

UNE PREMIÈRE CELLULE ARTIFICIELLE

En 2010, l'équipe de Craig Venter, l'un des pionniers du séquençage du génome humain, reconstitue le génome complet de la bactérie *Mycoplasma mycoides*. Les chercheurs ont ensuite introduit cet ADN de synthèse à l'intérieur de la membrane d'une bactérie proche – *Mycoplasma capricolum* – et le micro-organisme hybride ainsi créé s'est révélé viable!

L'audace du procédé a stimulé la fabrication de cellules artificielles, désormais une branche active de la recherche biomédicale. Récemment, l'équipe de Craig Venter a même réussi à synthétiser une cellule capable de se répliquer qui ne comporte que 473 gènes (le génome humain en contient environ 20 000...). Ces gènes ont été choisis pour permettre en principe à une bactérie de survivre, ce qui a fonctionné.

Aujourd'hui, la stratégie d'«édition du génome» adoptée par l'équipe de Craig Venter pour trouver le génome minimal nécessaire à



Dans cet amas de cellules artificielles, les plus grosses cellules à génome minimal mesurent environ un micromètre de diamètre.

la vie est concurrencée par la méthode CRISPR-Cas9, qui permet de modifier à volonté un génome cellulaire (voir page 92).

Il n'empêche... Depuis qu'en 1828 Friedrich Wöhler synthétisa l'urée – jusque-là produite exclusivement par un foie de vertébré –, l'idée qu'une « force vitale » est à l'œuvre dans les organismes a décliné parmi les biologistes. Ceux-ci ont en effet constaté que le vivant semble plutôt être un cas particulièrement complexe et ordonné de chimie du carbone en milieu aqueux. Dès lors, la biologie de synthèse ne pouvait qu'apparaître. La fabrication à partir d'un génome de synthèse d'une première cellule vivante capable de se reproduire en constitue sans aucun doute une étape majeure. ■

R. C.

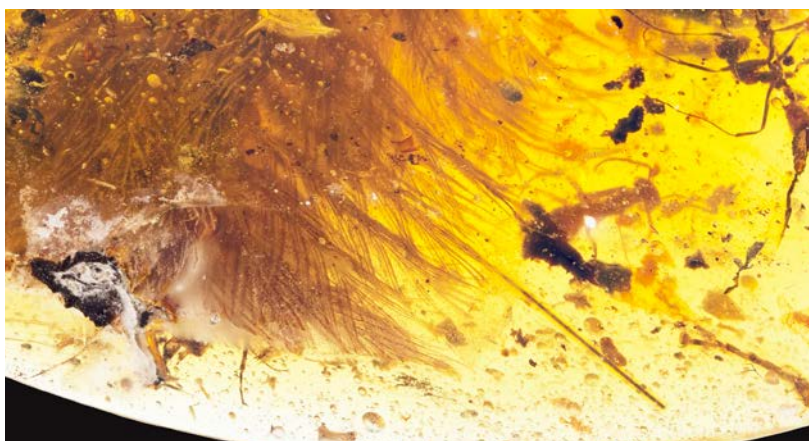
D. Gibson *et al.*, Creation of a bacterial cell controlled by a chemically synthesized genome, *Science*, vol. 329, pp. 52-56, 2010

LA PLUME AVANT LE VOL

Dès 1859, le paléontologue britannique Thomas Huxley proposa que les oiseaux modernes descendaient des dinosaures. Il se fondait sur les analogies anatomiques existant entre les dinosaures théropodes, le dinosaure volant archéoptéryx et les oiseaux actuels. Son hypothèse conférait aux dinosaures une « modernité » (certains d'entre eux existaient encore!) que beaucoup n'étaient pas prêts à accorder à ces archaïques « lézards géants ». Elle rencontra donc une énorme résistance, mais les preuves en sa faveur se sont ensuite accumulées pendant un siècle et demi...

Puis, dans les années 1990, on découvrit dans le Liaoning, en Chine, des fossiles de théropodes non aviens, mais porteurs de plumes. Mises au jour en 1999, les empreintes de *Shuvuia deserti* révélèrent des traces de kératine bêta, l'un des constituants caractéristiques des plumes d'oiseaux. En 2007, on observa en outre que les plumes fossiles de *Velociraptor mongoliensis* étaient structurées de la même façon que celles des oiseaux actuels. Le dernier doute disparut en 2011, avec la découverte d'une queue emplumée de dinosaure fossilisée dans un morceau d'ambre (voir le cliché ci-dessus).

