

ALCHIMIE COSMIQUE  
LA FORMATION DES ELEMENTS CHIMIQUES DANS L'UNIVERS

Nous autres, êtres humains, sommes faits de molécules complexes dans la composition desquelles le carbone intervient beaucoup. Et ce sont les étoiles, dans les phases avancées de leur évolution, qui fabriquent le carbone. Voilà pourquoi les astronomes vous disent: "nous sommes tous passés par le coeur d'une étoile".

Mais d'où proviennent l'ensemble des éléments chimiques que nous connaissons ? Quelle alchimie leur a donné naissance ? L'observation des étoiles et du gaz interstellaire et l'analyse de leurs spectres, la physique nucléaire qui nous renseigne sur la plus ou moins grande facilité de ces différentes réactions nucléaires, l'observation de l'expansion de l'Univers qui nous permet de bâtir des modèles cosmologiques qui décrivent l'évolution de l'Univers dans ses premières secondes, autant d'outils qui permettent de dresser un tableau assez précis de la situation.

STRUCTURE ATOMIQUE.

Un atome comporte un noyau dense et de petite dimension entouré d'un certain nombre d'électrons animés d'un mouvement rapide. L'électron est une particule légère de charge négative; il existe un électron positif ou positron, identique à l'électron sauf en ce qui concerne sa charge; en présence d'électrons négatifs le positron disparaît rapidement par annihilation. Le noyau est composé de deux sortes de particules plus lourdes, qui sont les protons, dont le nombre est égal à celui des électrons, et les neutrons. Leurs masses sont voisines, le neutron étant un petit peu plus massif que le proton; leur masse commune est égale à environ 1800 fois celle de l'électron. Le proton est chargé positivement avec une charge opposée à celle de l'électron, alors que le neutron n'est pas chargé.

Les atomes correspondant à un même élément chimique sont caractérisés par leur nombre d'électrons, qui est aussi le nombre de protons contenus dans leur noyau, et qu'on appelle le numéro atomique  $Z$ ; le nombre total de nucléons est le nombre de masse  $A$ . Il en résulte que le nombre de neutrons est égal à  $A - Z$ . Deux atomes ayant le même numéro atomique  $Z$  et des nombres de masse différents sont des isotopes. L'atome le plus simple est celui de l'hydrogène, constitué d'un proton et d'un électron. Le deutérium dont le noyau contient un proton et un neutron et le tritium dont le noyau contient un proton et deux neutrons sont des isotopes de l'hydrogène. Le second élément par ordre de simplicité est l'hélium avec deux électrons et un noyau composé de deux protons et de deux neutrons (avec un isotope à un seul neutron). Vient ensuite le lithium avec trois électrons et un noyau composé de 3 protons et 4 neutrons. L'atome le plus complexe qui existe à l'état naturel est celui d'uranium, avec 92 électrons et un nombre égal de protons dans le noyau.

INVENTAIRE.

En première approximation, on peut dire qu'il y a une grande uniformité de composition chimique dans l'univers. Elle s'écarte peu de la composition du Soleil donnée ci-dessous: l'hydrogène et l'hélium sont les éléments les plus abondants; l'ensemble des autres représentent à peine 2% de la masse.

ABONDANCES DES ELEMENTS DANS LE SOLEIL (pourcentage)

H	He	O	Ne	C	N	Si	Mg	S	Fe
72,5	25,9	0,69	0,34	0,22	0,081	0,052	0,043	0,03	0,03

Cependant, si l'on étudie plus en détails les abondances des éléments lourds dans les différentes étoiles, on s'aperçoit qu'elles varient d'une étoile à l'autre; cette variation est liée en général à l'âge: les étoiles qui se sont formées à une époque reculée ont une abondance plus faible en éléments lourds.

