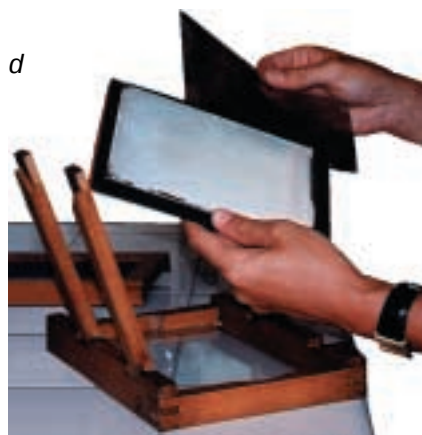




d'un dépôt de résine blanc (d). Nous souhaitons ici tirer une diapositive grand format posée en contact (e) avec la plaque (temps d'exposition de ce tirage contact : 10 minutes). Après exposition, l'image

encore invisible est placée au-dessus d'une cuvette contenant du pétrole blanc (f). L'image, le palmarium des jardins Albert Kahn, à Boulogne, apparaît sous l'action des vapeurs de pétrole et elle est fixée (g).

## L'association avec Daguerre

Niépce transmet à Daguerre sa passion pour la chimie. Pendant quatre ans, jusqu'à la mort de Niépce, Daguerre séjourne, à quatre reprises et parfois jusqu'à deux semaines, à Saint-Loup-de-Varennes pour travailler du matin au soir aux expériences communes. Dans les intervalles, ils communiquent par lettres, et celles de Daguerre ont été conservées. Un long travail d'analyse a permis de reconstituer pour la première fois les travaux des deux associés et de les reproduire en laboratoire.

En deux ans et demi ils mettent au point un nouveau procédé photographique que Niépce nomme le *physautotype* (mot néo-grec savant signifiant «image de la nature par elle-même»). La mince couche photosensible est constituée de résines ou de résidus de distillation de l'essence de lavande. Elle est étendue sur une plaque de métal argenté. Après exposition en chambre noire, la plaque est révélée à la vapeur de pétrole blanc (les raisons physico-chimiques de ces phénomènes ne sont pas encore complètement élucidées). Vue en éclairage oblique, l'image obtenue est positive. La résolution est excellente, les nuances sont bien rendues. Le temps de pose a été réduit à une journée, voire à trois ou quatre heures pour des objets rapprochés.

Les deux hommes savent qu'ils sont tout près d'aboutir. Mais Daguerre insiste pour ne pas divulguer leur invention avant d'avoir atteint le but : un temps de pose d'un quart d'heure au plus. «Dans l'état où sont les arts présentement il ne faut pas arriver à demi, car le moindre perfectionnement

apporté à une découverte fait souvent oublier son premier auteur», avait-il déjà écrit à Niépce, le 12 octobre 1829. Remarque ô combien pertinente!

Après la mort de Niépce (1833), Daguerre continue seul les recherches qui aboutiront au daguerréotype, image obtenue avec de l'iodure d'argent, essentiellement grâce à deux opérations : la première utilisant un révélateur (la vapeur de mercure) et la seconde un fixateur (le chlorure de sodium).

Daguerre comprend – et c'est son idée de génie – qu'il faut à l'invention une consécration scientifique officielle. Sa visite à François Arago, secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences et homme politique, allait être décisive pour l'avenir de la photographie. L'invention sera présentée au cours de la séance solennelle de l'Institut le 19 août 1839. L'État se porte propriétaire de la découverte, afin d'en «doter libéralement le monde entier». Daguerre et Isidore Niépce, héritier de son père,

reçoivent des pensions à vie. Mais la découverte devait être accompagnée d'un message simple : un seul inventeur. Dans la brochure de présentation de 1839, le texte de la *Notice* de Niépce est assorti de remarques critiques de Daguerre qui se révèlent sans fondement. L'examen des documents permet d'y voir l'influence d'Arago : pour s'imposer, semble penser Arago, un inventeur doit rehausser son propre rôle et dévaloriser celui des prédécesseurs. D'ailleurs, les recherches d'un autre Français contemporain, Hippolyte Bayard, sont passées sous silence.