Aujourd'hui, on estime que les premières plumes constituaient une sorte de duvet iso-



Cette queue de dinosaure à plumes a été piégée dans de la résine, future ambre, au milieu du Crétacé birman. La fourmi piégée en même temps indique l'échelle de ces plumes qui, par leur structure, s'apparentent à du duvet.

lant comparable à la fourrure; puis qu'elles évoluèrent vite pour devenir aussi des moyens de communication visuelle (les répartitions structurées de divers types de pigments produisent chez les oiseaux des couleurs plus variées que la simple présence de mélanine dans les poils de mammifères). Ce n'est qu'ensuite que la légèreté et la portance des plumes ont été sélectionnées au sein de certaines lignées dinosauriennes pratiquant le vol. Les dinosaures n'ont pas du tout disparu: le nombre d'espèces d'oiseaux actuels est supérieur à celui des mammifères! ■

R. C.

R. C. McKellar *et al.*, A diverse assemblage of Late Cretaceous dinosaur and bird feathers from Canadian amber, *Science*, vol. 333, pp. 1619-1622, 2011

2011

Planck

sonde les débuts de l'Univers

La mission du satellite *Planck* : scruter la lumière fossile du Big Bang. Ses premiers résultats, dévoilés en janvier 2011, laissent supposer que 95 % du contenu de l'Univers nous échappe.

Bien racontée, l'histoire de la physique du **xx^e siècle convoquerait des milliers de personnages plus ou moins célèbres.** Acceptant par avance le reproche de pécher par trop d'omissions, je veux ici mettre en avant le nom de George Gamow, pionnier de la cosmologie moderne et vulgarisateur génial, auteur d'une vingtaine de livres enthousiastes et accessibles à tous, notamment *Monsieur Tompkins au pays des merveilles* (1939).

Ce joyeux drille naquit le 4 mars 1904 à Odessa, principal port de la mer Noire. Dans le petit monde de la physique, il fut vite reconnu comme un théoricien de première classe. Changeant à plusieurs reprises de thème de recherche, il se montra inventif tout au long de sa vie, entremêlant les champs disciplinaires, traversant les lignes de partage académiques. Il faut dire que son esprit aiguisé avait la topologie d'un couteau suisse : il était multifonction, qualité sans doute nécessaire lorsqu'on s'intéresse à l'Univers et à tout ce qui s'y passe.

Après la Seconde Guerre mondiale, Gamow, alors professeur à l'université Georges Washington, à Saint Louis, aux États-Unis, s'intéressa à l'astrophysique nucléaire, et notamment à l'origine des éléments chimiques. Il pensait que la compréhension des noyaux permettrait de mieux saisir l'histoire et l'évolution de la matière : comment se sont formés, se demandait-il, les atomes d'hélium, de carbone, d'oxygène, de soufre, de fer ?

NAISSANCE DES ÉLÉMENTS

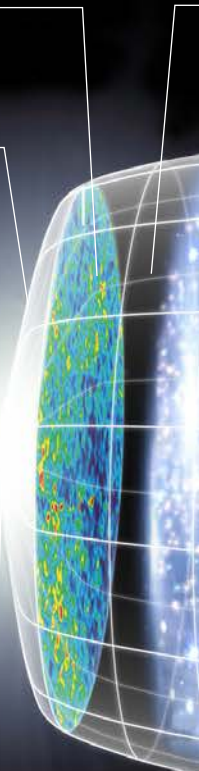
Aidé par l'un de ses étudiants, Ralph Alpher, il émit l'hypothèse que tous ont été produits durant les premières phases, très chaudes, de l'Univers en expansion. Il y avait alors les protons, les neutrons, les électrons et les photons, filant en tous sens et se percutant régulièrement. Mais du fait de l'expansion du cosmos et du refroidissement qu'elle induisait, ces particules perdirent rapidement de l'énergie. Après seulement quelques secondes, les photons, dont l'énergie était jusque-là suffisante pour qu'ils brisent systématiquement l'union d'un proton et d'un neutron, devinrent

Fond diffus cosmologique vers 380 000 ans

Inflation

Fluctuations quantiques

©Nasa/WMAP Science Team



trop «mou» pour y parvenir. Les noyaux de deutérium (assemblages d'un proton et d'un neutron) purent donc commencer à se former sans être aussitôt détruits par l'impact d'une particule de lumière. Une fois constitués, ces noyaux de deutérium agglutinèrent à leur tour un neutron et un proton. Se formèrent ainsi des noyaux d'hélium. D'autres mariages de cette sorte allèrent ensuite bon train, permettant de constituer, par captures successives de neutrons, les divers noyaux qui existent aujourd'hui.

