

CIEL & ESPACE

SUISSE
LES OBSERVATOIRES
DE HAUTE MONTAGNE

LES ÉTOILES
SUPERGÉANTES
DE LA GALAXIE

LUNETTES :
LA NOUVELLE
GÉNÉRATION

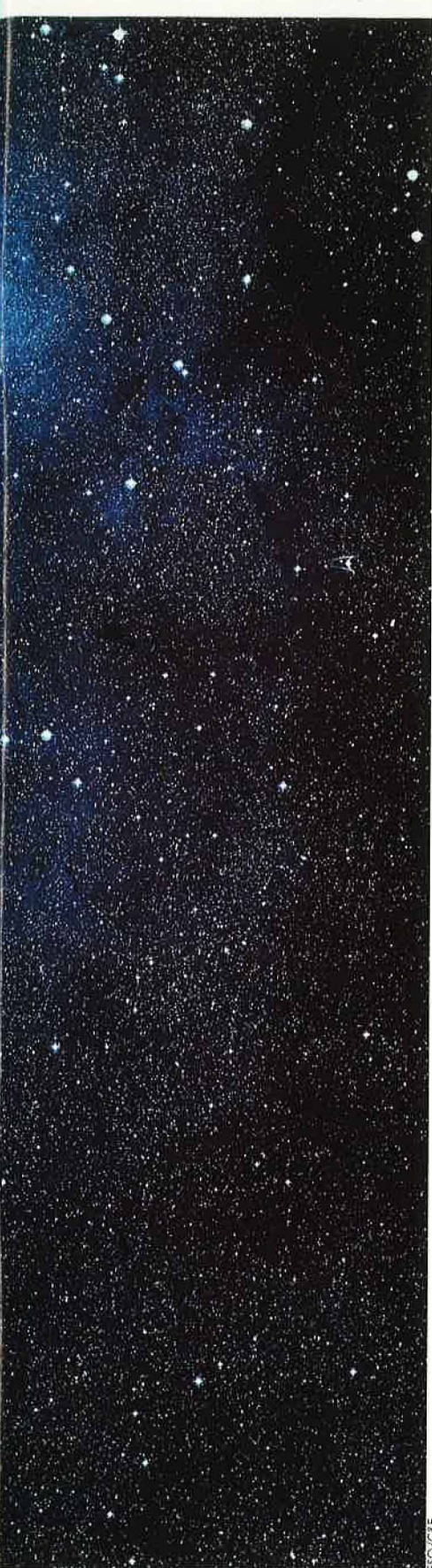
FAUT-IL CROIRE AU BIG BANG ?

DE LA GLACE
SUR MERCURE

QUATRE PROJETS
ASTRONOMIQUES
POUR L'ESA

M 1362 - 279 - 32,00 F





NUCLÉOSYNTHÈSE

L'ALCHIMIE DES

ORIGINES

Que serait le big bang s'il ne prévoyait pas comment a surgi la matière ? Depuis 1948 et les travaux de George Gamow, tout semblait aller de mieux en mieux au royaume de la nucléosynthèse. Et le modèle standard rendait compte des subtiles proportions des éléments emplissant l'Univers. Mais voilà qu'une lézarde apparaît dans ce bel édifice, assez large pour révéler certains défauts de la théorie... Celle-ci ne serait-elle après tout qu'un assemblage trop complexe ?

par Jean-Marc BONNET-BIDAUD
astrophysicien au CEA

HISTORIQUEMENT, l'explication de l'abondance des éléments dans l'Univers, par un processus que les astrophysiciens désignent sous le nom de nucléosynthèse primordiale, a été le tout premier grand succès du big bang. Cette réussite a produit l'avantage décisif dans le combat titanesque que le big bang a dû livrer dans les années 1950 à sa grande théorie rivale, celle de l'Univers stationnaire.

Paradoxalement, cette colonne maîtresse de l'édifice donne aujourd'hui des signes de faiblesse. Après plusieurs décennies de bons et loyaux services, elle menace tout simplement de s'effondrer sous les coups de boutoir d'observations toutes récentes : certaines étoiles fossiles de notre galaxie, pourtant contemporaines de l'Univers à ses débuts, n'ont tout sim-

Comment rendre compte de l'abondance des composants de l'Univers ? Pour certains, elle remonte aux tout premiers instants du big bang, pour d'autres elle s'expliquerait en partie par l'activité des étoiles. Dans ce second cas, la nucléosynthèse n'a rien de primordial et ne constituerait plus une preuve du big bang.

plement pas la proportion d'éléments prévue par le big bang ! Une des preuves de l'explosion originelle est-elle en train de disparaître ? La situation est au moins devenue préoccupante pour l'édifice "big bang" qui semble avoir atteint un état d'équilibre bien précaire. Le diagnostic d'un architecte-cosmologiste renommé de l'université de Princeton, Jeremiah Ostriker, dans l'*Astrophysical Journal* de novembre 1992 est particulièrement sévère à ce sujet : "La théorie canonique de la synthèse des éléments légers dans l'Univers (la nucléosynthèse primordiale) comporte plusieurs points confus et apparemment inconsistants conduisant à un patchwork qui paraît actuellement entièrement ad hoc et n'est accepté que grâce à l'habitude et à notre croyance profonde que le modèle de base est bon."

