

Le deutérium primordial

CRAIG HOGAN

Les noyaux de cette forme d'hydrogène furent créés dans les premiers instants de l'Univers. La détermination de sa quantité confirme l'existence de matière noire exotique.

Selon la théorie du Big Bang, l'Univers primordial était extraordinairement simple : il ne renfermait aucune structure de taille supérieure à celle des particules élémentaires. La théorie du Big Bang n'est fondée que sur la relativité générale, le Modèle standard de la physique des particules et les lois de la thermodynamique, mais elle semble décrire de manière presque parfaite l'évolution de l'Univers et, en particulier, ses premières étapes.

Les noyaux atomiques synthétisés pendant les premières minutes de l'Univers nous renseignent sur les événements du début de l'Univers, ainsi que sur sa composition et sa structure d'aujourd'hui. Le Big Bang a principalement engendré de l'hydrogène et de l'hélium. Le deutérium, isotope lourd de l'hydrogène, n'a été fabriqué qu'au début de l'Univers ; il révèle donc la jeunesse de celui-ci. Le rapport entre le nombre d'atomes de deutérium et le nombre d'atomes d'hydrogène dépend fortement de l'uniformité et de la quantité totale de matière nucléaire créée lors du Big Bang. Les mesures directes du deutérium présent dans des nuages de gaz anciens, effectuées ces dernières années, promettent un test précis de la théorie du Big Bang.

L'expansion de l'Univers aurait commencé voici 10 à 20 milliards d'années. Tout était alors plus compact et plus dense qu'aujourd'hui. La température de l'Univers âgé d'une seconde était supérieure à dix milliards de degrés, soit 1 000 fois la température au centre du Soleil. À cette température, on distingue mal les différentes formes de matière et d'énergie : les particules nucléaires, les neutrons et les protons, se transforment constamment les uns en les autres, en

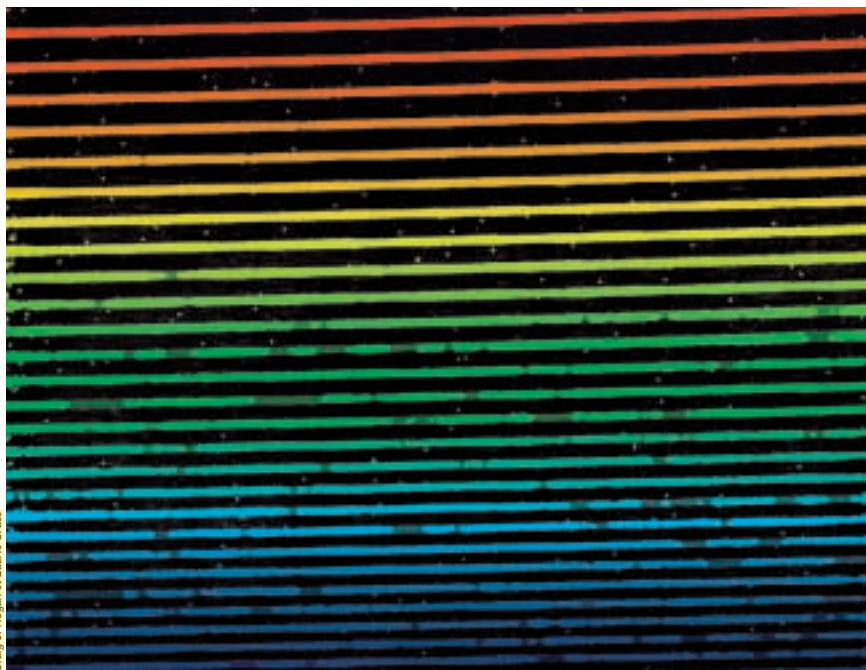
subissant de violentes collisions avec les neutrinos, les positons et les électrons. Comme les neutrons sont un peu plus massifs que les protons, le refroidissement de l'Univers a conduit à la formation d'un nombre supérieur de protons. Lorsque la température a été inférieure à dix milliards de degrés, les transmutations mutuelles ont cessé, et les protons ont été sept fois plus nombreux que les neutrons.