Les péripéties qui accompagnent la «naissance officielle» de la photographie et son triomphe actuel remettent en lumière l'œuvre du pionnier : Niépce, inventeur de la photographie, a fait le premier pas vers la révolution des images. Il y a plus. Cet autre symbole de la modernité, l'ordinateur, doit beaucoup à la photogravure, dont Niépce est aussi l'inventeur.

**Archimède, l'émission franco-allemande de vulgarisation scientifique d'ARTE, présente deux sujets sur «La reconstitution des procédés de Niépce», les 4 et 11 février 1997.**

Jean-Louis MARIGNIER est chargé de recherche au CNRS (Laboratoire de physico-chimie des rayonnements de l'Université Paris-Sud). Il est lauréat de l'Académie des sciences (Grand Prix Kodak 1991) et a reçu la médaille de Salverte 1991 de la Société française de photographie.

Michel ELLENBERGER, ancien chercheur en physico-chimie biologique, est journaliste scientifique.

J.-L. MARIGNIER, *À la découverte des héliographies de Niépce*, *Le Photographe*, 1470, 13 (1989).

J.-L. MARIGNIER, *Mystères éclaircis de la plus ancienne photo au monde*, *Le Photographe*, 1480, 50 (1989).

J.-L. MARIGNIER, *Première reconstitution du deuxième procédé photographique au monde*, *Le Photographe*, 1499, 26 (1992).

J.-L. MARIGNIER, *Découverte de l'invention par Niépce et Daguerre d'un procédé photographique à base de colophane*, *Le Photographe*, 1524, 36 (1995).

J.-L. MARIGNIER, *Photochemistry of Asphaltene Films. A Study of the World's first photographic Process and its Invention*, in *J. Imag. Sci.*, 40, 123 (1996).

# Le deutérium primordial

CRAIG HOGAN

*Les noyaux de cette forme d'hydrogène furent créés dans les premiers instants de l'Univers. La détermination de sa quantité confirme l'existence de matière noire exotique.*

**S**elon la théorie du Big Bang, l'Univers primordial était extraordinairement simple : il ne renfermait aucune structure de taille supérieure à celle des particules élémentaires. La théorie du Big Bang n'est fondée que sur la relativité générale, le Modèle standard de la physique des particules et les lois de la thermodynamique, mais elle semble décrire de manière presque parfaite l'évolution de l'Univers et, en particulier, ses premières étapes.

Les noyaux atomiques synthétisés pendant les premières minutes de l'Univers nous renseignent sur les événements du début de l'Univers, ainsi que sur sa composition et sa structure d'aujourd'hui. Le Big Bang a principalement engendré de l'hydrogène et de l'hélium. Le deutérium, isotope lourd de l'hydrogène, n'a été fabriqué qu'au début de l'Univers ; il révèle donc la jeunesse de celui-ci. Le rapport entre le nombre d'atomes de deutérium et le nombre d'atomes d'hydrogène dépend fortement de l'uniformité et de la quantité totale de matière nucléaire créée lors du Big Bang. Les mesures directes du deutérium présent dans des nuages de gaz anciens, effectuées ces dernières années, promettent un test précis de la théorie du Big Bang.

L'expansion de l'Univers aurait commencé voici 10 à 20 milliards d'années. Tout était alors plus compact et plus dense qu'aujourd'hui. La température de l'Univers âgé d'une seconde était supérieure à dix milliards de degrés, soit 1 000 fois la température au centre du Soleil. À cette température, on distingue mal les différentes formes de matière et d'énergie : les particules nucléaires, les neutrons et les protons, se transforment constamment les uns en les autres, en

