

Comment ont été fabriqués les atomes de la matière ? Sommes nous les descendants des étoiles de l'Univers?

Extrait du livre: «Cinq leçons d'astronomie, planètes et satellites», André Brahic, Ed. Vuibert - 2001

La nucléosynthèse primordiale

99 % de la matière de l'Univers est composée d'hydrogène et d'hélium, les atomes les plus simples. L'observation de l'expansion de l'Univers nous permet de comprendre qu'il y a environ 15 milliards d'années, seul un rayonnement dense et chaud existait et que la matière n'est apparue sous sa forme la plus élémentaire que lorsque le rayonnement n'avait plus assez d'énergie pour dissocier les premiers assemblages de quarks. Les premiers noyaux ont été formés quand la température est descendue en dessous de 100 millions de degrés environ une centaine de secondes après le début de l'expansion. À ce moment-là, protons et neutrons se sont associés pour former le deutérium et l'hélium et les éléments les plus légers : hélium 3, hélium 4, lithium 7, béryllium. Les éléments plus lourds ont une énergie moyenne de liaison par nucléon trop faible pour résister aux chocs et au rayonnement. Il s'agit de la première phase de la nucléosynthèse primordiale qui prend fin une trentaine de minutes après le début de l'expansion alors que la température, de l'ordre de 10 millions de degrés, est trop basse pour que l'énergie cinétique des protons leur permette de vaincre la répulsion coulombienne et de constituer des noyaux. Les premiers atomes ont été formés lorsque la température est descendue au-dessous de 4 000 K, environ 300 000 ans après. Les électrons libres et les ions d'hydrogène et d'hélium se sont combinés pour donner des atomes neutres. Jusque-là les électrons étaient à l'état libre et interagissaient librement avec le rayonnement en le diffusant et en maintenant le milieu opaque. À la fin de ce processus, les électrons étaient liés aux noyaux et laissaient filtrer le rayonnement. Un million d'années après le début, le rayonnement s'est découplé de la matière, devenue transparente. La lumière, ainsi émise sous la forme d'un rayonnement thermique de corps noir est devenue, par refroidissement dû à l'expansion, le rayonnement cosmologique à 2,7 K, « la plus ancienne image de l'Univers ». Depuis cette époque la matière a « pris en main » le destin de l'Univers. Au bout d'un milliard d'années environ, les premières grandes structures de l'Univers sont apparues.

Les éléments les plus simples et en premier lieu l'hydrogène ont donc été formés aux premiers instants de l'Univers, au moment où matière et rayonnement se sont découplés. Avant, il faisait trop chaud pour que la matière puisse subsister et ne pas être détruite. Après, il faisait trop froid pour que les protons et les neutrons vainquent la répulsion coulombienne et fusionnent.

Au bout d'environ 10 millions d'années, l'Univers contient essentiellement des atomes d'hydrogène et d'hélium et des molécules d'hydrogène. Pour aller au-delà et former des éléments plus lourds, il faut vaincre la répulsion électrostatique coulombienne, et le refroidissement de l'Univers est si rapide qu'aucun élément plus lourd que l'hélium n'est produit en quantité notable au début de l'Univers. La figure 1.35 montre l'évolution de l'abondance des éléments légers en fonction du temps, au début de l'Univers.

