

Le deutérium inter- stellaire

Dans notre numéro de janvier, Pierre Encrenaz a relaté la découverte récente du deutérium interstellaire par deux groupes de radioastronomes des Etats-Unis, et évoqué l'intérêt de cette découverte pour la cosmologie. Avant que cette découverte ne soit connue, Hubert Reeves avait estimé, à partir de l'abondance du deutérium dans l'eau terrestre et dans d'autres parties du système solaire, l'abondance du deutérium dans la galaxie, et montré ce que l'on pouvait en déduire pour remonter aux premières étapes de l'histoire de l'univers. Il fait ici le point sur cette question. D'autre part, Jay Pasachoff, un des auteurs de la découverte du deutérium interstellaire, relate en détail, dans la deuxième partie de cet article, ses observations et celles d'autres chercheurs. Dans une dernière partie, les deux auteurs évaluent les progrès que ces divers travaux doivent permettre dans la compréhension de la nature et de l'évolution de l'univers.

Dans la nature, l'hydrogène existe sous deux formes ; la forme qui nous est la plus familière et qui est de beaucoup la plus fréquente est constituée d'un proton autour duquel gravite un électron : c'est l'atome le plus simple. La seconde forme, appelée deutérium, diffère de la première par l'addition d'un neutron : l'électron gravite maintenant autour d'un noyau deux fois plus massif (un proton et un neutron) mais de même charge. Le deutérium a été découvert il y a quarante ans par Harold C. Urey, découverte pour laquelle il a obtenu le prix Nobel.

Dans l'eau terrestre, il y a à peu près un atome de deutérium pour dix mille atomes d'hydrogène : cela semble très peu, et l'on pourrait croire que le deutérium est un atome très rare. En fait, il n'en est rien : comparé aux autres atomes, il s'avère être parmi les mieux représentés dans l'univers : il n'y a guère que sept ou huit éléments qui soient plus abondants (voir *la Recherche*, n° 13, p. 531, juin 1971).

L'origine du deutérium. (1)

On s'est longtemps demandé d'où provenait le deutérium dans la nature : plusieurs mécanismes de formation de cet isotope ont été présentés, puis rejetés à cause de leur inefficacité à rendre compte du rapport d'abondance entre l'hydrogène (H) et le deutérium (D). Ainsi, les réactions nucléaires responsables de l'énergie solaire produisent une certaine quantité de deutérium mais le détruisent presque aussitôt : la valeur à l'équilibre du rapport D/H à l'intérieur du Soleil est environ de 10^{-17} , soit 10^{11} fois moins que sur la Terre. Il faudrait, pour obtenir une quantité importante de deutérium, que celui-ci soit porté dès après sa formation à une température assez basse pour que la réaction de destruction ne puisse plus se produire. La presque totalité des conditions naturelles que nous connaissons sont hostiles à la production du deutéron (noyau du deutérium). On peut cependant imaginer de produire du deutérium en bombardant une cible appropriée avec des particules de haute énergie. Dans ces conditions, les deutérons formés ne sont jamais soumis à de hautes températures et survivent sans difficulté. Il s'agit cependant d'une méthode extrêmement coûteuse et peu efficace. La nature engendre elle-même des flux de particules à haute énergie (rayonnement cosmique, particules solaires) et produit de cette façon une certaine quantité de deutérons. Mais il est facile de calculer que tous les deutérons ne peuvent venir de là ; il faudrait disposer de sources d'énergie qui sont bien supérieures aux sources naturelles que nous connaissons.

D'où viennent alors les deutérons ? Revenons un moment sur une de nos remarques précédentes. Puisque le deutérium doit être créé à chaud mais préservé à froid, on peut penser que le cas de l'explosion est le cadre naturel d'un tel scénario. Il faudrait alors que la vitesse d'explosion soit telle qu'après leur formation pendant la phase initiale chaude, les deutérons soient évacués suffisamment rapidement vers un extérieur froid, ce qui est une situation bien particulière

qu'on ne rencontre pas dans les phénomènes explosifs stellaires habituels. Les conditions qu'on associe généralement aux supernovæ, par exemple, ne font absolument pas l'affaire : le deutérium qui y aurait été formé serait détruit bien avant de s'échapper du milieu explosif. Cependant, Hoyle et Fowler, ainsi que Cameron, reviennent sur l'idée d'une synthèse dans la galaxie, qui se ferait dans des ondes de choc de très grande vitesse dont la nature n'est pas précisée. Les conditions à réaliser dans ces ondes de choc sont extrêmement strictes, et l'énergie totale nécessaire est si grande que l'on a peine à imaginer que ce modèle soit réaliste.