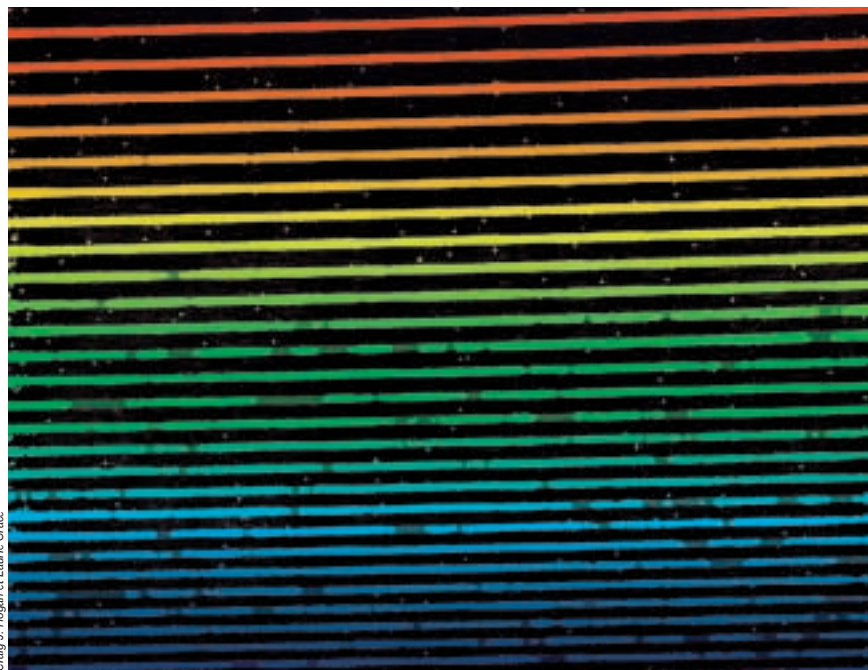
subissant de violentes collisions avec les neutrinos, les positons et les électrons. Comme les neutrons sont un peu plus massifs que les protons, le refroidissement de l'Univers a conduit à la formation d'un nombre supérieur de protons. Lorsque la température a été inférieure à dix milliards de degrés, les transmutations mutuelles ont cessé, et les protons ont été sept fois plus nombreux que les neutrons.

## À la sortie de la fournaise primordiale

Quelques minutes après le Big Bang, lorsque la température était voisine d'un milliard de degrés, les protons et