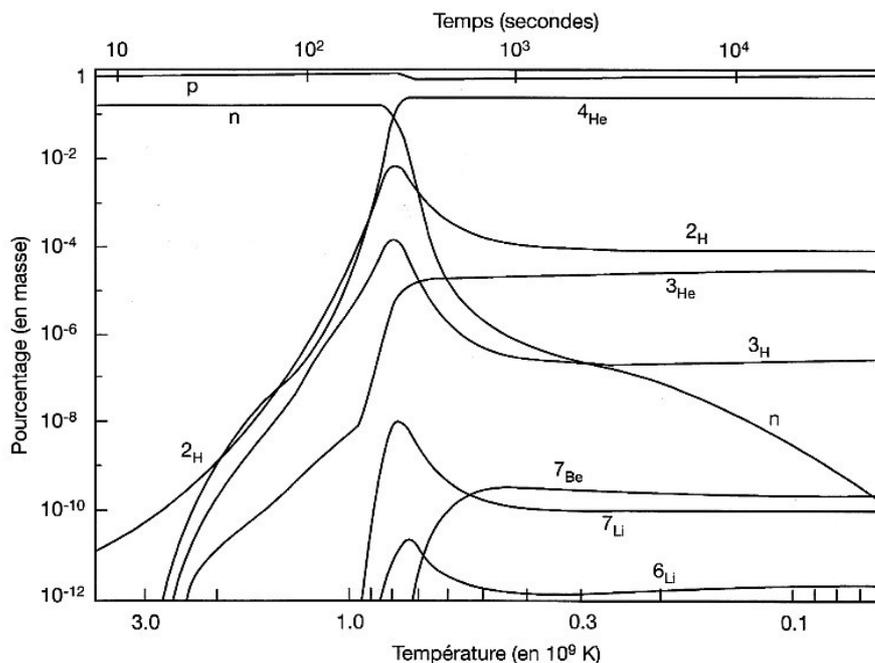


FIGURE 1.35
LA NUCLÉOSYNTHÈSE PRIMORDIALE
L'évolution des éléments légers aux premiers instants de l'Univers.

Une certaine quantité de lithium 7 est produite aux premiers instants de l'Univers mais les éléments compris entre l'hélium et le carbone, c'est-à-dire le lithium, le béryllium et le bore, sont moins stables que leurs voisins. Ils ne sont pratiquement pas synthétisés par réaction de fusion au cœur des étoiles et, de plus, ils sont détruits aux températures élevées qui règnent au cœur des étoiles. Les astronomes ont compris qu'ils étaient créés par des réactions de très grandes énergies ou réactions de spallation dans lesquelles une particule lourde est cassée par une particule de haute énergie. Les protons du rayonnement cosmique galactique frappent les atomes de carbone, d'azote et d'oxygène du milieu interstellaire pour former du lithium, du béryllium et du bore. Ces atomes peuvent aussi être le résultat de la collision de noyaux de carbone, d'azote et d'oxygène du rayonnement cosmique avec des noyaux d'hydrogène.

La nucléosynthèse stellaire et la nucléosynthèse explosive

Si l'évolution nucléaire et chimique de l'Univers s'était arrêtée là, aucun des éléments essentiels à la formation des planètes et de la vie ne serait apparue. Les générations successives d'étoiles et de supernovae ont formé les éléments par nucléosynthèse stellaire et nucléosynthèse explosive dans « les bonnes proportions ». La production d'un énorme flux de neutrons au moment de l'explosion d'une supernova peut conduire à la formation de noyaux au-delà du fer. Alors que les éléments du carbone au fer sont produits très lentement au sein des étoiles, une nucléosynthèse « explosive » a lieu avec l'apparition d'une supernova. Les éléments formés par la nucléosynthèse stellaire et explosive sont dispersés dans le milieu interstellaire avec l'explosion d'une supernova. Au bout du compte, la supernova laisse une nébuleuse autour d'une étoile à neutrons, voire d'un trou noir si le résidu est d'au moins $3 M_{\odot}$ environ. Les étoiles à neutrons étant le plus souvent dotées d'un champ magnétique, qui donne du rayonnement synchrotron, et d'une vitesse de rotation considérables, elles sont de véritables phares cosmiques périodiques que nous pouvons détecter si la Terre est située dans le faisceau de rayonnement de ce phare. On a alors un « pulsar ».

Depuis les premiers instants de l'Univers, la matière est sans cesse recyclée dans les étoiles et le milieu interstellaire, et sans cesse enrichie en éléments de plus en plus lourds. Ce cycle de la matière est schématisé ci-dessous (figure 1.36).

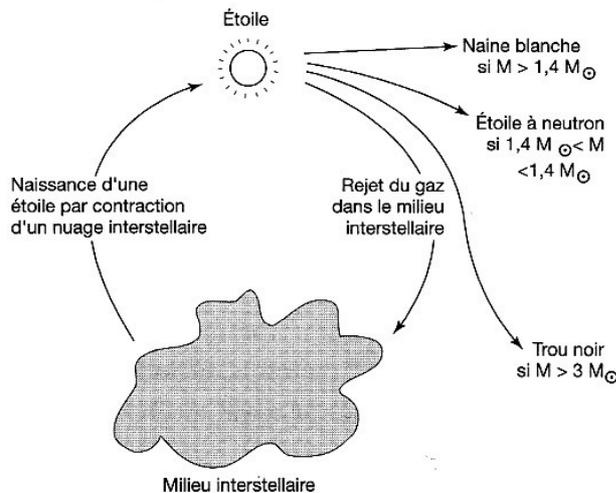


FIGURE 1.36. LE CYCLE DE LA MATIÈRE DANS L'UNIVERS

Les astronomes ont donc compris au cours du xx^e siècle que tous les atomes présents sur Terre et dans l'Univers ont pour l'essentiel été produits par nucléosynthèse primordiale pour les plus légers, puis par nucléosynthèse stellaire jusqu'au fer, puis par nucléosynthèse explosive au-delà du fer. L'étude quantitative des différents processus de production des atomes montre un accord remarquable entre les abondances prédites et les abondances observées par l'analyse du matériau terrestre, lunaire ou météoritique et par l'interprétation des spectres du rayonnement émis par les étoiles et le milieu interstellaire (fig. 1.37).