Alors, crise de croissance du big bang ou vice de construction ? Pour mieux comprendre les difficultés présentes, il faut revenir sur les succès passés.

La notion d'abondances "universelles" des éléments chimiques émerge progressivement dans les années 1930, lorsque dans

leurs explorations d'un nombre de plus en plus grand d'étoiles et de galaxies, les astronomes réalisent que l'Univers contient partout les mêmes éléments chimiques et dans les mêmes proportions : en moyenne 75 % d'hydrogène, 24 % d'hélium et une faible fraction de tous les autres éléments (carbone, azote, etc.) en quantités bien déterminées. D'où cette grande diversité chimique de la matière a-t-elle surgi ? Comment les éléments se sont-ils formés ? Pourquoi dans de telles proportions ? S'agit-il de conditions "initiales" de l'Univers ou d'une lente accumulation produite beaucoup plus tard, par exemple dans les étoiles ? Pendant plus de trente ans, ce sera la valse hésitation entre ces deux hypothèses : "tout primordial" ou "tout stellaire" ?

En fait, la question ne commencera à se poser réellement qu'après la bombe d'Hiroshima. Il faudra en effet les connaissances accumulées par tout le gotha international des physiciens, occupés à Los Alamos (USA) à construire la bombe ato-

que Hans Bethe n'en ait jamais été l'auteur. Une seule hypothèse très simple (mais fautive !) d'un gaz de neutrons chaud et dense au tout début de l'Univers, jointe à la notice de construction du meccano livrée sous le sceau du secret militaire par le physicien Enrico Fermi, et les résultats obtenus sont carrément miraculeux. Les abondances de tous les éléments chimiques dans l'Univers sont approximativement reproduits par les calculs. C'est le grand succès du "tout primordial". Ces résultats, pourtant faux, vont établir la renommée du big bang pour plusieurs années, introduisant l'idée très spectacu-

Ci-contre, l'amas globulaire 47 Toucan présente des centaines de milliers d'étoiles du même âge, environ 10 milliards d'années. Les astronomes y traquent les éléments chimiques lourds. Ci-dessous, l'étoile la plus chaude connue, au centre de NGC 2440, photographiée par le télescope Hubble. Cette naine blanche a une surface portée à 200000 K.



Notes et David Molin-AAO/CCE

"big bang", qu'il voulait dérisoire pour désigner la théorie concurrente ! Il y est démontré de façon magistrale que les étoiles sont en fait responsables de la diversité du cosmos et, indirectement, de la vie. Seule une alchimie complexe de réactions au cœur des astres permet la lente transmutation de l'hydrogène en éléments plus complexes comme le carbone, l'azote, et tous les autres éléments chimiques connus. On en arrivait donc au "tout stellaire".

Restait cependant l'énigme de l'énorme quantité d'hélium de l'Univers. C'est encore l'Anglais Fred Hoyle qui, avec Roger Tayler, jettera les bases de l'explication dans la revue *Nature* en 1964, avec un titre évocateur : *Le mystère de l'abondance cosmique de l'hélium*. Les calculs détaillés furent repris en 1967 et constituent depuis la référence de base de la nucléosynthèse primordiale. La recette n'est pas aussi

mique, pour que l'on puisse comprendre enfin les règles élémentaires du grand meccano cosmique qui permet, à partir de briques élémentaires, les protons et neutrons, de former les noyaux complexes des éléments : l'uranium comporte par exemple 238 briques !

L'article historique sur le sujet paraîtra un 1^{er} avril 1948 ! Pour la beauté du canular, il sera signé Alpher, Bethe et Gamow (pour rappeler alpha, bêta, gamma) bien

laire d'un Univers créé tout entier durant ses trois premières minutes.

Mais les tenants de l'Univers stationnaire ne vont pas en rester là. En octobre 1957, est publié ce qui reste une véritable bible, un article de 100 pages, signé Margaret et Geoffrey Burbidge, William Fowler et Fred Hoyle, ce dernier étant, avec Hermann Bondi, le promoteur de la cosmologie de l'état stationnaire — et l'auteur malgré lui du terme médiatique



simple que celle espérée par Alpher-Bethe-Gamow. Pour faire un Univers avec suffisamment d'hélium et d'éléments les plus légers (lithium, béryllium, bore), que ne peuvent fabriquer les étoiles, il faut chauffer la matière cosmique à quelques milliards de degrés mais pendant un temps relativement court. Pour réaliser cette "cuisson", Hoyle propose une première génération d'étoiles supermassives qui n'auraient vécu qu'un bref instant, mais il reconnaît également que la fournaise initiale du big bang est un creuset quasi idéal.