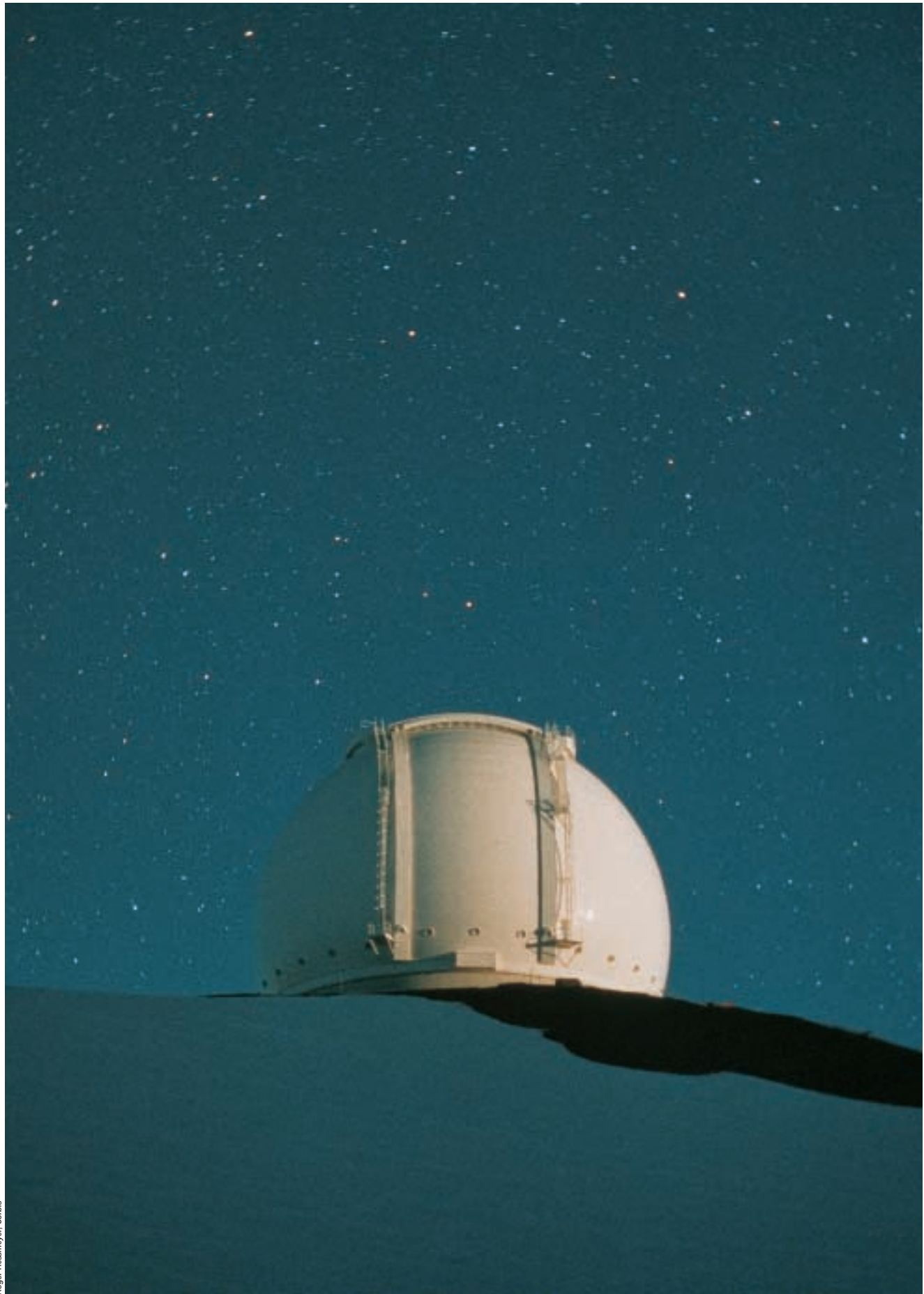
les neutrons se sont associés en noyaux. Les paires composées d'un neutron et d'un proton étaient des noyaux de deutérium, les deutons, qui se combinèrent presque tous en noyaux d'hélium, composés de deux protons et de deux neutrons. Lorsque cet hélium primordial s'est formé, la densité de l'Univers était devenue trop faible pour que des fusions nucléaires ultérieures synthétisent des éléments plus lourds : la quasi-totalité des neutrons se sont retrouvés dans les noyaux d'hélium.

Sans neutrons pour vaincre les répulsions électriques, les protons restants n'ont pu se lier en noyaux d'atomes plus lourds : six protons sur sept subsistent aujourd'hui en tant que



Craig J. Hogan et Laurie Grace

**1. LE TÉLESCOPE KECK (à droite), sur le Mauna Kea, à Hawaii, a recueilli la lumière d'un quasar lointain et l'a focalisée sur le détecteur d'un spectroscopie à haute résolution. Le spectre obtenu (ci-dessus) est zébré de lignes sombres, parce que des nuages de gaz, entre le quasar et la Terre, ont absorbé la lumière à des longueurs d'onde spécifiques. L'analyse de cette absorption révèle la présence de deutérium, un isotope lourd de l'hydrogène.**

