

La quantité d'hélium 4 croît au cours de l'évolution des galaxies, car cet isotope est produit par les étoiles. La mesure de sa proportion dans des milieux variés n'est donc qu'une limite supérieure de la valeur primordiale. La fraction de masse de l'hélium 4 primordial (nombre de grammes d'hélium 4 par gramme de matière baryonique) est estimée entre 0,23 et 0,24.

La proportion de lithium, mesurée à des fins cosmologiques dans l'atmosphère des étoiles les plus vieilles de la Galaxie (étoiles pauvres en éléments lourds), est assez bien déterminée : elle est égale à environ $1,6 \times 10^{-10}$.

Les quantités de ces isotopes produits lors de la nucléosynthèse primordiale dépendent du paramètre cosmologique fondamental η , rapport du nombre de baryons et du nombre de photons (voir le graphique). Ce paramètre se conserve depuis les temps primordiaux, car le numérateur et le dénominateur se conservent séparément.

Le paramètre de densité baryonique Ω_b est le quotient de la densité baryonique par la densité critique. Les paramètres Ω_b et η sont reliés par l'équation $\Omega_b = 0,0075 \times 10^{10} \times \eta$ (pour un taux d'expansion de l'Univers égal à 70 kilomètres par seconde et par mégaparsec). Par la suite, on verra que le nombre de familles de neutrinos légers intervient aussi dans l'analyse, car l'abondance de l'hélium 4 y est sensible.

Examinons maintenant les conséquences des deux valeurs de deutérium sur les paramètres physiques du Big Bang. Si la quantité de deutérium, rapportée à celle de l'hydrogène, est égale à $2,3 \times 10^{-5}$, comme l'indiquent les mesures de David Tytler et de ses collègues, η vaut environ 7×10^{-10} , ce qui correspond à un paramètre de densité baryonique Ω_b égal à 0,05. La fraction de masse de l'hélium 4 est égale à 0,25, valeur supérieure à celle qui est mesurée, à moins de supposer qu'il n'existe que deux familles de neutrinos légers. Enfin, la proportion de lithium est comprise entre 5×10^{-10} et 6×10^{-10} , ce qui s'expliquerait uniquement si la destruction du lithium 7 dans l'enveloppe des étoiles était quatre fois supérieure à ce qu'elle est selon les théories d'évolution stellaire standards.

Si maintenant, la quantité de deutérium, rapportée à celle de l'hydrogène, est égale à 2×10^{-4} , comme l'estime C. Hogan et ses collègues, η est égal à environ 2×10^{-10} et Ω_b à 0,015. La fraction de masse de l'hélium 4, égale à 0,23, est alors en accord avec les évaluations standards. Le nombre de famille de neutrinos légers

est de trois, conformément aux mesures de physique des particules effectuées au CERN. Enfin, la proportion de lithium formé lors de la nucléosynthèse primordiale est du même ordre que celle observée dans les vieilles étoiles du halo galactique.

Pour finir, examinons les conséquences de ces mesures sur la nature de la matière noire. En comparant la densité de matière révélée par la lumière (0,4 pour cent de la densité critique) avec celle déduite de la théorie du Big Bang (1,5 à 5 pour cent de la densité critique), on constate que, quelle que soit la proportion de deutérium, la majorité de la matière ordinaire n'émet pas de photons. Où se cache la matière sombre baryonique? Les possibilités sont nombreuses : elles pourrait être dans les naines brunes, ces «étoiles ratées», objets insuffisamment massifs pour

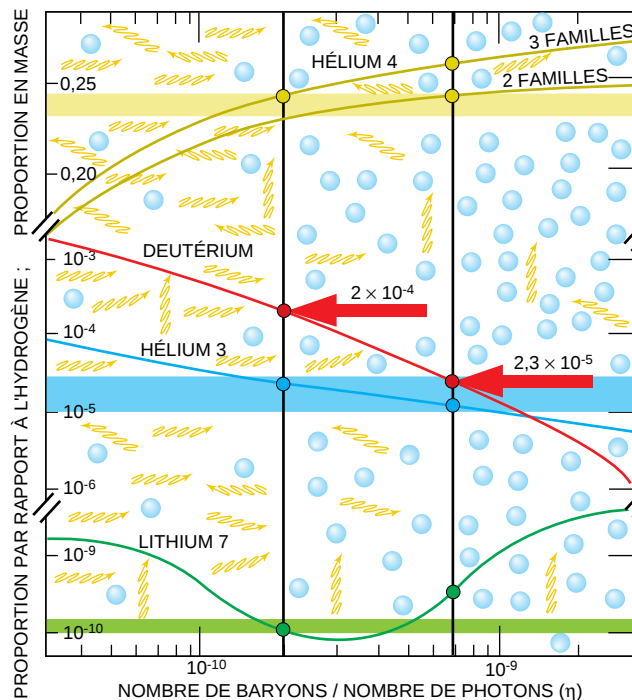
amorcer des réactions thermonucléaires, ou encore dans de grosses planètes comme Jupiter, qui émettent peu de lumière. Les cadavres d'étoiles pourraient aussi constituer cette matière sombre, sous forme de naines blanches, résidus des étoiles de petite masse comme le sera notre Soleil dans cinq milliards d'années, ou sous forme d'étoiles à neutrons et de trous noirs, vestiges d'étoiles massives et très massives.