Ainsi, d'une façon générale, que ce soit au sein de réactions thermonucléaires isothermes (comme dans le Soleil) ou explosives (comme dans les explosions de supernovæ), les étoiles n'engendrent pas d'atomes de deutérium et, en fait, elles détruisent ceux qui s'y trouvent déjà. Voilà un point important pour notre analyse. Par contre, les conditions requises pour la formation du deutérium se retrouvent tout naturellement dans l'explosion universelle que l'on croit maintenant avoir coïncidé avec le début de l'univers, explosion appelée communément le « big bang » (voir *la Recherche*, n° 2, p. 141, juin 1970).

Fort heureusement, cette théorie de l'origine de l'univers a gagné beaucoup de plausibilité après la découverte en 1968, par Arno Penzias et Robert Wilson, d'un rayonnement radio correspondant à celui que donnerait un objet à une température d'environ 3 K. Dans le cadre de la théorie du « big bang » ce rayonnement est ce qui reste de l'éclat lointain des heures glorieuses où la lumière primait sur toutes les autres formes de matière. Après la détection de ce rayonnement, on peut dire que la majorité des cosmologistes se sont ralliés à la théorie du « big bang », et pour nous se trouve là le cadre naturel de formation du deutérium. En fait, on pourrait même inverser l'argument et dire que l'existence du deutérium, compte tenu des difficultés que nous avons rencontrées à expliquer son origine, constitue une très forte présomption en faveur du « big bang ».

Du coup, le deutérium devient un isotope prodigieusement intéressant puisqu'il nous vient, par delà les générations d'étoiles et de galaxies, du tout début de l'univers et, en fait, des quelques premières minutes qui ont suivi le début de l'expansion universelle. On peut donc espérer obtenir des renseignements de première importance sur les caractéristiques de l'expansion à partir de son étude. En fait, le deuté-

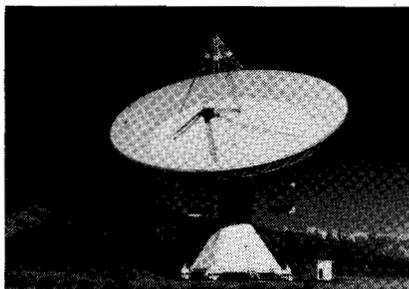


Fig. 1. Le radiotélescope de 40 mètres de diamètre de l'observatoire radio d'Owens Valley (Californie). Mis en service en 1969, cet instrument, qui dépend du California Institute of Technology, peut fonctionner jusqu'à une longueur d'onde minimale de 1 cm. Il était utilisé pour cette observation par un groupe du CalTech et du Williams College.

(Cliché Jay M. Pasachoff.)

rium n'est pas le seul isotope à jour d'une origine aussi vénérable. Les deux isotopes de l'hélium, le ^3He et le ^4He , et peut-être aussi le ^7Li viennent d'aussi loin et renferment d'aussi précieux renseignements.

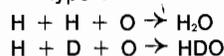
Il serait d'une importance capitale de savoir quelle est la quantité de deutérium qui a été fabriquée au moment de l'explosion initiale. Ce paramètre peut être relié à d'autres paramètres cosmologiques comme la densité présente de l'univers, le nombre de neutrinos qui s'y trouve et la valeur du champ magnétique intergalactique (sur lequel nous ne connaissons rien). Pour déterminer l'abondance initiale du deutérium, il faut d'abord connaître son abondance présente, et ensuite comprendre comment cette abondance a pu varier avec le temps.