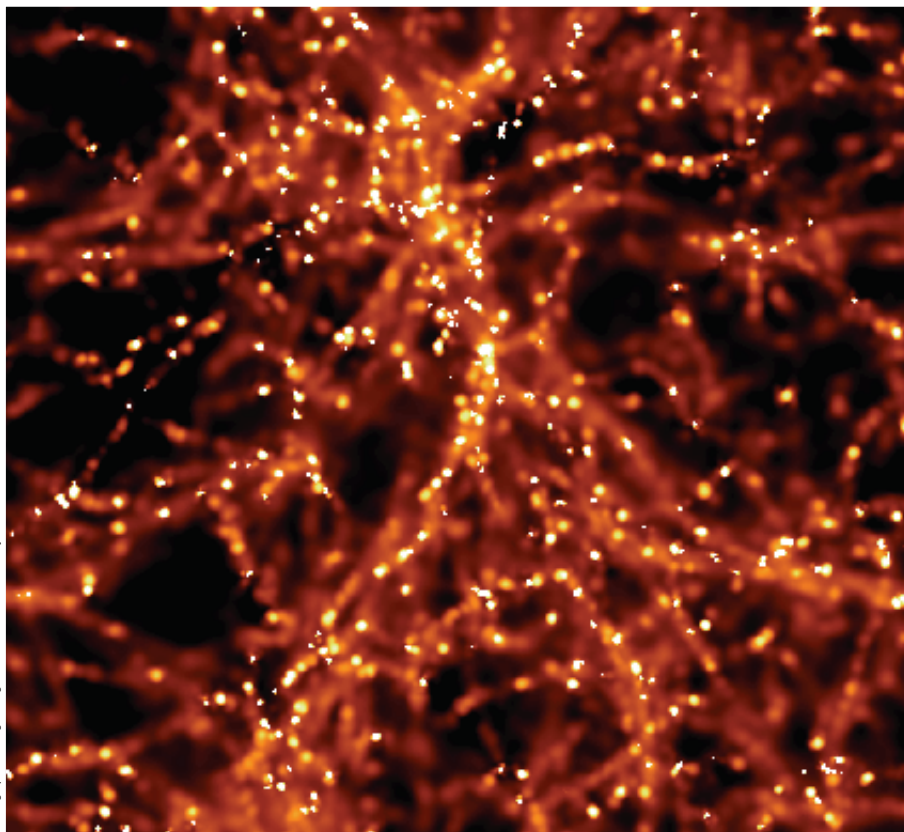


Roger Ressmeyer, Corbis

noyaux d'hydrogène isolés. Le modèle du Big Bang prédit donc que trois quarts de la masse de matière nucléaire de l'Univers se compose d'hydrogène, tandis que le reste est sous forme d'hélium. Cette prédiction s'accorde remarquablement bien avec les observations. L'hydrogène constituant le combustible principal des étoiles de l'Univers, sa prédominance est la cause fondamentale de la lumière des étoiles.

Au cours de la formation des noyaux d'hélium, approximativement un deuton sur 10 000 resta isolé. Une proportion encore inférieure fusionna en noyaux plus lourds que l'hélium, tel le lithium (tous les autres éléments chimiques, comme le carbone et l'oxygène, furent produits plus tard dans les étoiles). Les proportions précises d'hélium, de deutérium et de lithium formés dans cette nucléosynthèse primordiale ne dépendent que d'un paramètre : le rapport entre le nombre de baryons (les protons et les neutrons) et le nombre de photons. La valeur de ce rapport, noté  $\eta$ , reste constante au cours de l'expansion ; comme nous pouvons mesurer le nombre de photons (par l'étude du fond de rayonnement fossile), la valeur de  $\eta$  nous indique la quantité de matière nucléaire de l'Univers. Ce nombre est ainsi la clef de la compréhension de l'évolution cosmique, car nous pouvons le comparer à la quantité de matière observée dans les étoiles et dans le gaz des galaxies, ainsi qu'à la quantité plus grande de matière noire invisible.

Pour que le Big Bang ait produit le mélange observé d'éléments légers, la valeur de  $\eta$  doit être très petite : l'Univers contient moins de un baryon par



Photographie : Craig J. Hogan. Dessin : Alfred T. Kamajian

milliard de photons. La température du rayonnement fossile donne directement le nombre de photons issus du Big Bang ; aujourd'hui, chaque centimètre cube d'espace contient 411 photons. Ainsi, il y aurait un peu moins de 0,4 baryon par mètre cube. Les cosmologistes débattent toutefois de la valeur exacte de  $\eta$ , les estimations variant d'un facteur dix. Le meilleur indicateur de  $\eta$  est la concentration en éléments légers pri-

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 absorbent des rayonnements à des longueurs d'onde caractéristiques. Ces absorptions, mesurables par les télescopes terrestres, révèlent la proportion de deutérium.

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,

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,

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

La présence actuelle de deutérium impose une limite supérieure pour  $\eta$  : 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.

