

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

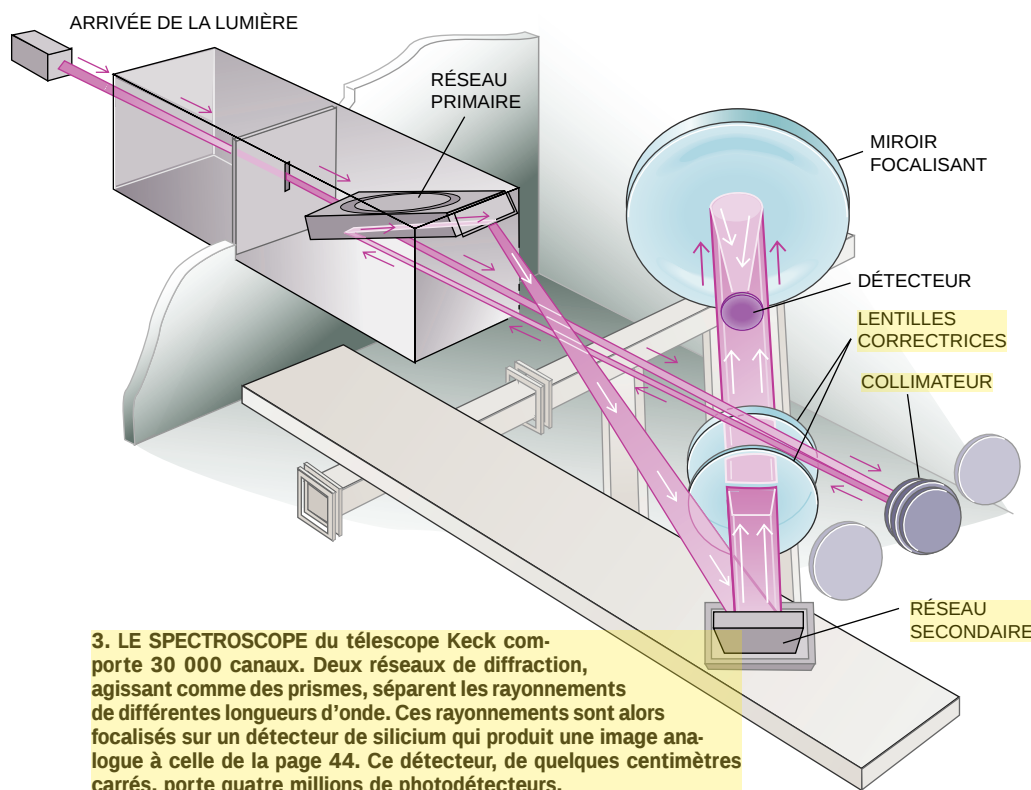
à un Univers hétérogène formé de milliards de galaxies. De tels spectres sont une autre manière de tester le caractère primordial de la matière absorbante : la théorie du Big Bang prédit que tous les nuages de gaz de l'Univers très jeune ont une composition semblable. La mesure de la composition de différents 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

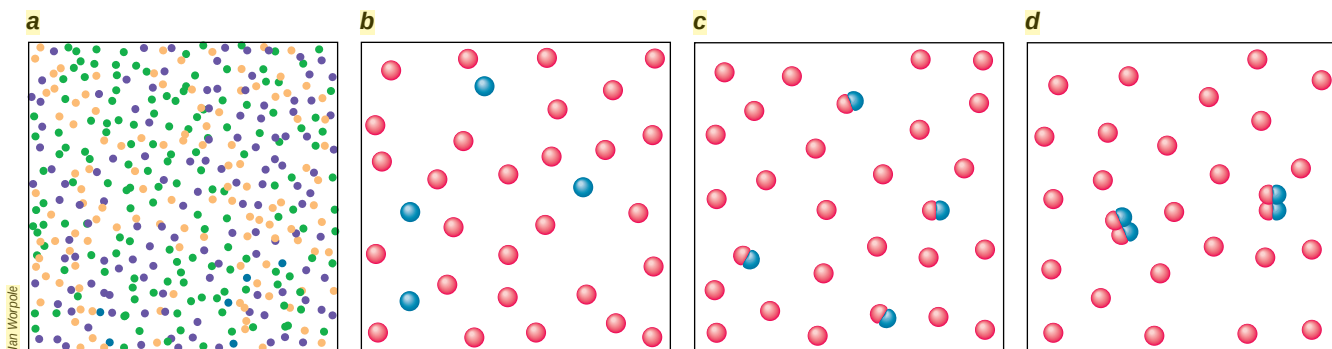
d'une partie pour 4 000, de sorte que toutes les raies sont décalées vers l'extrémité bleue du spectre. Dans les mesures spectrographiques d'un nuage «primordial», essentiellement composé d'hydrogène, le signal provenant de l'absorption par le deutérium est comme un «écho» faible, décalé vers le bleu,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

