pourquoi pas deux, ou quatre, ou quinze ? Le modèle standard ne l'explique pas. De même, on peut se demander pourquoi l'électron a une masse d'une telle valeur et pas une autre. Par exemple, pourquoi est-il plus léger que le boson de Higgs ? Sur ce sujet encore, le modèle standard ne dit rien.

Les physiciens théoriciens réfléchissent beaucoup à ces questions. Ils construisent des modèles plus fondamentaux dont le modèle standard serait la manifestation à basse énergie. Ces théories sont censées expliquer comment le modèle standard fonctionne et ce qui détermine les valeurs de ses paramètres. La théorie des cordes, par exemple, est l'une des voies explorées parmi bien d'autres.

Cependant, tous ces modèles plus fondamentaux impliquent l'existence de nouvelles particules hypothétiques. Celles-ci pourraient avoir une masse extrêmement élevée, d'où la difficulté à les créer dans les expériences. Cela expliquerait pourquoi on

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.

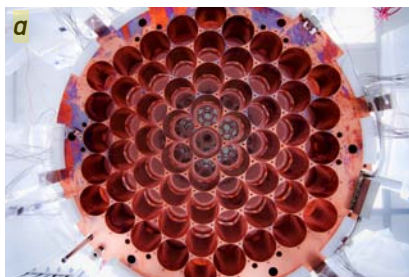
LES AUTEURS



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. Faham



Armand Fausson

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.