L'abondance du deutérium. (2)

Jusqu'aux observations radioastronomiques récentes, la seule mesure convenable de l'abondance du deutérium était relative à l'eau terrestre : nous avons indiqué au début que ce rapport D/H y vaut $1,6 \cdot 10^{-4}$. Cette abondance se retrouve aussi dans l'eau contenue dans certaines météorites appelées chondrites carbonées. Puisque les éléments, les isotopes et leur rapport d'abondance n'ont vraisemblablement pas changé depuis l'origine du système solaire, on peut supposer que ce rapport D/H donne celui du nuage de gaz interstellaire à partir duquel le Soleil s'est formé. Cependant, nous rencontrons aussitôt une difficulté que nous allons examiner.

Depuis quelques années, une équipe de l'université de Berne dirigée par Johannes Geiss mesure la composition isotopique du vent solaire au moyen de feuilles d'aluminium que les astronautes vont installer sur la Lune. Le vent solaire est constitué d'un gaz dont la composition est vraisemblablement représentative de celle de la matière superficielle du Soleil projetée dans l'espace interplanétaire par un phénomène d'« évaporation » maintenant assez bien connu. On ne s'attend pas à trouver du deutérium à la surface du Soleil, mais les atomes de ^3He que Geiss détecte sur ses feuilles d'aluminium proviennent à la fois de la destruction du deutérium à la surface du Soleil et des atomes de ^3He qui se trouvaient dans le nuage proto-solaire. Or les mesures effectuées par Geiss montrent que la somme de ces deux composantes est en fait quatre fois inférieure à la valeur que nous devrions trouver si le rapport initial D/H de la matière solaire était identique à celui de l'eau.

Cette difficulté n'est qu'apparente : en effet, lors de la formation de l'eau à l'origine du système solaire, le produit obtenu s'est trouvé enrichi en deutérium. Le gaz initial contenait en particulier de l'oxygène O, de l'hydrogène H et du deutérium D, à partir desquels l'eau s'est formée par des réactions du type :



Lorsque la concentration en eau est devenue suffisante, une nouvelle réaction moléculaire est intervenue :



qui a altéré les abondances relatives de l'eau et de l'eau lourde HDO. L'abondance relative est en fait strictement déterminée par la température à laquelle l'eau s'est formée. Cette température est à peu près connue grâce à l'étude d'autres rapports isotopiques ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, $^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$) dans les chondrites carbonées ; elle est de 300 à 400 K. A ces températures, l'eau contient de trois à cinq fois plus de deutérium que le gaz initial à partir duquel elle s'est formée. Ainsi la première usine d'enrichissement en deutérium a fonctionné au tout début du système solaire. On peut donc évaluer à environ $3 \cdot 10^{-5}$ le rapport D/H dans la nébuleuse proto-solaire, c'est-à-dire dans le gaz interstellaire au moment de la naissance du Soleil. Cette analyse a récemment été confirmée par la détection de méthane « lourd » (CH_3D) dans l'atmosphère de Jupiter, qui a permis de déterminer, bien que sans grande précision, le rapport D/H dans l'ensemble de la planète. Sa valeur est inférieure à celle de l'eau, mais tout à fait compatible avec l'abondance D/H lors de la formation du Soleil, telle qu'elle est évaluée par l'étude du vent solaire et de la formation de l'eau.

La découverte du deutérium interstellaire. (3)

Nous savons depuis 1951 que le gaz très dilué au sein duquel baignent les étoiles est essentiellement composé d'hydrogène à l'état atomique. Il était bien naturel de chercher si ce gaz contenait du deutérium, et en quelle quantité. Comme l'hydrogène atomique, le deutérium atomique émet une raie radio qui correspond à la transition entre deux sous-niveaux de son état fondamental. Pour l'hydrogène, cette émission se produit à la longueur d'onde de 21 centimètres ; elle a été détectée pour la première fois par Edward M. Purcell et Harold I. Ewen, de Harvard, il y a vingt-deux ans et, depuis ce temps, a été utilisée par les astronomes pour cartographier notre galaxie et des galaxies extérieures.