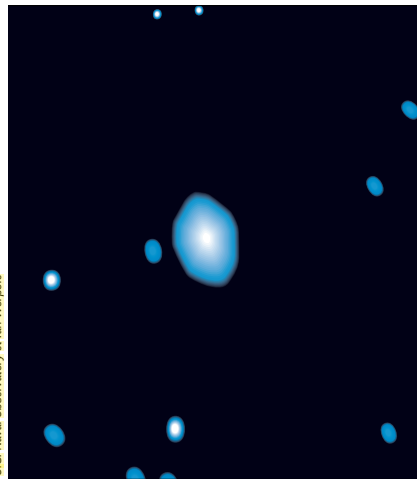
sion de la lumière d'un quasar lointain en 30 000 canaux spectroscopiques laisse très peu d'intensité dans chaque canal. Pendant plus de 20 ans, cette lumière est restée invisible. La technique fonctionne aujourd'hui grâce à des détecteurs améliorés, plus efficaces, au télescope Keck de Hawaï (son miroir a un diamètre de dix mètres) et à des spectrographes à haute résolution et haut débit, comme l'instrument HIRES du Keck.

En attendant la lumière

Après de nombreuses tentatives infructueuses à l'aide de plus petits télescopes, mes collègues Antoinette Songaila et Lennox Cowie, de l'Université d'Hawaï, ont pu observer un quasar à l'aide du télescope Keck, en novembre 1993. Ils ont pointé l'instrument vers le quasar 0014+813, célèbre parmi les astronomes pour son éclat (pendant plusieurs années, il fut l'objet le plus brillant connu dans l'Univers).

On savait qu'un nuage de gaz primordial se trouvait devant ce quasar. Le premier spectre enregistré, après quelques heures seulement d'observation, révéla la présence du deutérium cosmique : ce spectre comportait les traces de l'absorption par de l'hydrogène en mouvement, et un écho presque parfait de la raie Lyman alpha, décalé vers le bleu par le deutérium. L'intensité de ce second signal résulterait de la présence de deux atomes de deutérium pour 10 000 atomes d'hydrogène. Ce résultat a été confirmé par Robert Carswell et ses collègues de l'Université de Cambridge, qui ont utilisé le télescope Mayall, de quatre mètres de diamètre, à Kitt Peak, en Arizona. Les deux observations indépendantes confirment que la répartition des vitesses du deutérium est, comme prévu, exceptionnellement étroite.

Une partie de l'absorption observée pourrait résulter de l'interposition fortuite d'un petit nuage d'hydrogène qui s'éloignerait de nous à 82 kilomètres par seconde plus lentement que le nuage principal. Dans ce cas, le deutérium serait moins abondant que nous ne l'avons calculé. Bien que la probabilité d'une telle coïncidence soit faible, nous devons considérer notre estimation comme préliminaire et étudier, avec la même méthode, les nuages situés devant d'autres quasars. À ce jour, huit nuages ont été étudiés.



