

2. LA MESURE DE LA COMPOSITION de l'Univers primordial est difficile, parce que la matière a subi des transformations au sein des étoiles. Néanmoins, on obtient une telle mesure en étudiant des nuages éclairés, de l'arrière, par des quasars. Ces derniers se trouvent à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière, à la frontière de l'Univers observable. Lorsque cette lumière traverse des nuages de gaz quasi primordial, peut-être en périphérie d'une galaxie en formation (une simulation d'un nuage de gaz primordial est représenté dans le médaillon, à gauche), l'hydrogène et le deutérium de ces nuages absorbèrent des rayonnements à des longueurs d'onde caractéristiques. Ces absorptions, mesurables par les télescopes terrestres, révèlent la proportion de deutérium.

primordiaux, en particulier celle du deutérium. Multiplier η par 5, par exemple, conduit à diviser par 13 la quantité de deutérium produite.

La présence actuelle de deutérium impose une limite supérieure pour η : le Big Bang constitue la seule source de deutérium dans l'Univers et les étoiles ne font que le détruire. Cet isotope est comme du charbon non consommé dans un poêle : le feu s'est éteint avant qu'il ne soit complètement brûlé. La nucléosynthèse primordiale n'a duré que quelques minutes, mais la combustion nucléaire dans les étoiles dure depuis des milliards d'années. C'est donc dans les étoiles que le deutérium a été transformé en hélium ou en éléments plus lourds, et tout le deutérium que nous retrouvons aujourd'hui est un vestige du Big Bang, jusqu'aux quelques atomes de deutérium qui occupent la place d'atomes d'hydrogène dans une molécule d'eau de mer sur 10 000.

La détermination de la quantité primordiale du deutérium n'est pas facile, car l'Univers a beaucoup évolué. Les astronomes mesurent la quantité de deutérium dans des nuages d'hydrogène atomique, entre les étoiles de notre Galaxie, mais comme le deutérium est facilement détruit, les résultats obtenus ne sont pas représentatifs de la valeur primordiale. Nous vivons dans une galaxie d'âge moyen, dont le gaz a subi une importante modification chimique tout au long de ses dix milliards d'années d'histoire. Le deutérium est détruit très rapidement dans les étoiles, même dans leurs couches externes et alors que les étoiles sont encore en formation. Comme les étoiles éjectent leurs enveloppes en mourant, le gaz de notre Galaxie a ainsi subi de nombreux recyclages. Par conséquent, l'observation des nuages de gaz proches ne peut fournir qu'une limite inférieure à la quantité du deutérium primordial.

Quasars et nuages de gaz

L'idéal serait de trouver de la matière réellement primordiale, qui n'aurait jamais évolué chimiquement. Cette matière existe : ce sont des nuages de gaz lointains qui ne se sont pas encore condensés en galaxies. La lumière qui provient des quasars brillants, les objets les plus anciens que nous puissions voir,

a été émise lorsque l'Univers avait moins d'un dixième de son âge actuel. En chemin, cette lumière traverse les nuages «primordiaux» situés entre les quasars et nous, de sorte que son absorption révèle la composition du matériau absorbant. Dans certains de ces nuages, on a mesuré une concentration en carbone et en silicium (produits de la fusion nucléaire dans les étoiles) 1 000 fois inférieure à celle que l'on mesure dans l'espace proche : c'est l'indication que ce gaz n'a pas été beaucoup recyclé et que les nuages sont réellement «primordiaux», avec une composition proche de celle qui prévalait quelques minutes après le Big Bang.

L'examen d'objets lointains procure un autre avantage. La composante principale de ces nuages, l'hydrogène atomique, absorbe la lumière à des longueurs d'onde ultraviolettes particulières, les raies de Lyman. Chacune de ces raies d'absorption (ainsi nommées parce qu'elles forment des raies sombres dans le spectre) correspond à la longueur d'onde d'un photon ayant exactement l'énergie requise pour exciter l'électron d'un atome d'hydrogène vers un niveau d'énergie supérieur particulier. Ces raies ultraviolettes ne sont pas observables du sol, en raison de l'absorption atmosphérique à ces longueurs d'onde (l'observation du ciel ultraviolet nécessite des télescopes embarqués sur satellite). Même la raie de plus grande longueur d'onde et la plus intense, la raie Lyman alpha, est à une longueur d'onde de 121,5 nanomètres (milliardièmes de mètre), hors des fenêtres atmosphériques. Fort heureusement, l'expansion de l'Univers allonge les longueurs d'onde des photons qui atteignent la Terre : plus ces photons ont été émis il y a longtemps,

Le deutérium, une clé pour la cosmologie

Les astrophysiciens ont identifié trois groupes d'isotopes (noyaux qui diffèrent par leur nombre de neutrons) qui constituent la matière ordinaire, celle de la Terre, des étoiles et des galaxies, et ils ont établi leur origine.

Premièrement, l'hydrogène et une grande partie de l'hélium 4, noyaux de loin les plus nombreux, ainsi que le deutérium, l'hélium 3 et le lithium 7 sont issus de la nucléosynthèse primordiale : peu de temps après le Big Bang, les réactions de fusion thermonucléaire synthétisèrent ces premiers noyaux. Deuxièmement, le lithium, le béryllium et le bore sont d'une extrême rareté ; ils sont fabriqués dans le milieu interstellaire par brisure de noyaux plus lourds tels le carbone et l'oxygène. Enfin, tous les autres noyaux, du carbone à l'uranium, sont engendrés au cours des différentes phases de l'évolution stellaire, par la fusion thermonucléaire.