Au début de l'année 1948, les deux hommes étaient prêts à publier les conclusions de leur travail sur l'origine des éléments chimiques. Mais avant d'adresser leur article à la *Physical Review*, le facétieux Gamow ajouta

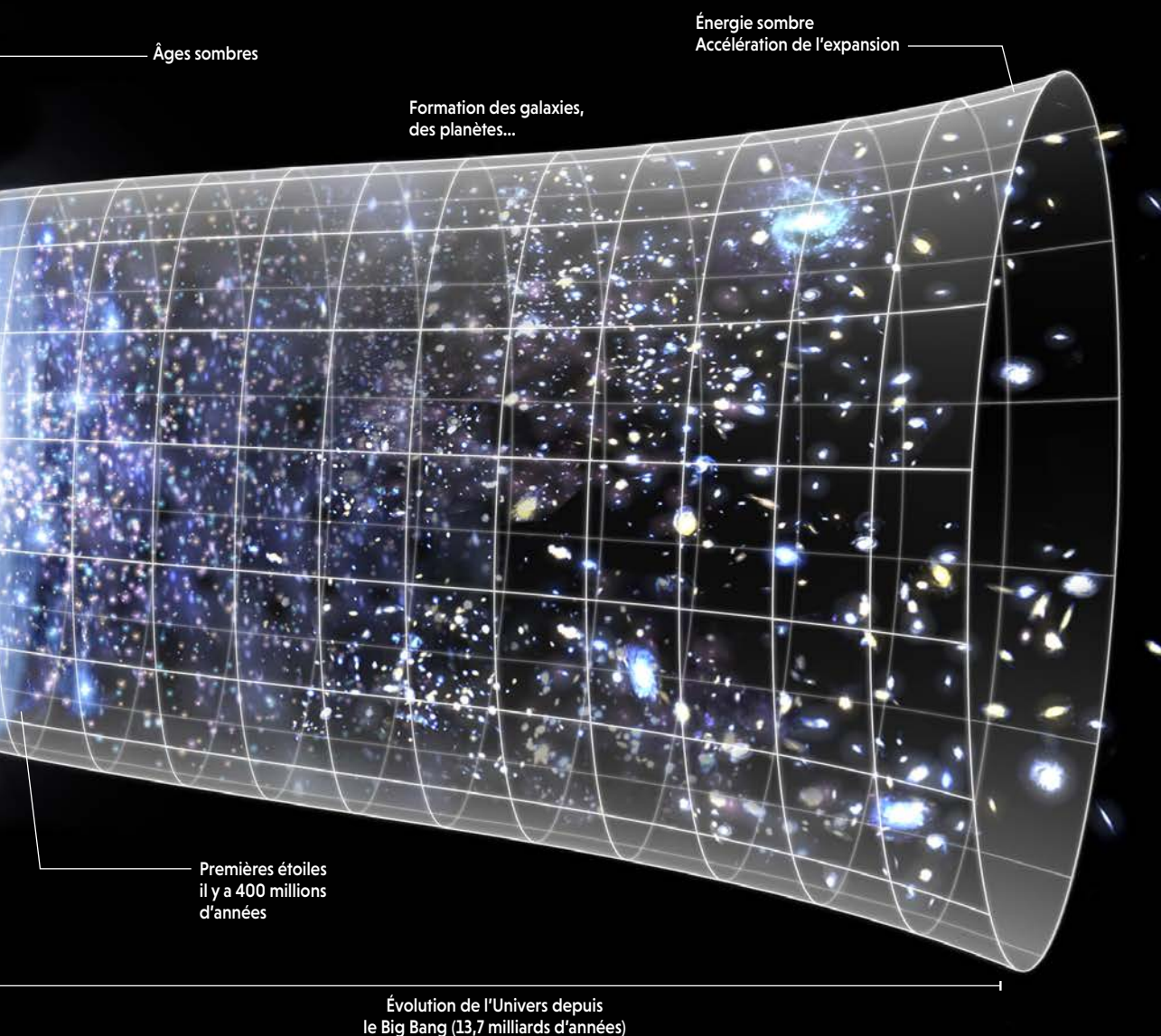
à la liste des signataires le nom de Hans Bethe, qui avait été le premier physicien à comprendre comment les étoiles produisent de l'énergie, mais sans lui demander son avis. Bethe n'avait nullement participé à leurs travaux, mais c'était pour le simple plaisir de jouer phonétiquement avec les trois premières lettres de l'alphabet grec (Alpher, Bethe, Gamow pour alpha, bêta, gamma). Gamow tenta également, mais en vain, de convaincre un autre collaborateur, Robert Herman, d'être cosignataire de l'article à condition de changer son nom en... Delter (pour delta). Comme de bien entendu, cet article, qui demeurera célèbre sous le nom de «papier $\alpha\beta\gamma$ », sera daté du 1^{er} avril.