La raie correspondante du deutérium se trouve à 92 cm de longueur d'onde et est évidemment beaucoup plus faible que celle de l'hydrogène ; il fut clair, dès le début, qu'elle serait extrêmement difficile à détecter. Pourtant, peu après que la raie de l'hydrogène fut découverte, plusieurs radioastronomes se mirent à rechercher le deutérium. Ces recherches culminèrent il y a dix ans lorsque Sander Weinreb, du National Radio Astronomy Observatory, utilisa un radiotélescope de 25 m de diamètre pour rechercher la raie à 92 cm, en absorption, devant une radiosource très intense située dans la constellation de Cassiopée. Il observa, pendant des semaines, mais ne réussit pas à détecter le deutérium. Il lui fut cependant possible d'affirmer que l'abondance du deutérium dans cette direction est inférieure à $1/13\,000$ de celle de l'hydrogène.

La radioastronomie s'est développée énormément depuis ce temps-là et, ces dernières années, de nombreuses molécules parfois complexes ont été découvertes dans certains nuages de l'espace interstellaire (voir *la Recherche*, n° 13, p. 817, oct. 1971). Mais la plupart de ces molécules ont été trouvées à des longueurs d'onde relativement courtes, de 21 cm environ à 2 mm, tandis que la région des ondes plus longues est restée relativement vierge de raies moléculaires détectables.

Ce n'est pourtant pas faute d'essayer. En 1969, Carl Gottlieb, Dale Dickinson, et moi-même avons utilisé le radiotélescope de 45 mètres de Sagamore Hill, Massachusetts, appartenant aux Air Force Cambridge Research Laboratories, pour rechercher diverses molécules sur ondes métriques. Nous avons continué cette recherche au National Radio Astronomy Observatory de Green Bank (West Virginia) en collaboration avec David Buhl, Patrick Palmer, Lewis Snyder, et Ben Zuckerman. Ces recherches, qui portaient entre autres sur des molécules contenant du deutérium (OD et HDO) n'ont pas été couronnées de succès.

Les chances de détecter une raie aussi faible que celle du deutérium à 92 cm, de même que n'importe quelle raie dans cette région du spectre, semblaient très faibles. Cependant, au cours de conversations avec William A. Fowler, du CalTech, en 1970, quand j'étais chercheur aux Hale Observatories, je fus impressionné et excité par l'importance fondamentale de la mesure de l'abondance du deutérium. Cela demanderait des semaines d'observation, mais il semblait que le radiotélescope de 40 mètres de l'observatoire d'Owens Valley, qui dépend du California Institute of Technology, pourrait être disponible à cet effet

- 1) Partie écrite par H. Reeves.
Références : J. Geiss, H. Reeves, *Astronomy and Astrophysics*, 18, 26, 1972 ; K.B. Jefferts, A.A. Penzias, R.W. Wilson, *Astrophysical Journal Letters*, 179, 157, 1973 ; J.A. Cesarsky, T. Moffet, J.M. Pasachoff, *Astrophysical Journal Letters*, 80, L1, 1973.
- 2) Partie écrite par H. Reeves.
Références : H. Reeves, J. Audouze, J.A. Fowler, N. Schramm, *Astrophysical Journal*, 179, 39, 1973 ; V. Wagoner, *Astrophysical Journal*, 179, 43, 1973 ; Hoyle, J.A. Fowler, *Nature*, 241, 34, 1973.
- 3) Partie écrite par Jay M. Pasachoff.

(fig. 1). Diego Cesarsky et Alan T. Moffet, de l'équipe d'Owens Valley, se joignirent à moi pour faire les observations.

Nous décidâmes d'observer par tranches de deux semaines, car nous voulions analyser nos résultats au fur et à mesure. Beaucoup de difficultés pouvaient rendre la recherche impossible. Par exemple, la raie à 92 cm se trouve dans une région spectrale réservée aux communications sol-air militaires, et on pouvait craindre que celles-ci, ou d'autres parasites, brouilleraient le signal. En fait, bien que les transmissions radio nous aient parfois gênés, nous avons pu rejeter les périodes qu'elles affectaient.