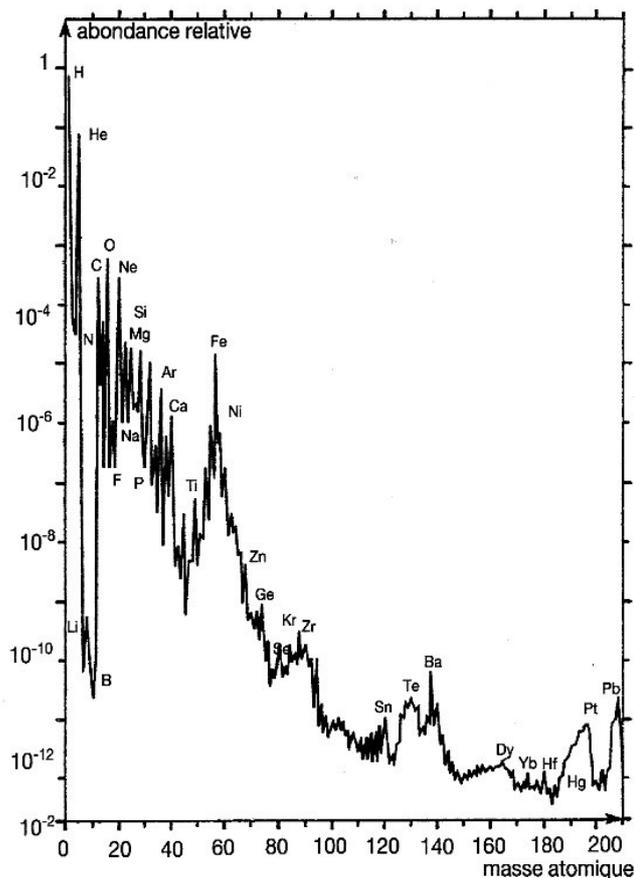


FIGURE 1.37
ABONDANCES UNIVERSELLES
DES ÉLÉMENTS

L'abondance en masse est obtenue en multipliant l'abondance par la masse atomique. Ainsi l'abondance de l'Hélium 4 est de $6,8 \cdot 10^{-2}$ (6,8 %) ce qui donne une abondance en masse de $6,8 \cdot 10^{-2} \times 4 = 2,7 \cdot 10^{-1}$ (27 %).

Abondance relative des éléments en masse	
Éléments	Abondance en masse
Hydrogène H	$7,1 \times 10^{-1}$
D	10^{-4}
Hélium ^4He	$2,7 \times 10^{-1}$
^3He	6×10^{-5}
Li, Be, B	10^{-8}
C, N, O, Ne	2×10^{-2}
Groupe du silicium (sodium à titane)	2×10^{-3}
Groupe du fer	2×10^{-4}
Groupe des éléments (63 à 100)	10^{-6}
Éléments lourds	10^{-7}

L' Univers - Chapitre 5 - TD - Formation des éléments, nucléosynthèse

Questions sur le texte (appelez le professeur régulièrement pour vérifier vos réponses):

A- Nucléosynthèse Primordiale.

1- De quoi est composé 99% de la matière de l'Univers ?

2- À quoi ressemblait l'Univers il y a 15 milliards d'années ?

3 - Écrire 15 milliards en notation scientifique.

4- Au bout de combien de temps après la naissance de l'Univers se sont formés les premiers noyaux atomiques ?

5- Quels furent les premiers éléments à exister dans l'Univers ?

6- Au bout de combien de temps sont apparus les premiers atomes ?

7- Au bout de combien de temps l'Univers est-il devenu transparent ?

8- Au bout de combien de temps sont apparues les premières étoiles et les premières galaxies ?

L' Univers - Chapitre 5 - TD - Formation des éléments, nucléosynthèse

B- Nucléosynthèse Stellaire et Nucléosynthèse explosive.

1- Où sont fabriqués les éléments plus lourds que le lithium ?

2- Quelle est la vitesse (lente ou rapide) de fabrication des éléments du carbone au fer ?

3- Quelle est la vitesse (lente ou rapide) de fabrication des éléments plus lourds que le fer ?

4- Donnez les étapes du cycle de la matière dans l'Univers.