À la sortie de la fournaise primordiale

Quelques minutes après le Big Bang, lorsque la température était voisine d'un milliard de degrés, les protons et

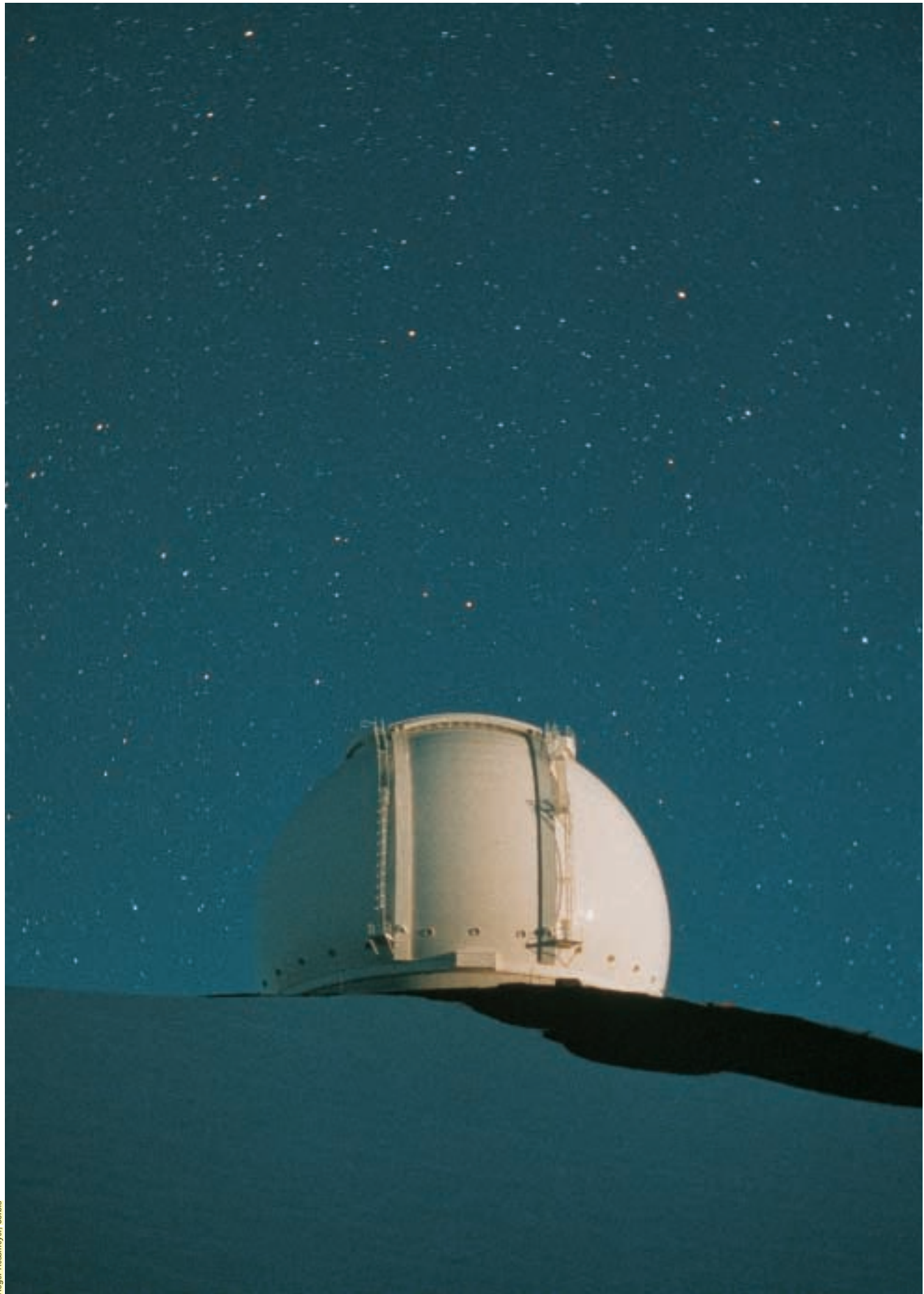
les neutrons se sont associés en noyaux. Les paires composées d'un neutron et d'un proton étaient des noyaux de deutérium, les deutons, qui se combinèrent presque tous en noyaux d'hélium, composés de deux protons et de deux neutrons. Lorsque cet hélium primordial s'est formé, la densité de l'Univers était devenue trop faible pour que des fusions nucléaires ultérieures synthétisent des éléments plus lourds : la quasi-totalité des neutrons se sont retrouvés dans les noyaux d'hélium.

Sans neutrons pour vaincre les répulsions électriques, les protons restants n'ont pu se lier en noyaux d'atomes plus lourds : six protons sur sept subsistent aujourd'hui en tant que



Craig J. Hogan et Laurie Grace

1. LE TÉLESCOPE KECK (à droite), sur le Mauna Kea, à Hawaii, a recueilli la lumière d'un quasar lointain et l'a focalisée sur le détecteur d'un spectroscopie à haute résolution. Le spectre obtenu (ci-dessus) est zébré de lignes sombres, parce que des nuages de gaz, entre le quasar et la Terre, ont absorbé la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. L'analyse de cette absorption révèle la présence de deutérium, un isotope lourd de l'hydrogène.