Si l'on compare maintenant la densité de matière baryonique déduite de la théorie du Big Bang à la densité de matière dynamique (20 à 30 pour cent de la densité critique), on conclut immédiatement que la matière nucléaire est négligeable par rapport à celle que l'on décèle indirectement grâce aux mouvements des galaxies dans les amas. La grande majorité de la matière qui constitue notre Univers n'est pas

de la même nature que celle qui nous compose. Les deux tiers au moins de l'Univers seraient sous forme inconnue. Cette proportion s'élève encore si l'on considère que l'Univers a la densité critique, comme semblent l'indiquer les dernières théories cosmologiques.

L'existence de la matière noire est l'une des découvertes les plus importantes de notre fin de siècle. Les atomes ne seraient que l'écume de l'Univers. Aussi les astrophysiciens cherchent-ils maintenant à déterminer la nature et la répartition de la matière noire baryonique et de la matière noire exotique.

Elisabeth VANGIONI-FLAM, Inst. d'astrophys. de Paris et Michel CASSÉ, Service d'astrophysique du CEA, Saclay



Les deux récentes estimations de la proportion de deutérium primordial (flèches rouges) diffèrent notablement. À partir de chacune de ces mesures, on détermine la quantité des autres éléments légers produits lors de la nucléosynthèse primordiale (points de couleur à la verticale de chacune des estimations). Seule la valeur haute est compatible avec l'ensemble des observations (les bandes jaune, bleue et verte indiquent les mesures des différents éléments légers dans des sites primordiaux, avec les incertitudes de mesures).

plus leur longueur d'onde est décalée. Les raies d'absorption de l'hydrogène présentes dans des nuages lointains se retrouvent ainsi dans le spectre visible, observable du sol.

La raie Lyman alpha est présente des centaines de fois dans le spectre d'un quasar. Chacune provient de l'absorption de la lumière du quasar par un nuage particulier, situé entre le quasar et la Terre. Le décalage vers le rouge est donc différent pour chaque nuage, ainsi que la longueur d'onde de la raie. Le spectre résultant contient ainsi une tranche d'histoire cosmique, comme les anneaux de croissance d'un arbre : il révèle l'histoire de la fragmentation du gaz, le passage d'un Univers homogène

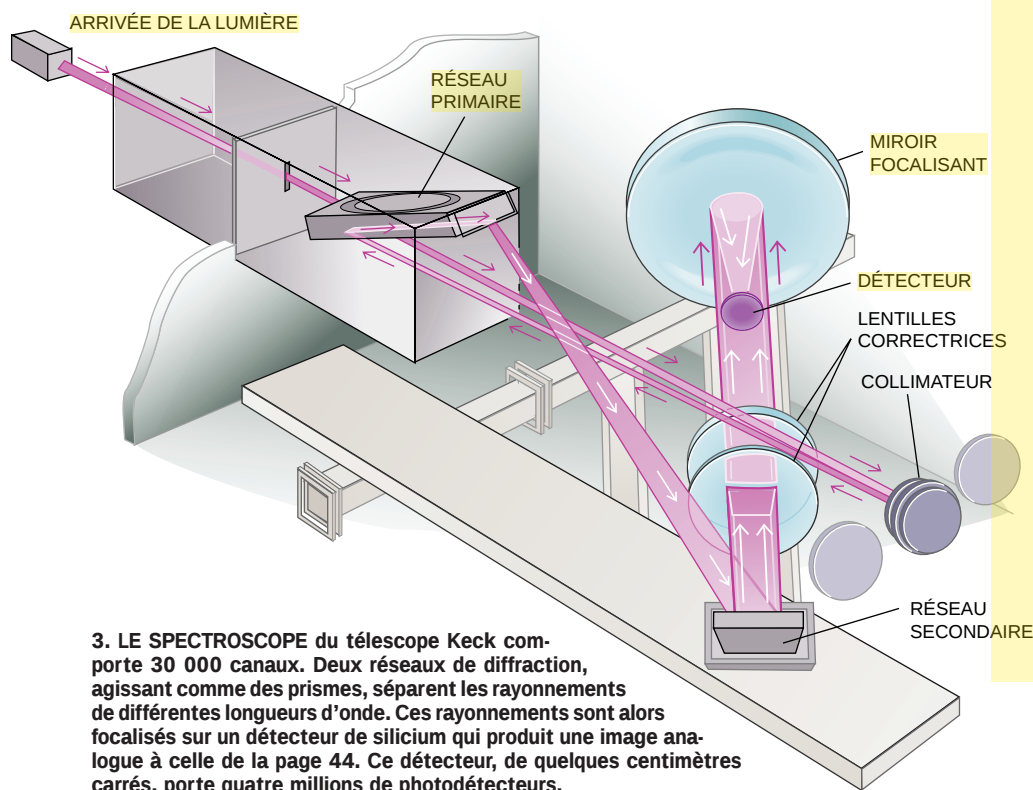
à un Univers hétérogène formé de milliards de galaxies. De tels spectres sont une autre manière de tester le caractère primordial de la matière absorbante : la théorie du Big Bang prédit que tous les nuages de gaz de l'Univers très jeune ont une composition semblable. La mesure de la composition de différents nuages, très éloignés de nous et très éloignés les uns des autres, testera directement cette uniformité cosmique primordiale.