## 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 synthétisent 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  $2 \times 10^{-4}$  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 ( $3 \times 10^{-5}$ , 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  $\eta$ , 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  $\Omega_b$  est le quotient de la densité baryonique par la densité critique. Les paramètres  $\Omega_b$  et  $\eta$  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,  $\eta$  vaut environ  $7 \times 10^{-10}$ , ce qui correspond à un paramètre de densité baryonique  $\Omega_b$  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  $5 \times 10^{-10}$  et  $6 \times 10^{-10}$ , 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  $2 \times 10^{-4}$ , comme l'estime C. Hogan et ses collègues,  $\eta$  est égal à environ  $2 \times 10^{-10}$  et  $\Omega_b$  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.

**P**our 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

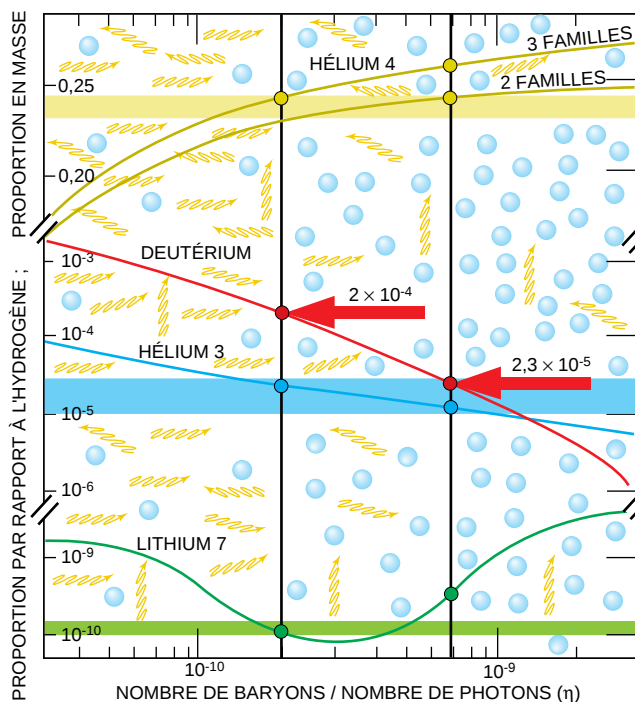
amorcer des réactions thermonucléaires, ou encore dans de grosses planètes comme Jupiter, qui émettent peu de lumière. Les cadavres d'étoiles pourraient aussi constituer cette matière sombre, sous forme de naines blanches, résidus des étoiles de petite masse comme le sera notre Soleil dans cinq milliards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