L'hypothèse révolutionnaire de Gamow devra toutefois être corrigée ultérieurement: >

L'AUTEUR



ÉTIENNE KLEIN
physicien,
directeur du Larsim
(Laboratoire
de recherche
sur les sciences
de la matière),
au CEA, à Saclay



➤ seuls les noyaux les plus légers, comme l'hydrogène, le deutérium ou l'hélium, ont pu se former dans l'Univers primordial selon le processus qu'il avait envisagé. Car après trois minutes, le contenu du cosmos était déjà tellement dilué par son expansion que les noyaux, trop éloignés les uns des autres, n'avaient plus la possibilité de se rencontrer, de s'agglutiner et de former des noyaux plus gros tels que le carbone ou l'oxygène. Les noyaux plus lourds n'ont pu apparaître que bien plus tard, des millions d'années après, certains (jusqu'aux noyaux de fer) dans les étoiles, les autres (jusqu'aux noyaux d'uranium) au cours d'explosions d'étoiles très massives, les supernovæ.

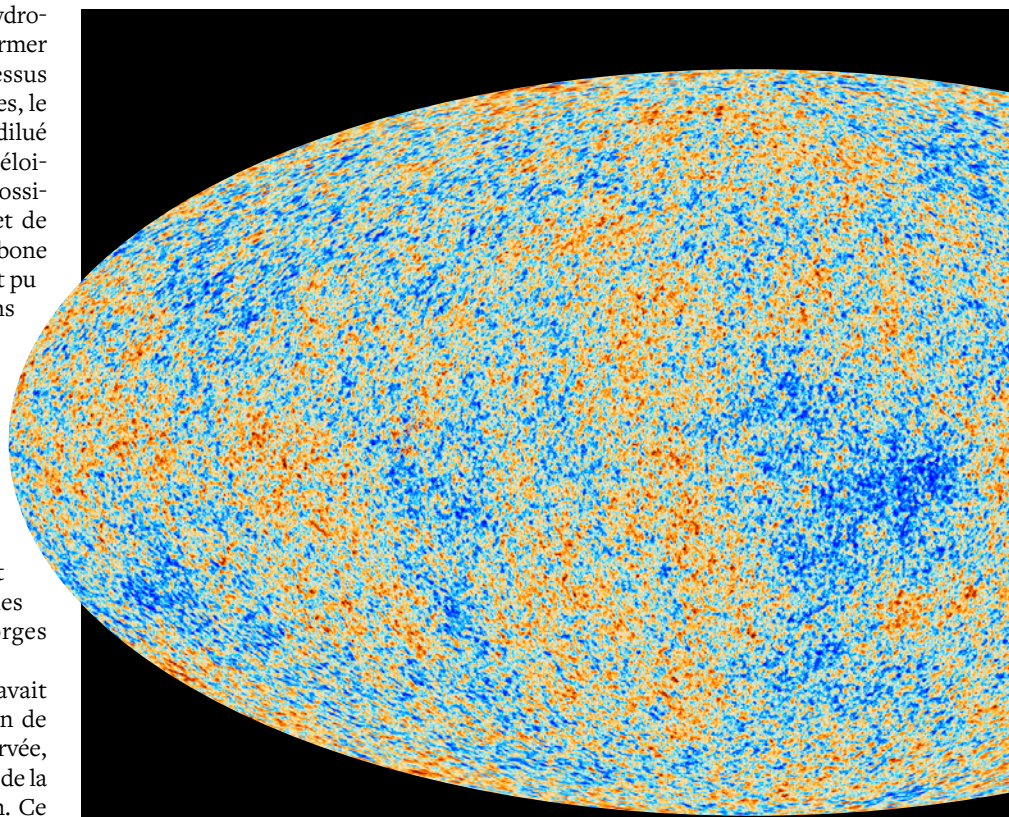
Reste que Gamow était sur la bonne voie. Son travail est d'ailleurs considéré comme le véritable lancement de l'actuelle théorie du Big Bang. Bien sûr, il s'appuyait sur des découvertes antérieures, certaines majeures, notamment celles de Georges Lemaître dans les années 1930.

