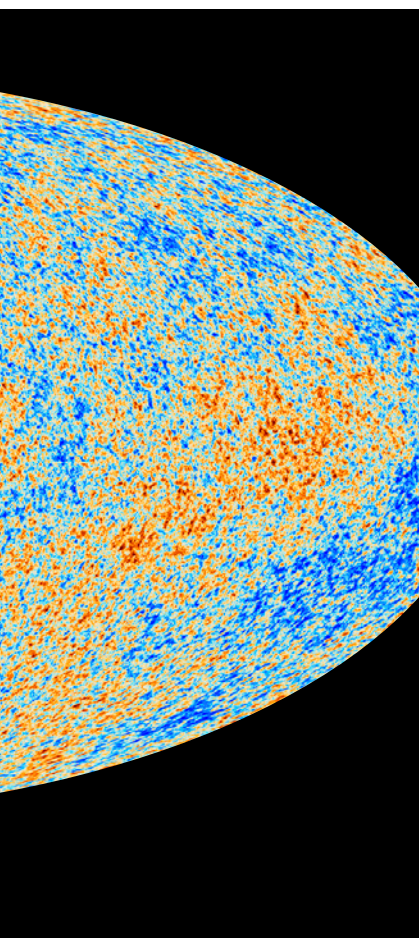




refroidissement continu du cosmos a toutefois fini par provoquer un changement de phase après 380 000 ans d'expansion, lorsque la température de l'Univers n'était plus que de 3000 kelvins: les électrons furent capturés par les noyaux, formant ainsi des atomes électriquement neutres. Comme les photons interagissent peu avec les atomes, ils purent enfin se propager librement dans l'Univers, sans rencontrer d'obstacle à chacun de leurs pas.

C'est ce rayonnement qui s'est libéré de la matière qui constitue aujourd'hui le fond diffus cosmologique. S'il intéresse tant les cosmologistes, c'est parce qu'il contient une mine d'informations, sa structure ayant dû conserver la trace d'événements cosmiques antérieurs. Notamment, la température du fond diffus cosmologique n'est pas parfaitement homogène à travers le ciel: on observe d'infimes fluctuations (de l'ordre de 10^{-5} kelvin) autour d'une valeur moyenne (voir la figure ci-contre). Les informations statistiques de ces fluctuations révèlent de nombreuses informations sur l'Univers.

Du 10 au 14 janvier 2011, une conférence internationale s'est tenue à Paris pour présenter les premières mesures du satellite *Planck*. La mission et la prise de données se sont poursuivies jusqu'en 2013.

Les résultats de *Planck*, dûment analysés et rendus publics en mars 2013 et en décembre 2014, confirment ce que l'on savait

D'après les équations de la relativité générale d'Einstein, la courbure spatiale de l'Univers est déterminée par la densité de matière et d'énergie qu'il contient. Mais alors, comment se fait-il que la densité moyenne de l'Univers soit exactement celle qui correspond à une courbure globalement nulle de sa géométrie?

UN DÉBUT FULGURANT

Une hypothèse *ad hoc*, développée en 1981 par Alan Guth et Alexei Starobinsky, permet de résoudre ce problème. Selon eux, l'Univers primordial aurait connu une gigantesque «inflation», c'est-à-dire une phase d'expansion incroyablement accélérée lorsque sa densité était extrêmement élevée: les distances auraient été multipliées par un facteur énorme, de l'ordre de 10^{50} , en une durée très courte, de l'ordre de 10^{-32} seconde! Une telle inflation explique la platitude de l'Univers par un simple effet de perspective: le cosmos s'étant considérablement agrandi en une fraction de seconde, sa courbure paraît localement moins importante, de la même façon que la surface d'un ballon gonflé apparaît presque plate si on la regarde sur une toute petite portion. L'Univers observable ne serait qu'une toute petite partie de l'Univers réel...

Les résultats de *Planck* précisent également les proportions des composants actuels de l'Univers: 4,9% de matière ordinaire, 26,6% de matière noire, 68,6% d'énergie sombre. Mais de quoi cette matière noire et cette énergie sombre, qui impriment leur marque sur la dynamique de l'Univers, sont-elles faites? Maintes hypothèses sont proposées, qui devront être testées. Ce travail constitue l'enjeu combiné de la cosmologie, de l'astrophysique et de la physique des particules.

