

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.

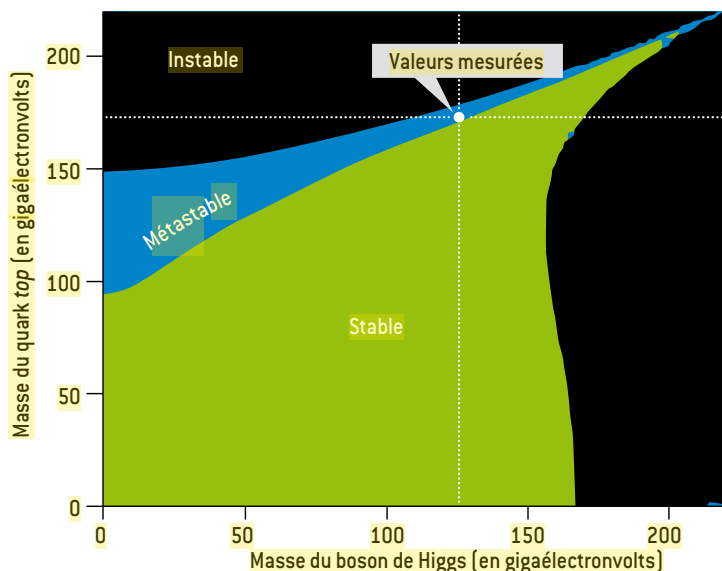
Pour de nombreux physiciens, l'hypothèse du multivers est troublante et se rapproche trop de l'idée que les anomalies de la physique des particules sont dues à des «armées d'anges invisibles». Comme le dit le physicien américain et prix Nobel David Gross, faire appel au multivers, à des conditions initiales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



Enfin, il est possible que vouloir à tout prix supprimer les effets des particules virtuelles, comme en supersymétrie, n'est pas la bonne idée. Une nouvelle approche consiste à intégrer ces effets pour expliquer d'où vient la masse. L'idée est similaire à ce qui se passe quand les physiciens calculent la masse du proton. Cette particule n'est pas élémentaire. Il s'agit d'un assemblage de trois quarks, qui ont une masse minuscule, et de gluons, dont la masse est nulle. Or le proton est beaucoup plus lourd que la somme des quarks et des gluons dont il est composé. D'où vient cette masse ? Elle vient de l'énergie des champs associés à l'interaction forte qui assure la cohésion du proton. Notre compréhension de ces champs nous permet de prédire précisément la masse du proton.

D'ordinaire, nous pouvons calculer des masses à partir d'autres masses. Cependant, le modèle standard ne permet pas de prévoir la masse du boson de Higgs – nous devons la mesurer. Il semble étonnant que l'on puisse calculer la masse du proton, mais pas celle du boson de Higgs. À partir des travaux de William Bardeen, physicien au Fermilab, quelques théoriciens suggèrent que la masse du boson de Higgs est déterminée par un processus analogue à celui utilisé pour le proton, et qui est nommé transmutation dimensionnelle.

Une telle approche permet de conserver les effets utiles des particules virtuelles tout en évitant ceux qui sont désastreux. En revanche, elle nécessite d'abandonner certaines autres idées véhiculées par la supersymétrie, telle l'unification des lois de la physique à très haute énergie. Et le lien entre la physique quantique et la relativité générale, qui se dérobe à nous depuis si longtemps, en devient plus mystérieux encore. Toutefois, ce modèle a d'autres avantages, notamment celui de proposer un candidat à la matière noire. Sa masse découlerait de ses interactions avec la matière ordinaire, interactions qui seraient véhiculées par le boson de Higgs. Cette prédiction spectaculaire sera testée au LHC ainsi que dans des expériences souterraines de détection de matière noire.

La supersymétrie n'a pas dit son dernier mot. Plusieurs indices suggèrent qu'elle pourrait tout de même s'intégrer aux lois de la physique. Parmi les observations les plus récentes, on peut évoquer le rôle de la masse du boson de Higgs et son impact sur la stabilité de l'Univers.

La supersymétrie dans l'hélium 3

Récemment, Tarun Grover, de l'Université de Californie à Santa Barbara, et ses collègues ont montré que certains phénomènes dans le domaine de la matière condensée peuvent être théoriquement décrits par la supersymétrie. Ils ont analysé ce qui se passe dans de l'hélium 3 superfluide, à une température proche du zéro absolu. Les atomes (des fermions, leur spin ou moment cinétique intrinsèque étant demi-entier) s'associent par paires pour former des bosons (de spin entier), sauf sur les bords de l'enceinte. En présence d'un champ magnétique, les fermions des bords disparaissent. Lors de cette transition, le comportement des fermions et des bosons est analogue à celui de superpartenaires.

■ BIBLIOGRAPHIE

J. Ellis, Le boson de Higgs, et après ?, *Pour la Science*, n° 419, septembre 2012.

G. Ellis, Le multivers existe-t-il ?, *Pour la Science*, n° 412, février 2012.

G. Kane, Supersymétrie : les ultimes de la nature dévoilées, Le Pommier, 2003.

N. Arkani-Hamed et al., Les dimensions cachées de l'Univers, *Pour la Science*, n° 276, octobre 2000.

La découverte du boson de Higgs implique qu'il existe un champ associé à cette particule qui est présent partout dans l'Univers. L'interaction des particules avec ce champ leur confère leur masse. Cela signifie que le vide est en réalité un endroit où il se passe beaucoup de choses, où la combinaison du champ de Higgs et des particules virtuelles produit une dynamique complexe. Mais cette dynamique est-elle stable ? Si elle ne l'est que temporairement, on parle d'équilibre métastable ; le champ de Higgs pourrait alors subir une « transition de phase » et basculer dans une configuration plus stable. L'énergie associée au champ changerait de valeur ainsi que la masse de toutes les particules et la physique de l'Univers, qui d'une certaine façon repartirait de zéro. La supersymétrie permet de stabiliser le vide et d'empêcher de tels accidents.

Un futur incertain

En l'absence de supersymétrie, la stabilité du vide dépend beaucoup de la masse du boson de Higgs. Or la masse que l'on a mesurée correspond à une frontière, impliquant un vide durable, mais au bout du compte instable (voir l'encadré page ci-contre). Un boson de Higgs plus lourd impliquerait un univers stable, alors qu'un boson de Higgs plus léger conduirait à terme à la catastrophe. La nature essaie de nous dire quelque chose, mais nous ignorons quoi.

Les physiciens attendent donc l'issue de la prochaine campagne du LHC. Si des superpartenaires sont observés, les appréhensions actuelles des physiciens des particules céderont la place à une excitation incroyable d'avoir enfin ouvert une brèche vers le monde supersymétrique. Et ce sera le début d'une grande aventure intellectuelle.

Mais si l'on ne trouve pas ces superpartenaires, la physique des particules sera confrontée à une crise. Cette perspective inspire déjà une réflexion radicalement nouvelle sur les phénomènes qui sous-tendent la trame de l'Univers. Une meilleure compréhension des propriétés du boson de Higgs sera cruciale pour construire cette nouvelle voie. Et les signaux astrophysiques et cosmologiques de la matière noire pourraient nous baliser le chemin à suivre. ■