

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.

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 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 pourraient être dans les naines brunes, ces «étoiles ratées», objets insuffisamment massifs pour

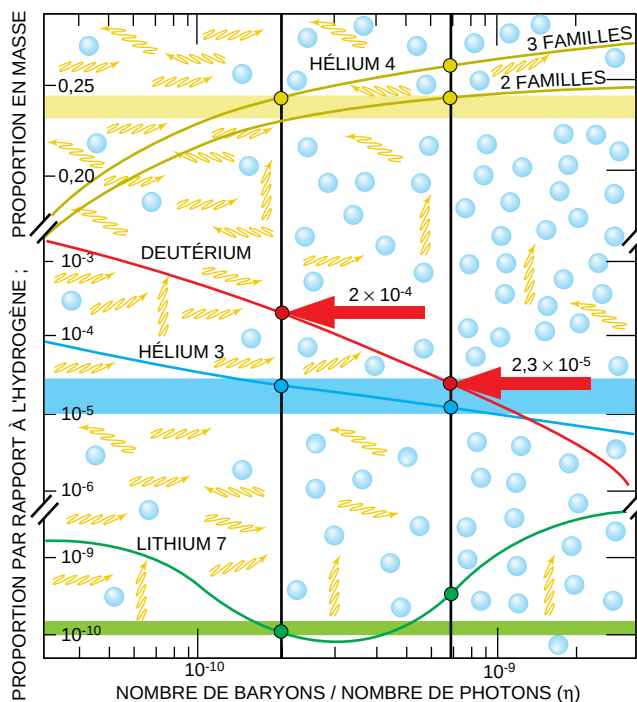
amorcer des réactions thermonucléaires, ou encore dans de grosses planètes comme Jupiter, qui émettent peu de lumière. Les cadavres d'étoiles pourraient aussi constituer cette matière sombre, sous forme de naines blanches, résidus des étoiles de petite masse comme le sera notre Soleil dans cinq milliards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