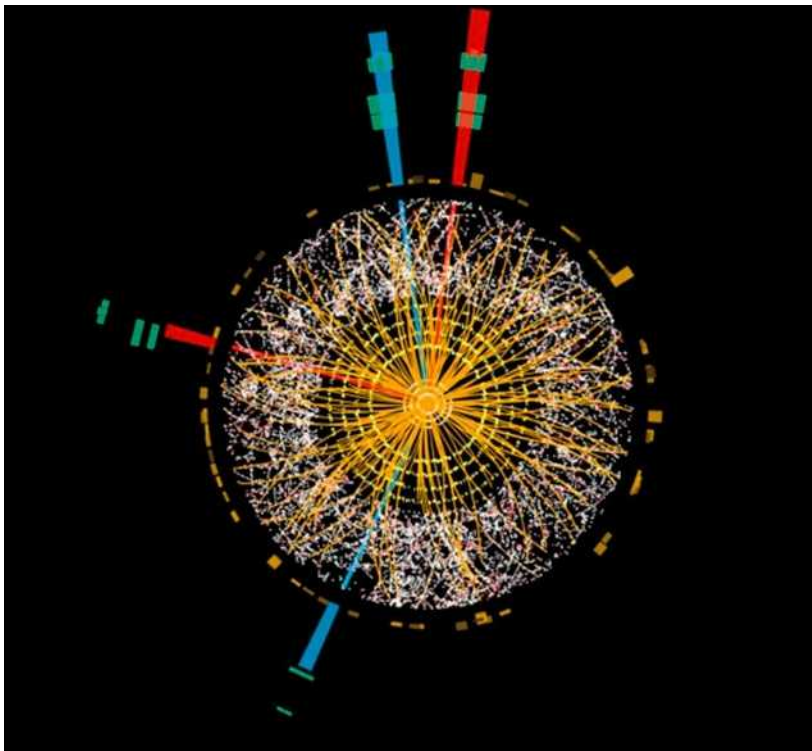




➤ introduite par Sheldon Glashow, Abdus Salam et Steven Weinberg pour unifier les interactions électromagnétique et nucléaire faible.

Mais il y a un prix à payer pour l'introduction de nouveaux champs quantiques : ils confèrent à l'état de vide une énorme énergie latente, qui se comporte exactement comme la constante λ des modèles cosmologiques. Comme l'avait prophétisé Lemaître, voici donc ce terme si controversé brillamment ressuscité par la théorie quantique ! Il ne reste plus qu'à calculer sa valeur dans le cadre du modèle standard de la physique des particules. Et là, catastrophe ! Plusieurs manières de calculer sont possibles, mais la valeur obtenue dans la plupart des cas est 10^{122} fois supérieure à celle prescrite par l'observation astronomique, un écart si faramineux, qualifié de « pire prédiction de toute la physique », que notre esprit a des difficultés à le saisir. Avec une énergie du vide aussi grande, toute la matière de l'Univers serait instantanément dispersée, et les galaxies ne se seraient jamais formées.

On conçoit qu'il soit déplaisant, aux yeux des physiciens théoriciens, que leurs meilleurs modèles d'unification, censés faire des prédictions ultra-précises dans le domaine des particules élémentaires, conduisent à une conséquence cosmologique aussi aberrante. C'est un exemple extrême du problème de base qui affecte le modèle standard de la physique des particules : on ne comprend pas pourquoi les quelque trente paramètres libres dont il dépend pour écrire les lois de la physique ont telle ou telle valeur.

Le boson de Higgs a été découvert en 2012 au Cern par le détecteur Atlas. Il est ici trahi par sa désintégration en quatre particules (les faisceaux bleus et rouges). Il est le médiateur d'un champ quantique (le champ de Higgs) qui contraint la valeur de l'énergie du vide, possible cause de l'expansion accélérée de l'Univers.

Pour la constante cosmologique, les physiciens ont donc tout tenté pour réduire l'écart en inventant des théories « au-delà du modèle standard ». La plus étudiée est la supersymétrie (Susy), ainsi nommée car elle suppose une symétrie entre les fermions (particules qui constituent la matière) et les bosons (qui véhiculent les interactions). Mais rien à faire, elle échoue complètement à résoudre le problème.

UNE CONSTANTE QUI NE L'EST PAS

Pour sauver la mise, les physiciens des hautes énergies ont alors imaginé que la constante cosmologique n'était peut-être pas vraiment constante. Par exemple, Robert Caldwell et ses collaborateurs ont proposé en 1998 l'existence d'une nouvelle entité qui imbiberait complètement l'espace, un peu comme le faisait l'éther chez Aristote, un cinquième élément nommé « quintessence ». Le terme a été repris par les chercheurs pour l'appliquer à ce nouveau champ d'énergie hypothétique. Celui-ci, auquel on attribue une variation excessivement lente, peut encore être représenté dans les modèles d'Univers à l'aide du terme cosmologique, lequel cesse alors d'être défini comme une constante. Il peut toujours s'interpréter comme ce qui reste dans l'Univers lorsqu'on en retire toute la matière et tout le rayonnement. En ce sens, la quintessence correspond à une certaine forme de vide, mais plus flexible que la constante cosmologique car variable au cours du temps. La valeur de ce champ, extrêmement élevée dans l'Univers très primordial (donc en accord avec les calculs des physiciens des hautes énergies), tomberait très bas au cours de l'évolution cosmique, conformément à la valeur aujourd'hui mesurée par les astronomes.