Le deutérium est particulier, car, contrairement aux deux isotopes de l'hélium et au lithium 7, qui peuvent être partiellement produits ou détruits dans les étoiles, il est si fragile qu'il ne peut subsister ni être fabriqué dans ces objets. Aussi la proportion de deutérium par rapport à l'hydrogène permet-elle de préciser la physique du Big Bang, à condition bien sûr de se rapprocher au mieux de sa valeur primordiale.

Cette prouesse vient d'être accomplie grâce à la mesure de raies d'absorption du deutérium, révélatrices de nuages intergalactiques lointains, interposés entre les quasars et nous. Aujourd'hui, deux séries de mesures, effectuées au moyen du télescope Keck, donnent des résultats différents d'un facteur dix : une valeur haute d'environ 2×10^{-4} et une valeur basse de $2,3 \times 10^{-5}$.

Que révèlent ces deux valeurs sur le déroulement du Big Bang, d'une part, et sur la nature de la matière noire (substance n'émettant ni n'absorbant aucune onde électromagnétique), d'autre part ?

La théorie du Big Bang standard prévoit trois devenir possibles pour notre Univers. Si la densité de matière est suffisante, la gravitation agira comme une force de rappel qui ralentira, puis inversera le mouvement d'expansion général. La phase de contraction globale se soldera par un effondrement gigantesque. Inversement, si la densité est insuffisante pour freiner et inverser le mouvement d'expansion, l'Univers continuera indéfiniment à se dilater. Enfin, si la matière exerce une force de rappel qui compense exactement l'expansion générale, cette dernière ralentira indéfiniment. Cette densité de matière, calculée dans le cadre de la théorie du Big Bang, est de quelques protons par mètre cube : c'est la densité critique.

Les astrophysiciens disposent de plusieurs méthodes pour déterminer le paramètre de densité de l'Univers, défini comme le rapport de la densité de matière à la densité critique. Ils estiment d'abord la densité de matière lumineuse, en additionnant la luminosité de toutes les étoiles dans les régions centrales des galaxies, puis en multipliant cette luminosité totale par le rapport moyen entre la masse des galaxies et leur luminosité, établi sur un vaste échantillon de galaxies. Par cette méthode, les

astrophysiciens ont calculé que la densité de matière lumineuse dans l'Univers est égale à seulement 0,4 pour cent de la densité critique.

On évalue la densité de matière de manière plus complète par l'examen de ses effets gravitationnels, en considérant le mouvement des galaxies au sein des amas et des groupes de galaxies. Selon cette méthode dynamique, on déduit les masses des groupes et des amas de galaxies à partir du mouvement des galaxies individuelles en supposant que ces amas sont liés par la gravitation. On trouve ainsi que la densité «dynamique» est comprise entre 20 et 30 pour cent de la densité critique.

Enfin, on estime de manière indépendante la densité de la matière ordinaire, dite baryonique (constituée de protons et de neutrons), en analysant la nucléosynthèse primordiale dans le cadre de la théorie standard du Big Bang. Bien qu'elle soit théorique, cette évaluation est, comme on le verra, compatible avec l'ensemble des observations disponibles.

La nucléosynthèse primordiale des éléments légers (hydrogène, deutérium, hélium 3, hélium 4 et lithium 7) constitue, avec l'expansion de l'Univers et le rayonnement cosmologique fossile, l'un des piliers de la théorie du Big Bang. Les proportions relatives des éléments légers, réparties sur neuf ordres de grandeurs (un atome d'hélium 4 pour dix atomes d'hydrogène ; un atome de lithium 7 pour dix milliards d'atomes d'hydrogène) sont en effet expliquées de manière cohérente par la théorie du Big Bang et par nulle autre, ce qui en assure, à cet égard, la prééminence.

La mesure du deutérium, dans le milieu interstellaire local, indique une proportion par rapport à l'hydrogène égale à $1,6 \times 10^{-5}$ (observation effectuée par le *Télescope spatial Hubble*). Sa proportion dans la nébuleuse protosolaire a été déduite des valeurs mesurées dans le vent solaire et les météorites ($2,6 \times 10^{-5}$), et dans l'atmosphère de Jupiter (3×10^{-5} , résultat obtenu par la sonde *Galileo*). Cependant, les mesures qui se rapprochent le plus de la valeur primordiale sont, sans conteste, celles qui sont décrites par Craig Hogan.

Le deutérium est détruit dans les étoiles lorsque la température atteint 600 000 degrés. Le noyau de deutérium capte alors un proton et se transforme en un noyau d'hélium 3. Aussi, sa quantité n'a fait que décroître depuis la nucléosynthèse primordiale, suite à la transformation incessante du gaz en étoiles, au cours de l'évolution des galaxies.

Le cas de l'hélium 3 est complexe, car certaines étoiles le produisent et d'autres le détruisent. Selon les modélisations stellaires utilisées, on trouve des quantités d'hélium 3 produites très différentes. Cependant, la proportion primordiale de cet isotope dépend peu des conditions physiques de la nucléosynthèse du Big Bang. Par ailleurs, nous disposons de deux estimations : la proportion d'hélium 3 dans la nébuleuse protosolaire a été évaluée à $1,5 \times 10^{-5}$ (composition d'il y a 4,5 milliards d'années), tandis que sa proportion dans le milieu interstellaire proche est égale à $2,2 \times 10^{-5}$ (composition actuelle), ce qui indiquerait que cette proportion a peu varié au cours du temps.