Cet abbé et mathématicien belge avait remarqué un lien étroit entre l'expansion de l'Univers, qui venait tout juste d'être observée, et certaines conséquences mathématiques de la théorie de la relativité générale d'Einstein. Ce constat l'avait amené à formuler une hypothèse audacieuse: si l'Univers est aujourd'hui en expansion, il a dû être beaucoup plus dense dans le passé; initialement, il devait même être condensé en un «atome primitif» que des fractionnements successifs ont fini par façonner tel que nous le voyons aujourd'hui.

Gamow enrichit cette hypothèse de l'atome primitif en faisant intervenir une nouvelle grandeur physique, la température: dans son passé lointain, comprit-il, l'Univers était non seulement beaucoup plus dense qu'aujourd'hui, mais aussi beaucoup plus chaud, donc beaucoup plus énergétique. En clair, à ses débuts, la matière a dû connaître une fièvre extraordinaire.

LA PREMIÈRE LUMIÈRE COSMIQUE

Gamow passa l'été 1948 à Los Alamos, tandis que Ralph Alpher et Robert Herman demeurèrent à l'université Georges Washington, où ils développèrent certaines des intuitions de leur professeur. Cela les conduisit à franchir un nouveau pas crucial: bien après la formation des noyaux les plus légers, lorsque l'Univers en expansion s'est refroidi à quelques milliers de degrés, il a dû brusquement devenir transparent et laisser échapper sa première lumière. En d'autres termes, selon Alpher et Herman, il devait exister une descendance de l'Univers primordial sous la forme d'un rayonnement vestige, refroidi par l'expansion, semblable à celui d'un corps noir dont la température serait très basse, égale à 5 kelvins d'après leurs calculs.



Les fluctuations de température du fond diffus cosmologique enregistrées par *Planck* témoignent des conditions qui régnaient dans l'Univers lorsqu'il était âgé de 380 000 ans.

La suite de l'histoire leur donnera raison: ce rayonnement sera découvert par hasard, en 1965, par Arno Penzias et Robert Wilson, à une température toutefois plus basse, proche de 3 kelvins.

Les scénarios de Big Bang remportèrent là, avec succès, leur premier grand test. Mais César, on le sait bien, n'obtient pas toujours ce qui devrait lui revenir, du moins pas intégralement: le 8 décembre 1978, un an après la création de *Pour la Science*, ce sont Arno Penzias et Robert Wilson qui reçurent le prix Nobel de physique, et non Gamow et Lemaître, décédés tous les deux une dizaine d'années plus tôt.

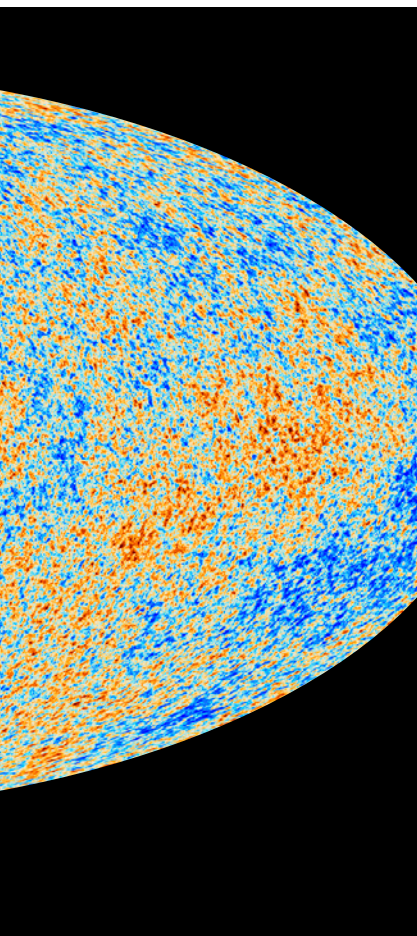
Les physiciens étaient encore loin d'avoir compris tout ce que le «fond diffus cosmologique» pouvait leur révéler de l'Univers. En 2009, le satellite *Planck* fut lancé pour étudier ce rayonnement, aussi qualifié de «fossile», avec une meilleure précision que les missions spatiales antérieures, *Cobe* et *WMAP*.

Mais qu'est-ce au juste que ce rayonnement? Pendant les 380 000 ans qui ont suivi le Big Bang, la lumière ne pouvait pas se propager librement dans l'espace: la densité de matière était telle que les photons ne cessaient d'y interagir avec des particules de matière, de sorte que l'Univers était un milieu opaque à sa propre lumière. Le

BIBLIOGRAPHIE

E. Klein, *Il était sept révolutions*, Flammarion, 2016.

Collaboration *Planck*, *Planck early results*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 536, 2011.



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 3 000 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.