Pour certains de ces nuages, on déduit du spectre des quasars à la fois la quantité d'hydrogène et celle de deutérium. En effet, la masse supérieure du noyau de deutérium accroît l'énergie nécessaire aux transitions électroniques

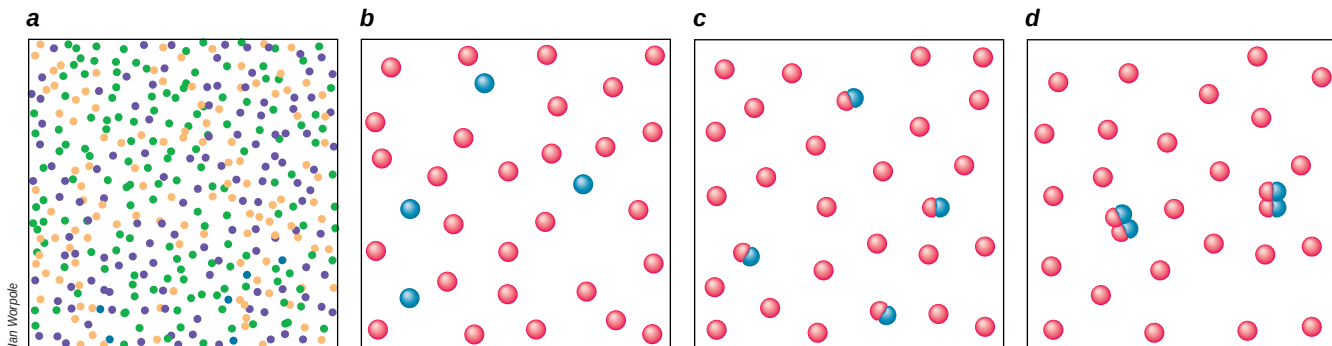
d'une partie pour 4 000, de sorte que toutes les raies sont décalées vers l'extrémité bleue du spectre. Dans les mesures spectrographiques d'un nuage « primordial », essentiellement composé d'hydrogène, le signal provenant de l'absorption par le deutérium est comme un « écho » faible, décalé vers le bleu, du signal produit par l'hydrogène.

Les spectres des nuages révèlent également les vitesses et les températures des atomes, grâce au phénomène d'effet Doppler : les atomes en mouvement à des vitesses différentes absorbent la lumière à des longueurs d'onde légèrement différentes, parce que la longueur d'onde des rayonnements dépend du mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur (la sirène d'une ambulance est plus aiguë quand elle approche de nous, plus grave quand elle s'éloigne). Aux températures des nuages, les atomes d'hydrogène se déplacent à des vitesses qui atteignent dix kilomètres par seconde, décalant la longueur d'onde d'une partie pour 30 000 ; parce qu'ils sont deux fois plus lourds, les atomes de deutérium à la même température n'atteignent que des vitesses de sept kilomètres par seconde, et la répartition de leurs vitesses est légèrement différente. Les spectrographes modernes distinguent ces différentes vitesses thermiques et mesurent les mouvements collectifs de plus grande ampleur.

Bien que les spectrographes puissent facilement discerner les raies de l'hydrogène et celles du deutérium, la divi-



3. LE SPECTROSCOPE du télescope Keck comporte 30 000 canaux. Deux réseaux de diffraction, agissant comme des prismes, séparent les rayonnements de différentes longueurs d'onde. Ces rayonnements sont alors focalisés sur un détecteur de silicium qui produit une image analogue à celle de la page 44. Ce détecteur, de quelques centimètres carrés, porte quatre millions de photodétecteurs.



4. LA NUCLÉOSYNTHESE, ou formation des noyaux atomiques, commença quelques instants après le Big Bang, lors du refroidissement de l'Univers : les quarks (a) s'agglutinent en protons et en neutrons (b) ; puis les protons (en rouge) et les neutrons (en bleu) formèrent des paires nommées deutons (les noyaux de deu-

térium). Toutefois, les protons étant plus nombreux que les neutrons, la plupart demeurèrent isolés et devinrent des noyaux d'hydrogène (c). Presque tous les deutons se combinèrent en noyaux d'hélium (d), et seuls les quelques noyaux de deutérium restants subsistent aujourd'hui.