

> 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.

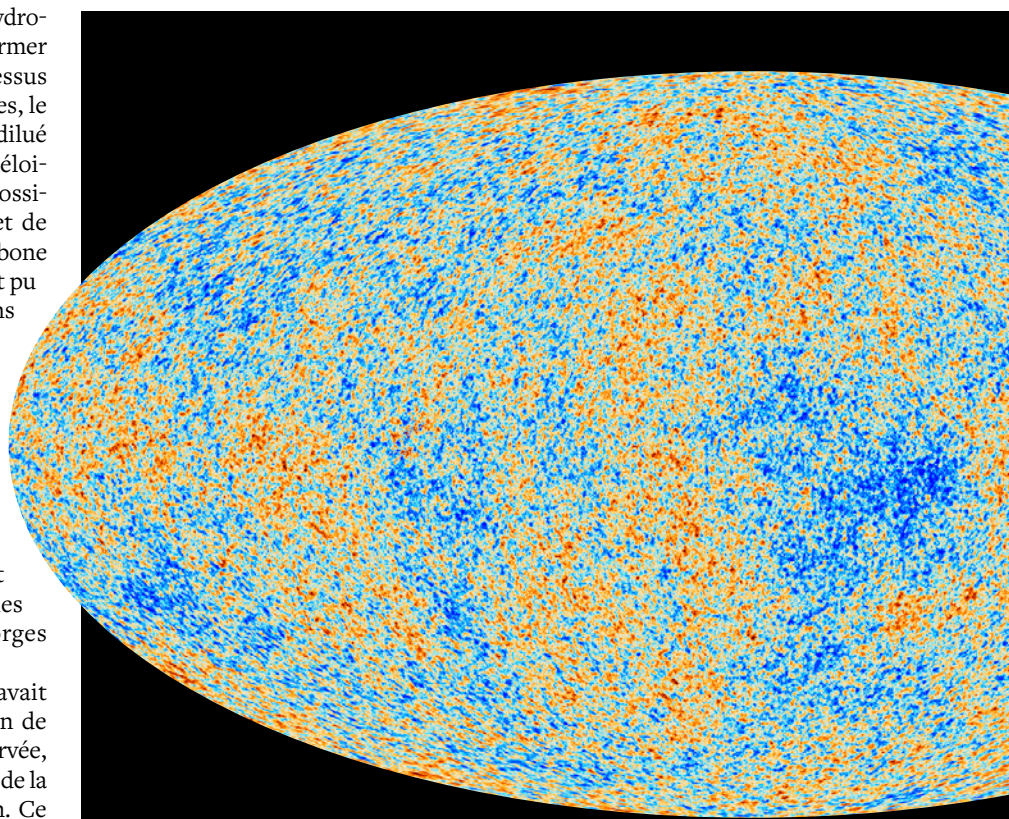
Reste que Gamow était sur la bonne voie. Son travail est d'ailleurs considéré comme le véritable lancement de l'actuelle théorie du Big Bang. Bien sûr, il s'appuyait sur des découvertes antérieures, certaines majeures, notamment celles de Georges Lemaître dans les années 1930.

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.

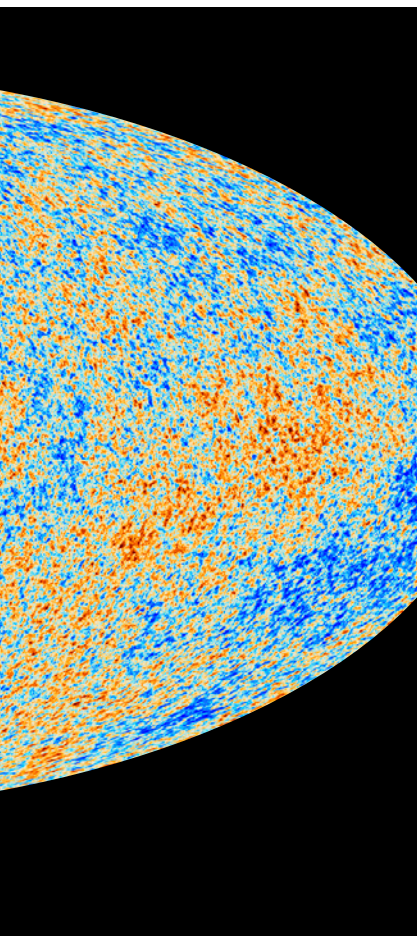
Les physiciens étaient encore loin d'avoir compris tout ce que le «fond diffus cosmologique» pouvait leur révéler de l'Univers. En 2009, le satellite *Planck* fut lancé pour étudier ce rayonnement, aussi qualifié de «fossile», avec une meilleure précision que les missions spatiales antérieures, *Cobe*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