Notre première période d'observation eut lieu en mars 1972. Assistés par Fred Harris et Behrouz Marivani, du Williams College de Williamstown (Mass.), où je suis maintenant professeur, et de Mark Allen et Bernard Lazareff, du CalTech, nous observions jour et nuit le centre de notre Galaxie quand il était levé, la nébuleuse d'Orion et la radiosource Cassiopeia A le reste du temps. Les données semblaient bonnes, montrant que tout l'appareillage marchait convenablement, et nous avions l'impression qu'une faible raie de deutérium commençait à apparaître.

Les observations reprirent en juin et, cette fois, Dainis Dravins et Doug Jones, tous deux du California Institute of Technology, furent nos collaborateurs. Nous nous concentrons alors sur le centre galactique, qui est la radiosource Sagittarius A, devant laquelle se trouve la plus grande quantité connue d'hydrogène interstellaire, et donc vraisemblablement la plus grande quantité de deutérium, dont nous espérons qu'il donnerait une raie d'absorption détectable devant le rayonnement radio continu de la source. Cette raie sembla se montrer à nouveau, et il nous fallut du temps supplémentaire de radiotélescope : quatre semaines pendant l'été. Les résultats obtenus pendant la totalité des observations renforcèrent notre impression que le deutérium interstellaire était détecté (fig. 2).

La fréquence de la raie visible sur la figure 2 est si voisine de la fréquence mesurée au laboratoire qu'il ne peut s'agir que de cet isotope. La petite différence constatée est sans doute due à l'effet Doppler et correspond au rapprochement du gaz absorbant à une vitesse de 3,7 kilomètres par seconde ; le plus gros du gaz situé entre le centre galactique et nous se déplace avec une vitesse comparable, comme en témoigne le déplacement Doppler des raies du radical hydroxyle (OH) et du formaldéhyde (H_2CO) observés dans la même direction. Ce fait renforce

notre conviction que la raie du deutérium a été effectivement détectée. Tout ce que nous pouvons dire sur l'abondance du deutérium par rapport à l'hydrogène est que le rapport D/H est sûrement inférieur à $5 \cdot 10^{-4}$, et probablement de l'ordre de quelque 10^{-5} . La plus grande incertitude provient de la mauvaise connaissance que l'on a de la quantité d'hydrogène H interposé entre le centre galactique et nous qu'il est très difficile de déterminer avec précision.

Aussi, pendant ces mois derniers, Keith Jefferts, Arno Penzias et Robert Wilson, des Bell Telephone Laboratories, ont découvert la forme deutérée de la molécule interstellaire HCN (acide cyanhydrique), c'est-à-dire la molécule DCN. Cette découverte a été faite en observant un nuage de molécules très dense situé au voisinage de la Nébuleuse d'Orion, où la molécule DCN se manifeste par l'émission de deux raies à 2 et à 4 millimètres de longueur d'onde. L'intensité du rayonnement indique qu'il y a une molécule de DCN pour 170 de HCN, ce qui paraît à première vue énorme et surprenant. En fait, il se passe, dans la matière interstellaire, la même chose pour l'acide cyanhydrique que pour l'eau dans le système solaire primitif : un processus d'enrichissement naturel en deutérium, et le rapport DCN/HCN peut être très différent du rapport D/H. Phil Solomon et Neville Woolf, de l'université du Minnesota, ont estimé qu'il pourrait être 300 fois plus grand dans les conditions de température qui règnent dans le nuage d'Orion. Ce résultat, évidemment incertain, met le rapport D/H déduit des observations de Jefferts, Penzias et Wilson au même niveau que ce qu'indiquent nos observations : environ $2 \cdot 10^{-5}$.

Une autre méthode pour obtenir l'abondance du deutérium interstellaire vient également de devenir disponible grâce au récent lancement du satellite astronomique américain OAO 3, alias Copernicus. Cet observatoire orbital comporte en particulier un télescope de 90 cm de diamètre, dont le groupe de Princeton (L. Spitzer, J.F. Drake, E.P. Jenkins, D.C. Morton, J.B. Rogerson et D.G. York) est responsable. Il a permis d'obtenir des spectres dans l'ultraviolet lointain, de 950 à 1450 angströms et de 1650 à 3000 angströms, incluant en particulier des raies de l'hydrogène moléculaire, qui n'avaient été détectées auparavant qu'une seule fois, à partir d'une fusée, par Carruthers, du Naval Research Laboratory. H_2 n'a pas de raies dans le domaine visible, a des raies extrêmement faibles dans l'infrarouge, et est pratiquement indétectable autre part que dans l'ultraviolet lointain.