U.S. Naval Observatory et Ian Worpole

5. LE QUASAR 0014+813 est un des objets du cosmos les plus brillants que nous connaissons. Il apparaît ici sur une image prise par un radiotélescope. L'absorption de la lumière émise par ce quasar, à la limite de l'Univers observable, fournit les premières mesures du deutérium primordial.

L'un des résultats les plus intrigants a été obtenu par David Tytler et Scott Burles, de l'Université de San Diego, et par Xiao-Ming Fan, de l'Université Columbia : dans le nuage qu'ils ont étudié, la quantité de deutérium semble dix fois inférieure à celle que nous avons calculée. Pourquoi cet appauvrissement ? Le deutérium a-t-il été brûlé dans des étoiles ou la production de deutérium a-t-elle été moins uniforme que ne le prédit le Big Bang (voir l'encadré) ?

Voir la matière sombre

Si notre valeur élevée est correcte, l'Univers contient bien deux baryons pour dix milliards de photons, en accord avec la théorie du Big Bang. Avec cette proportion de baryons, les prédictions du Big Bang sont également cohérentes avec les quantités de lithium dans les étoiles les plus vieilles et avec les estimations de l'hélium primordial observé dans des galaxies proches pauvres en éléments lourds. La confirmation de notre mesure serait remarquable : elle indiquerait que les cosmologistes comprennent ce qui s'est passé une seconde à peine après le commencement de l'expansion de l'Univers, et que l'histoire de la matière aux grandes distances ressemble à celle de la matière proche, conformément au modèle le plus simple de l'Univers.

L'estimation de η que donne l'observation des nuages est conforme à ce que nous observons aujourd'hui dans

l'Univers : en estimant la densité totale de photons de l'Univers et en la rapportant à cette valeur de η , on calcule que l'Univers contient un atome par dix mètres cubes d'espace. C'est à peu près ce que l'on trouve quand on détermine directement le nombre d'atomes de l'Univers en tenant compte de toute la matière présente sous la forme de gaz, d'étoiles, de planètes ou de poussières. Ainsi l'Univers ne contiendrait-il pas beaucoup de baryons invisibles. Pourtant l'observation des galaxies et de leur halo indique que leurs mouvements ne sont explicables que si beaucoup de matière est invisible (au moins dix fois la densité moyenne des baryons visibles). La quantité élevée de deutérium que nous avons mesurée indique que cette matière invisible n'est pas la matière atomique ordinaire.

Les cosmologistes ont envisagé de nombreuses possibilités. Par exemple, la théorie du Big Bang prédit que l'Univers contient presque autant de neutrinos que de photons. Si chacun possédait une masse de quelques milliardièmes de celle du proton (soit quelques électronvolts), la masse totale des neutrinos serait presque égale à celle des baryons. Il se peut aussi que l'Univers ait initialement contenu une ou plusieurs particules exotiques. Quoi qu'il en soit, le modèle du Big Bang, conforté par les observations, fournit un cadre pour prédire les conséquences de ces nouvelles idées pour l'astrophysique.

Craig HOGAN dirige le département d'astrophysique de l'Université de Washington, à Seattle.

Steven WEINBERG, *Les trois premières minutes de l'Univers*, Éditions du Seuil, 1978.

F.H. SHU, *The Physical Universe : An Introduction to Astronomy*, University Science Books, Mill Valley, Californie, 1982.

J. SILK, *A Short History of the Universe*, W.H. Freeman and Company, 1994.

A. SONGAILA, L.L. COWIE, C.J. HOGAN et M. RUGERS, *Deuterium Abundance and Background Radiation Temperature in High-Redshift Primordial Clouds*, in *Nature*, vol. 368, pp. 599-604, 14 avril 1994.

Cosmic Abundances, ASP Conference Series, vol. 99, sous la direction de S.S. Holt et G. Sonneborn, Astronomical Society of the Pacific, 1996.

C.J. HOGAN et P.J.E. PEEBLES, *The History of the Galaxies*, in *Nature*, vol. 381, pp. 489-495, 6 juin 1996.