Une autre approche est celle de la théorie des cordes, extension de la supersymétrie destinée à inclure une description de la gravité. L'une de ses propositions les plus étonnantes concerne les multivers. Ses partisans les plus fervents (et médiatisés) comme Leonard Susskind, Brian Greene ou Max Tegmark espèrent convertir un échec explicatif en un tour de passe-passe extravagant : si l'on ne comprend pas les valeurs que prennent les constantes fondamentales dans notre Univers, il suffit de présumer que notre Univers appartient à un ensemble quasi infini et inobservable d'Univers, chacun d'eux étant muni de paramètres aléatoirement distribués. Dans le « paysage » du multivers, la constante cosmologique est extraordinairement grande dans la plupart des cas, mais il y a forcément un Univers très improbable où elle est strictement nulle, un autre tout aussi improbable où elle a la « bonne valeur » – celle de notre Univers, bien entendu.

La théorie M, extension de la théorie des cordes proposée par Edward Witten, promet encore davantage. Selon ses partisans, dans le monde multidimensionnel des «branes» issu de la théorie, l'énergie sombre mesurée dans notre Univers-brane pourrait être importée à partir des dimensions supplémentaires de la «matrice» dans laquelle nous serions immergés. D'autres chercheurs voient l'origine de la répulsion cosmique dans d'éventuelles interactions entre branes – ce qui revient à éliminer toute énergie sombre. Ceci n'éclaire en rien le problème, si l'on se souvient que la théorie M est bien plus mystérieuse que l'énergie sombre, qui elle au moins a des effets observables sur la vitesse d'expansion cosmique!

La physique ne souffre-t-elle pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit des données ?

On le voit, aucune de ces nouvelles théories, aussi fascinantes soient-elles, ne résout mieux les difficultés que leurs versions antérieures à plus basse énergie. Comme elles, elle les repousse chaque fois un peu plus loin, éloignant d'autant le fantasme qu'elles suscitent : celui d'une physique totalement unifiée qui serait proche de son achèvement.

À ce stade, on peut se demander si la découverte de l'accélération cosmique devait forcément conduire à tant de contorsions théoriques. D'un côté, on peut penser qu'il faut davantage d'imagination et de créativité pour sortir la physique théorique de ce que l'on croit être une impasse. De l'autre, on peut se demander si justement la physique actuelle ne souffre pas d'un excès d'imagination par rapport au déficit des données expérimentales.

Et entre ces deux positions, rappelons que le phénomène de l'accélération cosmique peut être simplement décrit par la constante cosmologique classique des équations d'Einstein, sans faire appel à une nouvelle physique. Cependant, ce n'est pas parce que c'est

l'explication la plus simple qu'elle est la bonne. Alors, si ce n'est pas la constante cosmologique associée au vide quantique qui provoque l'accélération observée de l'expansion cosmique, quelle en est la cause? Le problème soulevé est celui de la compatibilité entre la description classique de l'espace, du temps et de la gravitation avec celle, quantique, de la matière: la nature encore mystérieuse de l'énergie sombre suggère qu'il manque quelque chose d'essentiel dans notre compréhension de l'Univers physique. À ce titre, son élucidation peut servir de guide sur la façon de mettre au point une bonne théorie de la gravitation quantique.

TRAQUER L'ÉNERGIE SOMBRE

Peut-on dès lors imaginer des dispositifs expérimentaux susceptibles de mieux contraindre les différents modèles d'énergie sombre? Celle-ci est caractérisée par une pression négative. Cette dernière équivaut en fait à une tension, tout comme les objets élastiques, ressorts et feuilles de caoutchouc, ont eux aussi, quand ils sont tendus, une pression négative dirigée vers l'intérieur.

On montre que, lorsque la pression est inférieure à un tiers de la densité d'énergie, la force gravitationnelle change de signe et devient répulsive. Le paramètre clé est l'équation d'état, qui explicite le rapport entre la pression p de l'énergie sombre et sa densité d'énergie ρ sous la forme $p = w \rho c^2$, où w est un paramètre dépendant de la nature de l'énergie. Pour obtenir une énergie répulsive, w doit être négatif et inférieur à $-1/3$.

Comme l'avait vu Lemaître dès 1934, la constante cosmologique ou le vide quantique sont caractérisés par $w = -1$, ils sont donc fortement répulsifs. D'autres formes d'énergie sombre, comme les modèles de quintessence, ont des w compris entre -1 et $-1/3$. La forme la plus extrême d'énergie répulsive, dite «énergie fantôme», est caractérisée par $w < -1$. La flexibilité théorique permet en outre à l'équation d'état de varier arbitrairement au cours du temps.

Les astronomes ont mis en place d'ambitieux programmes d'observations susceptibles (voir *À la poursuite de l'énergie sombre*, par J. Frieman, page 84) de contraindre les valeurs possibles de w et ce faisant les différents modèles d'énergie sombre. L'enjeu est capital pour la cosmologie puisque le futur à très long terme de notre Univers en dépend entièrement (voir l'encadré, page 94). Si le paramètre w s'avère très proche de -1 , la théorie de la relativité générale et sa constante cosmologique rendront bien compte du taux d'expansion de l'Univers et de la présence de l'énergie noire. En revanche, une valeur significativement différente impliquerait soit l'existence d'une autre forme d'énergie sombre soit la nécessité de réviser la théorie de la relativité générale... ■

BIBLIOGRAPHIE

J.-P. LUMINET, *L'Invention du Big Bang*, Le Seuil/Points Sciences, 2^e éd., 2014.

J.-P. LUMINET, *L'Univers chiffonné*, 2^e éd., Folio Essais, 2005.