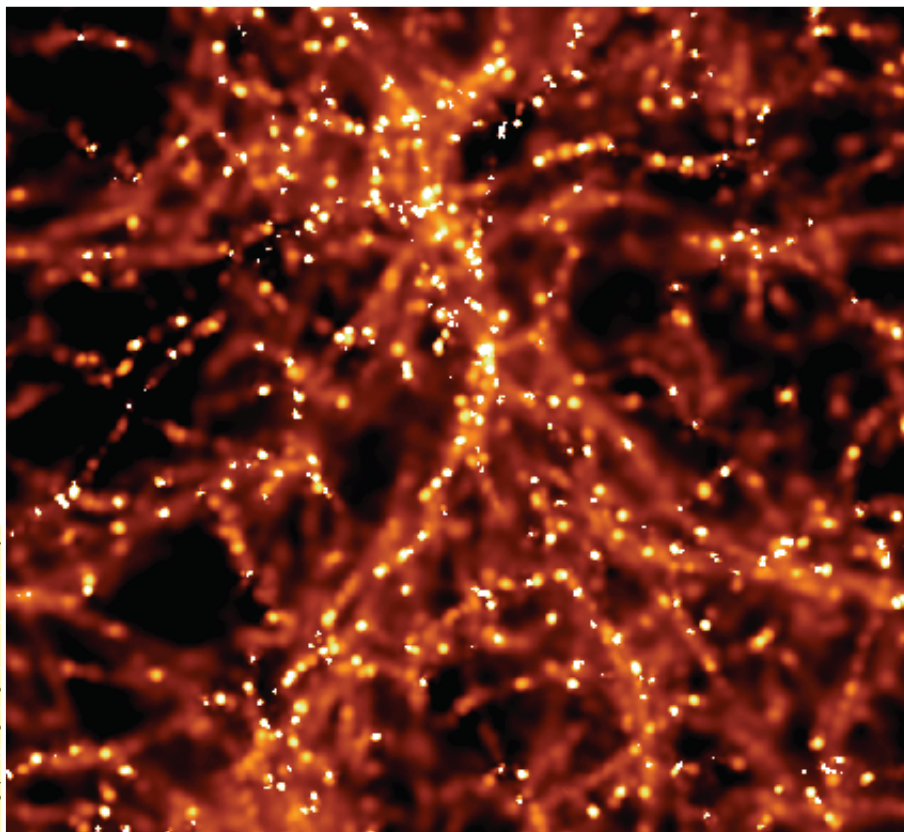


Roger Ressmeyer, Corbis

noyaux d'hydrogène isolés. Le modèle du Big Bang prédit donc que trois quarts de la masse de matière nucléaire de l'Univers se compose d'hydrogène, tandis que le reste est sous forme d'hélium. Cette prédiction s'accorde remarquablement bien avec les observations. L'hydrogène constituant le combustible principal des étoiles de l'Univers, sa prédominance est la cause fondamentale de la lumière des étoiles.

Au cours de la formation des noyaux d'hélium, approximativement un deuton sur 10 000 resta isolé. Une proportion encore inférieure fusionna en noyaux plus lourds que l'hélium, tel le lithium (tous les autres éléments chimiques, comme le carbone et l'oxygène, furent produits plus tard dans les étoiles). Les proportions précises d'hélium, de deutérium et de lithium formés dans cette nucléosynthèse primordiale ne dépendent que d'un paramètre : le rapport entre le nombre de baryons (les protons et les neutrons) et le nombre de photons. La valeur de ce rapport, noté η , reste constante au cours de l'expansion ; comme nous pouvons mesurer le nombre de photons (par l'étude du fond de rayonnement fossile), la valeur de η nous indique la quantité de matière nucléaire de l'Univers. Ce nombre est ainsi la clef de la compréhension de l'évolution cosmique, car nous pouvons le comparer à la quantité de matière observée dans les étoiles et dans le gaz des galaxies, ainsi qu'à la quantité plus grande de matière noire invisible.

Pour que le Big Bang ait produit le mélange observé d'éléments légers, la valeur de η doit être très petite : l'Univers contient moins de un baryon par



Photographie : Craig J. Hogan. Dessin : Alfred T. Kamajian

milliard de photons. La température du rayonnement fossile donne directement le nombre de photons issus du Big Bang ; aujourd'hui, chaque centimètre cube d'espace contient 411 photons. Ainsi, il y aurait un peu moins de 0,4 baryon par mètre cube. Les cosmologistes débattent toutefois de la valeur exacte de η , les estimations variant d'un facteur dix. Le meilleur indicateur de η est la concentration en éléments légers pri-