Les premiers résultats de l'expérience de Princeton viennent d'être annoncés, en janvier 1973. Chaque fois que le télescope ultraviolet pointe une étoile « rougie », c'est-à-dire dont le rayonnement est affecté par de la matière interstellaire interposée, il observe qu'au moins dix pour cent de la masse interposée est de l'hydrogène moléculaire ; cela a été observé pour 11 étoiles. L'hydrogène moléculaire a été aussi détecté dans un nombre comparable d'étoiles non rougies, jusqu'à une limite de 10^{-7} fois l'hydrogène atomique. De plus, deux raies de la molécule DH à 1054 et 1066 Å ont pu être observées dans 9 étoiles, et indiquent un rapport DH/ H_2 de l'ordre de 10^{-6} . Bien entendu, ce résultat doit être modifié par des calculs d'équilibre chimique pour que l'on obtienne l'abondance du deutérium ; les premières estimations ont donné D/H = 1/200, ce qui est très grand et en désaccord manifeste avec les autres déterminations : beaucoup de travail reste à faire pour éclaircir ce problème.

Finalement, Diego Cesarsky, du California Institute of Technology, vient récemment d'obtenir une limite supérieure indépendante de 1/1000 pour le rapport D/H dans la Nébuleuse d'Orion, grâce à des mesures très sensibles des raies radio de recombinaison. Celles de l'hydrogène et du carbone interstellaire sont connues, mais la raie du deutérium correspondant à celle de l'hydrogène n'est pas détectée. Il a utilisé pour cela le radiotélescope de 64 mètres de diamètre du Jet Propulsion Laboratory à Goldstone, en Californie, pour trouver une nouvelle limite.

L'abondance du deutérium à l'origine de la Galaxie et le « big bang ».⁽⁴⁾

L'ensemble des mesures que nous venons de décrire suggère que l'abondance du deutérium par rapport à l'hydrogène est de l'ordre de quelque 10^{-5} dans le milieu interstellaire dans l'étape actuelle de la vie de notre Galaxie. A l'origine du système solaire, il y a cinq milliards d'années, elle était probablement de l'ordre de D/H = $3 \cdot 10^{-5}$. Cependant, il est fondamental de connaître l'abondance du deutérium au tout début de l'univers, car celle-là seule nous permettra de connaître les conditions qui y régnaient et leur évolution temporelle.

Pour estimer cette abondance initiale nous pouvons faire notre profit d'une caractéristique que nous avons déjà mentionnée : les étoiles détruisent tout le deutérium qu'elles ont reçu et héritage du gaz galactique au moment de leur naissance. Ainsi donc l'histoire de la composition chimique du gaz galactique sera aussi l'histoire d'une

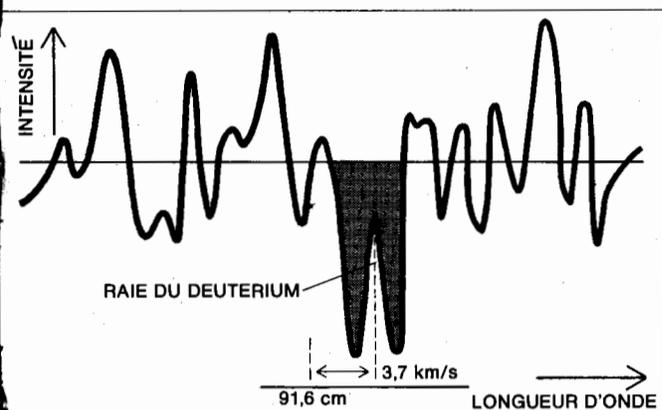


Fig. 2. Détection de la raie du deutérium interstellaire à 91,6 cm de longueur d'onde. Ce profil de raie représente le résultat de huit semaines d'observations dans la direction de la radiosource intense Sagittarius A, qui est au centre de notre Galaxie. La longueur d'onde de la raie, qui est visible en absorption devant la radiosource, est déplacée légèrement, ce qui correspond à un décalage par effet Doppler de 3,7 km/s. Les autres structures visibles sur le profil sont dues au bruit du système récepteur. D'autres observations sont prévues pour confirmer ce résultat, qui auront lieu probablement en 1973. Les chercheurs sont Diego A. Cesarsky, Allan T. Moffet et Jay M. Pasachoff.