Ni tout primordial, ni tout stellaire donc mais un Univers créé en deux étapes : dans le big bang, les cinq premiers éléments de la classification de Mendeleïev (hydrogène, hélium, lithium, béryllium, bore) puis, pour le reste, les étoiles !

Afin de pouvoir prédire avec précision la proportion de chaque élément, il faut reve-

nir aux premières étapes. Dans sa forme la plus simple, où le big bang est dit "standard", l'Univers est homogène au départ. Il se dilate d'abord très rapidement puis plus lentement ; sa température et sa densité

Comment rendre compte de l'énorme quantité d'hélium présent dans l'Univers ?

diminuent suivant le rythme de cette expansion que l'on peut suivre sur le cadran du chronomètre cosmique. À $t \sim 10^{-5}$ s, la soupe primordiale est faite de particules élémentaires, les quarks, qui vont se combiner en neutrons et protons (appelé aussi hadrons). À partir de cette transition quarks-hadrons, la matière première des

éléments est déjà là. Il suffira alors que la température s'abaisse suffisamment, qu'elle atteigne un milliard de degrés vers $t \sim 100$ s, pour que protons et neutrons puissent à leur tour se recombiner et former des noyaux plus complexes : le deutérium D (un proton et un neutron), l'hélium ^3He et ^4He (2 protons et 1 ou 2 neutrons), le lithium Li (3 protons et 4 neutrons), etc. Cette synthèse des différents éléments et isotopes sera de courte durée, d'une part parce que la température deviendra bientôt insuffisante pour réunir neutrons et protons, mais également parce que le neutron en liberté est une particule instable qui ne vit qu'environ 600 s. Il faut donc faire vite et, de fait, la création du monde dans le big bang "standard" restera avortée.

Les calculs précis donnent les quantités attendues après les trois premières minutes : pour un milliard de noyaux

GRAND FLASH

d'hydrogène, le big bang produit entre 60 à 100 millions de noyaux d'hélium 4, 1 000 à 1 million de deutérium, dix mille à cent mille d'hélium 3, un à un dixième de lithium et environ un cent-millionième (10^{-8}) de noyaux de béryllium et de bore, et... rien d'autre ! Des prédictions, certes, mais avec de grandes incertitudes car les calculs dépendent fortement de la quantité (ou densité) totale de matière dans l'Univers, la réserve de hadrons du départ, qui reste une des inconnues fondamentales du big bang. Cette même quantité gouverne également tout le futur du big bang, car au-delà d'une certaine densité critique, qui correspond à environ 1 g de matière dans un cube de 100 000 km de côté, il y a suffisamment de matière pour arrêter et inverser l'expansion actuelle, tandis qu'en deçà l'Univers poursuit indéfiniment son expansion.

Depuis 25 ans, tous les efforts ont été déployés pour déterminer ce paramètre crucial grâce aux prédictions de la nucléosynthèse primordiale.

Peut-on vraiment mesurer avec précision les abondances des éléments et en déduire la densité de l'Univers ? Il y a encore quelques mois, la réponse était assurée : les quantités mesurées de l'hélium et surtout du lithium, combinées, semblaient être parfaitement reproduites dans un Univers avec le dixième de la densité critique et donc en perpétuelle expansion.

Aujourd'hui, le vent a tourné et souffle la tempête. Deux découvertes successives ont renversé les certitudes. Tout d'abord quatre Européens, Anglais et Scandinaves ont, depuis l'observatoire de Siding

Flottant parmi les étoiles, les nuées gazeuses expulsées par la supernova des Voiles regorgent d'éléments complexes, créés dans le cœur de l'étoile au moment de l'explosion, à une température dépassant le milliard de degrés.

Spring, en Australie, mesuré pour la première fois, en juin 1992, des traces de béryllium dans plusieurs étoiles très anciennes situées dans le halo de notre galaxie. Puis en décembre 1992, c'était au tour du bore d'être détecté, par des astronomes américains cette fois-ci, grâce au télescope spatial. Pour une étoile au moins, cataloguée HD140283, une des plus brillantes du halo, l'abondance des deux éléments a été enregistrée avec précision : elle est près d'un million de fois plus élevée que ne prédit le big bang ! Un véritable tremblement de terre pour la théorie de l'explosion originelle.