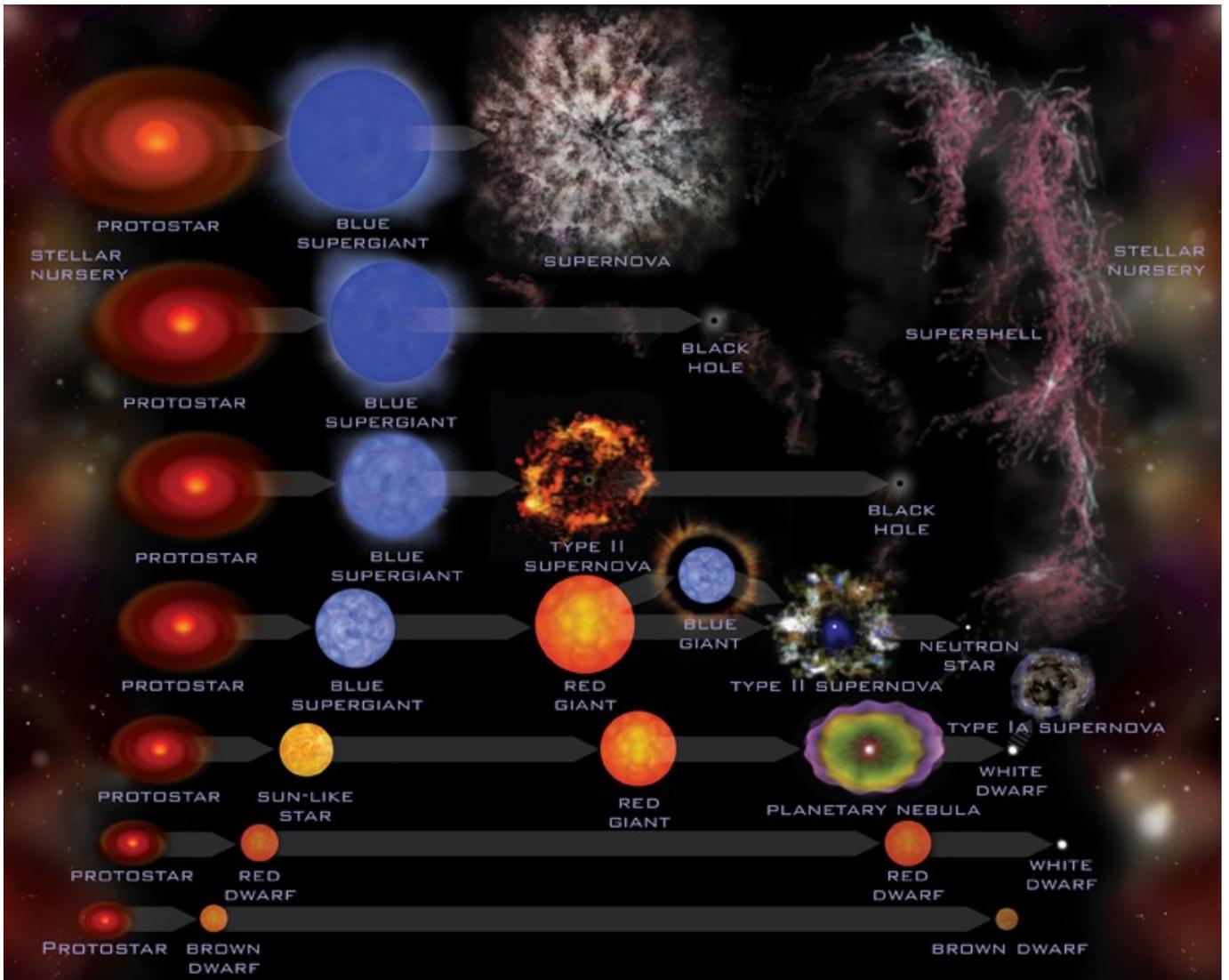
5- Indiquez quelles sont les étapes où on fabrique les éléments du carbone au fer et les éléments plus lourds que le fer.

6- Peut-on dire que nous sommes les « enfants des étoiles » ?

7- Où peut-on trouver la liste complète de tous les types d'éléments existants dans l'Univers ?

étapes de la vie des étoiles.

Illustration : <http://chandra.harvard.edu>



Leur vie commence dans de grands nuages de gaz et de poussières (nursery stellaires).

On y voit des protoétoiles (protostar)

Elles évoluent ensuite, selon leur masse, en étoiles géantes bleues (blue giant) ou en naines brunes (brown dwarf)

Selon leur masse, leur mort est plus ou moins violente : les plus grosses explosent sous forme de supernovæ et peuvent laisser place à un trou noir (black hole).

D'autres expulsent leur atmosphères et deviennent des naines blanches (white dwarf).

La matière ainsi expulsée va servir pour fabriquer de nouvelles générations d'étoiles (stellar nursery)