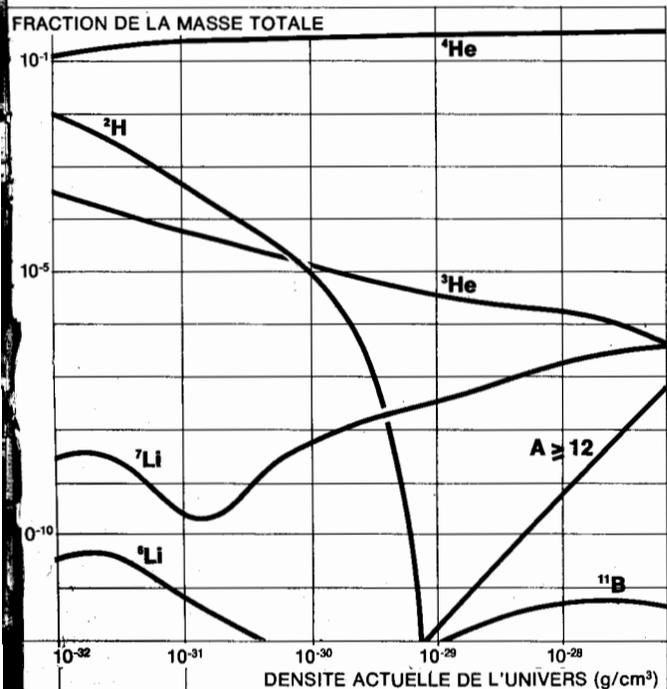


Fig. 3. Proportion, par rapport à l'hydrogène, de différents isotopes synthétisés lors du « big bang ». Ces courbes, qui résultent de calculs de Wagoner, Fowler et Hoyle revus récemment par Wagoner, montrent comment varie la proportion de ces isotopes en fonction de la densité de l'univers lors des premières étapes de son expansion, densité que l'on peut relier à la densité actuelle de l'univers, qui est portée en abscisse. On voit que la proportion d'hélium-4 est de l'ordre de 10 pour 100 de l'hydrogène, conformément à ce qui est observé, mais elle est très peu sensible à la densité de l'univers. La proportion d'hélium-3 et de lithium-7 est également peu sensible à la densité. Par contre, la proportion de deutérium ²H et ³He est très sensible. Si l'on admet qu'elle était de l'ordre de 10⁻⁵ comme le suggèrent les observations décrites dans le texte, la densité actuelle de l'univers est de l'ordre de 10⁻²⁷ grammes par centimètre cube.

diminution progressive du rapport D/H : chaque étoile en reçoit une certaine quantité, la brûle, et rejette dans l'espace à la fin de sa vie une matière complètement dépourvue de deutérium. La quantité de deutérium au moment de la formation de la galaxie peut être évaluée à partir de la quantité de deutérium interstellaire à la naissance du Soleil, si l'on peut déterminer quelle fraction de cette matière interstellaire n'a jamais été utilisée pour former des étoiles (nous dirons : n'a jamais été « astrée »). Il est possible, à partir d'une étude détaillée de l'évolution de la galaxie, du taux de formation des étoiles et du taux de rejet de matière stellaire dans l'espace, d'obtenir au moins une valeur approximative de cette fraction de matière « non astrée ». Plusieurs auteurs ont effectué ce calcul. Ils s'accordent à dire (mais avec une assez grande marge d'erreur possible) qu'à la naissance du Soleil, environ la moitié du gaz interstellaire n'avait jamais été « astrée ». Pour nous, cela veut tout simplement dire que l'abondance de deutérium à la naissance de la galaxie était environ deux fois plus élevée qu'à la naissance du Soleil. C'est la valeur que nous choisirons comme représentative du « big bang ».