La présence d'une telle quantité de bore et de béryllium dans des étoiles très



vieilles de la Galaxie est une véritable énigme. Les chercheurs avaient en effet pris la précaution de sélectionner soigneusement leurs étoiles en ne prenant, en particulier, que celles contenant une fraction infime de fer, cent à mille fois moins que le Soleil. Le fer étant produit en abondance dans les générations successives d'étoiles, ils s'assuraient ainsi d'être très proches des toutes premières générations, celles formées à partir d'un matériau primordial non contaminé.

Si le big bang "standard" ne peut expliquer ces éléments, d'où peuvent donc provenir tout ce bore et ce béryllium ? Pour éviter de mettre en cause la nucléosynthèse primordiale, certains astrophysiciens

cherchent actuellement à évaluer une possible source de contamination, celle des collisions entre les particules du rayonnement cosmique. Ce rayonnement, improprement désigné, est en fait constitué de noyaux d'atomes, très probablement éjectés lors d'explosion d'étoiles et circulant à grande vitesse dans le milieu interstellaire. Les collisions entre ces particules pourraient suffire à briser les plus gros noyaux (carbone, azote...) en fragments plus petits (bore, béryllium...). Mais ce processus a le désavantage d'exiger un temps assez long pour être efficace et, de plus, produit également du lithium. Or les étoiles observées ont déjà une abondance de lithium considérée comme primordiale !



régions plus denses que d'autres. Or les neutrons, particules neutres, peuvent migrer des régions denses vers les moins denses tandis que les protons, électriquement chargés et piégés par les champs magnétiques, en sont incapables. La proportion neutrons-protons peut donc varier considérablement d'une région à l'autre,

L'édifice théorique, de monument classique, est devenu construction baroque !

chamboulant toutes les règles du meccano cosmique. Les résultats de la nouvelle nucléosynthèse inhomogène, calculés ces deux dernières années, sont révolutionnaires. Non seulement le bore et le béryllium peuvent être produits en quantités mais également une fraction d'éléments plus lourds, carbone, azote..., considérés auparavant comme fabriqués exclusivement au cœur des étoiles. Si tous ces éléments sont maintenant produits aux tout premiers instants de l'Univers, autant que poussières d'étoiles, nous serions donc poussières d'Univers !

Une boucle bouclée et un retour au "tout" primordial des débuts ? Cette diversité apparue dès le début est évidemment une solution élégante à l'énigme de la première génération d'étoiles. Elle a d'ailleurs une autre conséquence importante : la densité moyenne de l'Univers pourrait être maintenant beaucoup plus proche de la densité critique, et... l'avenir beaucoup plus incertain.

Mais le big bang est-il sauvé pour autant et sommes-nous en mesure de considérer que "le modèle de base est bon" ? Certains font remarquer que les nouveaux résultats sont obtenus au prix d'une complexification supplémentaire du big bang et d'une introduction bien peu esthétique d'un nombre grandissant de paramètres inconnus. Il est certain que depuis trente ans, la thèse "créationniste" du big bang, loin de trouver des confirmations éclatantes, a dû plutôt s'aménager, parfois de façon contradictoire, pour s'adapter aux contraintes des observations. L'édifice, de monument classique, a plutôt tourné à la construction baroque. Et si le modèle reste encore une des meilleures explications de l'Univers, il contient également la réminiscence de l'échafaudage complexe des épicycles de Ptolémée, où une théorie inadaptée et de fausses hypothèses réussissaient tant bien que mal à décrire le mouvement des planètes. ■

En quelque sorte, la quadrature du cercle. L'heure semble être venue des grandes remises en question. Surtout que, pour l'instant, les cosmologistes ont eu tendance, assez inélegamment, à pousser la poussière sous le tapis en passant sous silence un des gros points noirs de la nucléosynthèse primordiale. S'il est vrai que le big bang n'a fabriqué que les cinq premiers éléments chimiques, il doit donc exister des étoiles de toute première génération, formées de ces seuls éléments. Or malgré tous les efforts, aucune de ces premières ancêtres n'a pu être découverte parmi toutes les étoiles qui ont un âge comparable à celui de l'Univers. Où est passée cette première génération ?

Devant l'ampleur des difficultés, certains astrophysiciens, parmi lesquels l'Américain William Fowler, un des pionniers des calculs de nucléosynthèse, semblent avoir désormais acquis la certitude que le modèle du big bang, dans sa version standard d'Univers homogène, est finalement incapable de reproduire l'abondance des éléments. Selon eux, l'erreur est à la source même, dans les circonstances de la première phase de la nucléosynthèse, la transition quarks-hadrons, qui fabrique protons et neutrons. Nos connaissances sont sans doute encore insuffisantes pour décrire avec précision cette transition, mais il est fort possible que la soupe de quarks ait produit des grumeaux, des

David Malin/AAO/C&E