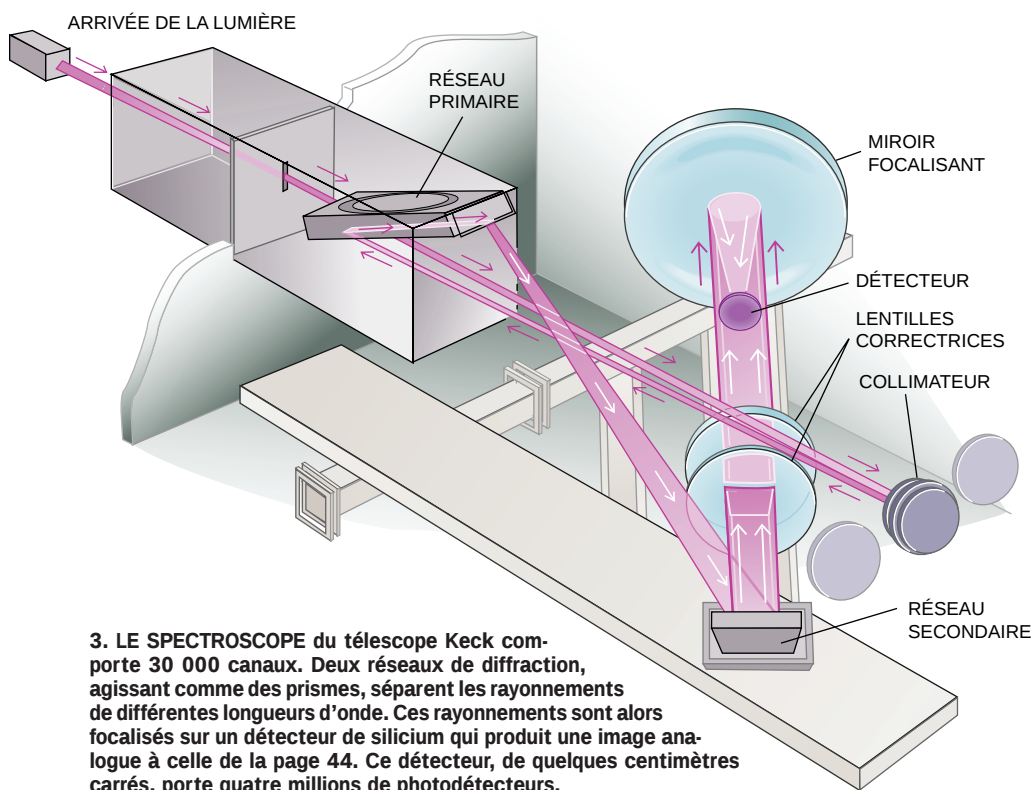
à un Univers hétérogène formé de milliards de galaxies. De tels spectres sont une autre manière de tester le caractère primordial de la matière absorbante : la théorie du Big Bang prédit que tous les nuages de gaz de l'Univers très jeune ont une composition semblable. La mesure de la composition de différents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

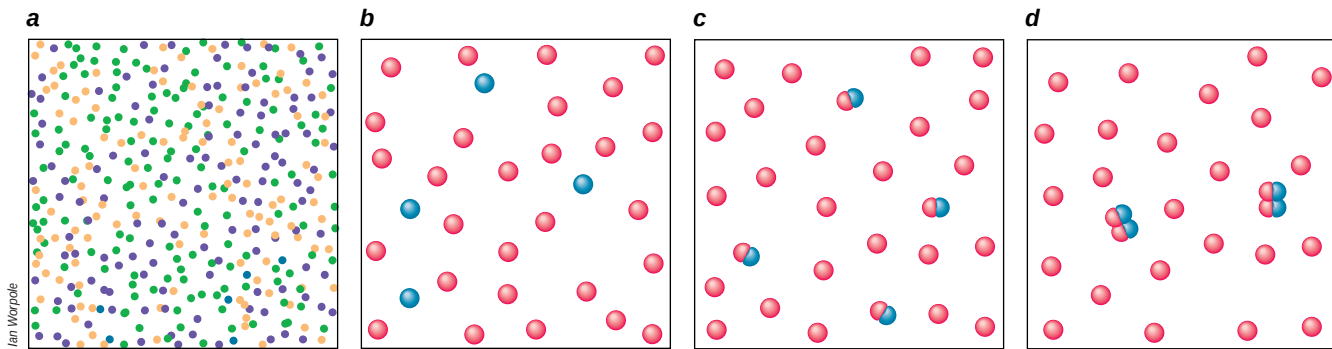
d'une partie pour 4 000, de sorte que toutes les raies sont décalées vers l'extrémité bleue du spectre. Dans les mesures spectrographiques d'un nuage «primordial», essentiellement composé d'hydrogène, le signal provenant de l'absorption par le deutérium est comme un «écho» faible, décalé vers le bleu, 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 NUCLÉOSYNTÈSE**, ou formation des noyaux atomiques, commença quelques instants après le Big Bang, lors du refroidissement de l'Univers : les quarks (a) s'agglutinèrent 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.