Maintenant que nous connaissons l'abondance initiale du deutérium, il nous est possible de nous servir des calculs de Wagoner, Fowler et Hoyle pour en déduire certaines caractéristiques du « big bang ». Ces calculs montrent que la quantité de deutérium qui a été formée dans les premières étapes de l'univers est très sensible à la densité de l'univers : si la matière avait été trop dense, le deutérium formé lors des premières secondes aurait été rapidement transformé en éléments plus lourds, et nous en observerions moins maintenant ; au contraire, si l'univers avait été moins dense, nous aurions observé plus de deutérium. Ainsi à partir du rapport D/H nous pouvons déduire la densité de l'univers ; il faut également faire intervenir un autre paramètre qui est la quantité de rayonnement dans l'univers, laquelle est connue par la mesure du rayonnement général sur ondes millimétriques, dont nous avons dit un mot précédemment. Comme le montre la figure 3, on détermine ainsi une densité de l'ordre de 2.10⁻³¹ grammes par centimètre cube à l'époque actuelle (cette densité peut être facilement déduite de la densité lors des premières étapes de l'évolution de l'univers).

Il existe d'autres méthodes pour déterminer la densité actuelle de l'univers. L'une d'elles consiste à compter tout ce que l'on peut voir dans l'uni-

vers : étoiles, gaz, galaxies, dont la masse est à peu près connue. On doit à Stuart Shapiro, de Princeton, l'estimation la plus récente de la densité « observée » de l'univers, qui est de l'ordre de 10⁻³¹ grammes par centimètre cube ; ce chiffre n'est pas très différent du résultat précédent, un peu inférieur toutefois. La différence n'est pas très significative, compte tenu des erreurs possibles dans la détermination de ces densités : si toutefois la densité « observée » paraissait vraiment trop faible, il est clair qu'elle ne serait pas en désaccord réel avec la densité déduite de l'abondance du deutérium, car de la matière peut parfaitement exister sous une forme invisible : gaz intergalactique (non détecté jusqu'ici), galaxies ou étoiles très peu lumineuses, ou même « trous noirs », c'est-à-dire masses de matière tellement concentrées que la lumière ne peut s'en échapper (voir *la Recherche*, n° 32, mars 1973).

On peut par ailleurs obtenir une limite supérieure à la densité de matière présente dans l'univers sous forme visible ou invisible, en considérant l'influence gravitationnelle que cette matière a sur l'expansion de l'univers ; il est clair qu'une grande densité freinerait l'expansion, ce que l'on peut espérer voir en constatant des écarts à la loi de Hubble pour les galaxies lointaines (la loi de Hubble indique que la vitesse radiale apparente d'une galaxie est proportionnelle à sa distance). Tout ce que l'on peut déduire des observations actuelles est que la densité de l'univers déterminée de cette façon est, au plus, juste suffisante à le « fermer », ce qui signifie qu'elle est probablement inférieure à 10⁻²⁹ grammes par centimètre cube. Si l'on adopte la densité de 2.10⁻³¹ grammes par centimètre cube environ, déduite du rapport D/H, l'univers n'est certainement pas fermé et l'expansion se poursuivra indéfiniment.

Quelle foi peut-on accorder à ce résultat ? Bien sûr, il repose sur quelques hypothèses, en particulier sur la réalité du « big bang », qui n'est pas admise par tout le monde. Elle est aussi sujette aux incertitudes de l'observation et de la théorie qui s'attachent aux différentes évaluations effectuées avant d'arriver à la densité de quelque 10⁻³¹ g/cm³. On peut espérer qu'au cours des années les hypothèses gagneront en plausibilité et que les marges d'incertitude iront en s'amenuisant. Peut-être pourrions-nous alors déterminer presque à coup sûr la densité — ainsi que le passé et le futur de l'univers — à partir des mesures de l'abondance du deutérium.

Jay M. Pasachoff et Hubert Reeves.