En fait, nous sommes en présence d'une alternative. Soit nous postulons que les lois de la gravitation telles que nous les connaissons sont les bonnes, et dans ce cas il reste à identifier la nature de la matière noire et celle de l'énergie sombre. Soit nous acceptons de remettre en cause les lois de la gravitation pour éviter d'avoir à peupler l'Univers d'objets inconnus, de mystérieux fantômes. Dans ce cas, il faut modifier ces lois de façon à rendre compte des observations sans qu'il soit nécessaire d'invoquer l'existence de ces composantes hypothétiques.

Laquelle de ces deux voies finira par s'imposer? Nul ne sait encore dire si les problèmes de la matière noire et de l'énergie sombre constituent, pour la physique, une crise législative (de l'exactitude ou de l'universalité des lois) ou une crise ontologique (de la complétude de son mobilier actuel). Mais dans les deux cas, son *corpus* théorique ne devrait pas en sortir indemne. Les aventures de Monsieur Tompkins sont bien loin d'être terminées... ■

Contenu de l'Univers: 68,6 % d'énergie sombre, 26,6 % de matière noire, et près de 4,9 % de matière ordinaire

déjà, à savoir que la géométrie de l'Univers observable est euclidienne, c'est-à-dire plate comme une limande. *A priori*, sa courbure pouvait être positive, négative, ou rigoureusement nulle. Or c'est cette dernière situation, la plus singulière qui soit, qui avait été constatée: dans l'Univers, deux parallèles ne se rencontrent jamais. Quelle étrange coïncidence...

2012

Le boson de Higgs

Aux origines de la masse des particules

Le 4 juillet 2012, les porte-parole des expériences du Cern annonçaient la découverte exceptionnelle – et longtemps espérée – d'une particule, le boson de Higgs, un acteur crucial dans la théorie des interactions fondamentales.

Ou plutôt, le boson de Brout-Englert-Higgs, devrait-on dire... La particule devenue célèbre sous le nom de « boson de Higgs » a été mise en évidence au Cern, près de Genève, au terme de plusieurs dizaines d'années d'une quête menée par de nombreux physiciens. On dit souvent que ce boson est à l'origine de la masse, au moins en partie, mais de quoi s'agit-il plus précisément ?

Les physiciens des particules cherchent à identifier les constituants fondamentaux de la matière, et aussi à comprendre les forces qui agissent sur eux, les lois qui les gouvernent et les régularités – des symétries – caractérisant ces lois. Aujourd'hui, le modèle standard de la physique des particules rassemble ces éléments dans un cadre théorique dont la cohérence nécessite le boson de Higgs. Ce modèle décrit comment un petit nombre de particules élémentaires (quarks, électron, neutrinos...) sont soumises à trois interactions fondamentales. L'interaction électromagnétique de deux particules chargées s'interprète comme le résultat de l'échange d'un autre type de particules, les photons. L'« interaction forte » lie les quarks très solidement pour former les protons et les neutrons, et maintient ceux-ci dans les noyaux atomiques. L'« interaction faible » est capable de changer la nature

d'une particule et est responsable, par exemple, de la désintégration du neutron en un proton (avec l'émission d'un électron et d'un antineutrino). À l'échelle subatomique, la quatrième force fondamentale, la gravitation, est extrêmement faible par rapport aux autres interactions, et le modèle standard ne la prend pas en compte.

LES SYMÉTRIES, LE LANGAGE DES PARTICULES

Dans les années 1940, la reformulation de l'électromagnétisme dans un cadre quantique, l'électrodynamique quantique (QED), a préfiguré les principes qui régissent le modèle standard. Les équations décrivant cette interaction obéissent à certaines symétries, et on peut y procéder à des transformations mathématiques particulières, des « transformations de jauge », sans modifier les grandeurs observables telles que le champ électrique et le champ magnétique. L'invariance vis-à-vis des transformations de jauge est essentielle pour la cohérence de la théorie électromagnétique au niveau quantique, notamment pour tenir compte des échanges de plusieurs photons entre particules chargées. Elle est reliée par des théorèmes généraux à la loi de conservation de la charge électrique, et au fait que le photon est de masse nulle, dont il résulte que la force électromagnétique est de longue portée.

L'AUTEUR



PIERRE FAYET
directeur
de recherche
au CNRS, Laboratoire
de physique théorique
de l'École normale
supérieure, à Paris

BIBLIOGRAPHIE

Collaboration ATLAS,
**Observation of a new
particle in the search for
the Standard Model Higgs
boson [...]**, *Phys. Lett. B*,
vol. 716, pp. 1-29, 2012.

Collaboration CMS,
**Observation of a new
boson at a mass of 125 GeV
[...]**, *Phys. Lett. B*, vol. 716,
pp. 30-61, 2012.