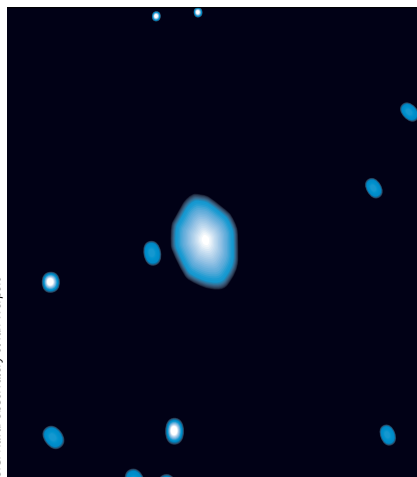
sion de la lumière d'un quasar lointain en 30 000 canaux spectroscopiques laisse très peu d'intensité dans chaque canal. Pendant plus de 20 ans, cette lumière est restée invisible. La technique fonctionne aujourd'hui grâce à des détecteurs améliorés, plus efficaces, au télescope Keck de Hawaï (son miroir 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  $\eta$  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  $\eta$ , 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.

---

# La menace permanente des armes biologiques

LEONARD COLE

*Les États et les terroristes fourbissent aujourd'hui des armes biologiques. Des contrôles plus stricts devront les dissuader de les utiliser.*

**L**e 20 mars 1995, des terroristes tuaient 12 personnes et en blessaient 5 500 en libérant du sarin dans le métro de Tokyo. Cette attaque – dans l'un des pays les plus sûrs du monde! – aurait pu tuer des milliers de personnes si le mélange utilisé avait été plus pur.

Le sarin a été produit pour la première fois en Allemagne, en 1930. Une seule goutte mise au contact de la peau ou inhalée tue une personne en quelques minutes. Comme toutes les substances s'attaquant au système nerveux, le sarin bloque l'action de l'acétylcholinestérase, une enzyme nécessaire à la transmission de l'influx nerveux.

La secte responsable de l'attaque au sarin, Aum Shinrikyo («Vérité suprême»), cherchait aussi à mettre au point des agents biologiques. C'est une perspective effrayante, car, contrairement aux agents chimiques, les bactéries et les virus sont contagieux et se reproduisent.

Certains agents biologiques invalident les victimes, mais d'autres les tuent. Le virus *Ebola*, par exemple, tue jusqu'à 90 pour cent des personnes qu'il infecte en un peu plus d'une semaine : il provoque la dissolution des tissus conjonctifs, ainsi que des hémorragies ; au stade terminal, les victimes infectées sont prises de convulsions, projettent du sang contaminé tout autour d'elles, tandis qu'elles sont prises de convulsions, tremblent et se débattent dans leur agonie.

On ne dispose d'aucun traitement pour soigner une infection par le virus *Ebola*, et l'on connaît mal les mécanismes de contamination : on ignore si

la transmission se fait par contact avec les victimes, avec leur sang, avec leurs fluides corporels ou avec les corps morts, ou même si l'air que l'on respire est lui-même contaminant. Au cours de la dernière épidémie, au Zaïre, les autorités sanitaires ont imposé des mesures d'isolement dans certaines régions, jusqu'à ce que la maladie s'éteigne.

On s'effraie que des individus ou des États envisagent d'utiliser de tels virus comme arme. En octobre 1992, Shoko Asahara, le chef de la secte Aum, est allé au Zaïre avec 40 de ses adeptes. Officiellement ils partaient aider les victimes d'*Ebola*, mais une enquête du Sénat américain a montré qu'ils cherchaient à se procurer des échantillons du virus, pour les cultiver et les utiliser au cours d'attentats biologiques.

Aux États-Unis aussi, des personnes ont tenté de se procurer des organismes dangereux afin de fabriquer des armes. Le 5 mai 1995, six semaines après l'attaque dans le métro de Tokyo, Larry Harris, un laborantin de l'Ohio, commanda à un laboratoire spécialisé la bactérie responsable de la peste bubonique et s'est ainsi procuré trois ampoules de la bactérie *Yersinia pestis*.

L. Harris fut découvert, parce que, quatre jours après avoir passé sa commande, il téléphona pour demander pourquoi il n'avait encore rien reçu.

**1. PENDANT LA GUERRE DU GOLFE, en 1991, des voyageurs ont dû porter des masques à gaz dans l'aéroport de Tel Aviv, en raison des menaces d'armes biologiques et chimiques que faisait peser l'Irak.**



M. Milner, Sygma