Ceci s'explique bien dans le schéma général décrivant la formation des éléments:

- l'hydrogène et l'hélium se sont formés dans les premiers instants qui ont suivi le Big Bang
- les éléments plus lourds (C, N, O, Ne, S, Mg, Fe) se forment dans les coeurs des étoiles, par réactions thermonucléaires de fusion
- les éléments plus lourds que le fer, dont la fusion ne peut se faire qu'avec un apport d'énergie, sont formés par nucléosynthèse explosive dans les étoiles.
- les éléments légers, plus lourds que l'hélium (Li, Be, B) sont formés par réactions de spallation (fractures de certains noyaux du milieu interstellaire où des régions superficielles des étoiles sous l'impact de projectiles de grande énergie du rayonnement cosmique).

On conçoit donc que le milieu interstellaire s'enrichit peu à peu en éléments lourds à mesure que ces éléments synthétisés dans les étoiles lui sont rendus à la faveur de la destruction de ces étoiles. Les atmosphères des étoiles, dans lesquelles il n'y a ni réactions thermonucléaires de fusion ni brassage sont les témoins de la composition chimique du milieu qui les a formées.

#### FORMATION DES ELEMENTS DANS LES PHASES CALMES DE LA VIE DES ETOILES.

Les réactions thermonucléaires de fusion, principalement celle qui transforme les noyaux d'hydrogène en noyaux d'hélium, constituent la source d'énergie des étoiles, parce que la masse du noyau formé est un peu inférieure à la somme des masses des constituants: c'est ce défaut de masse qui se transforme en énergie.

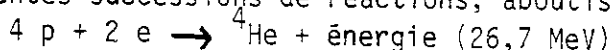
Ces réactions se produisent dans les régions centrales des étoiles, là où la contraction gravitationnelle a élevé suffisamment la température pour permettre aux noyaux chargés positivement de vaincre la barrière coulombienne et de passer suffisamment près les uns des autres pour que l'interaction nucléaire forte, de très courte portée, puisse produire la fusion. La fusion de l'hydrogène en hélium nécessite une température de  $10^7$  K, celle de l'hélium en carbone et oxygène nécessite une température de  $10^8$  K et celle du carbone et de l'oxygène  $10^9$  K.

Une étoile classique, située sur la série principale du diagramme de Hertzsprung-Russell - le Soleil par exemple - tire son énergie de la fusion de l'hydrogène. Cette phase est la plus longue dans la vie d'une étoile, pour les raisons suivantes:

- l'hydrogène est l'élément le plus abondant
- sa fusion libère une grande quantité d'énergie: elle correspond au défaut de masse le plus important de ces différentes réactions de fusion
- les réactions de fusion se produisent à un rythme qui dépend beaucoup de la température. De tous les éléments, l'hydrogène est celui qui fusionne à la plus basse température ( $10^7$  K), car c'est le noyau de plus faible charge (la barrière coulombienne est donc moins élevée). Cette réaction de fusion se produit donc à un rythme plus lent.

#### 1°) Fusion de l'hydrogène:

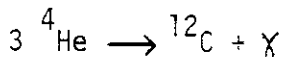
Suivant la valeur de la température, la transformation  $H \rightarrow He$  s'effectue suivant différentes successions de réactions, aboutissant toujours au bilan global:



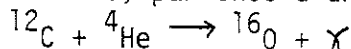
Pour plus de détails sur les différentes réactions possibles du cycle "proton-proton" donnant naissance à la formation d'un noyau d'hélium, on pourra se reporter à l'article de E. Schatzman "Les neutrinos solaires", dans le numéro 22 des Cahiers.

## 2°) Processus ultérieurs de fusion:

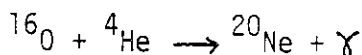
Quand l'étoile a épuisé l'hydrogène de son noyau, elle perd momentanément sa source d'énergie et le noyau se contracte, sous l'effet des forces de gravitation. Si la contraction permet au noyau d'atteindre la température de 100 millions de Kelvins, les réactions de fusion de l'hélium peuvent se produire à leur tour, par exemple par le choc simultané de trois noyaux d'hélium qui se transforment en un noyau de carbone:



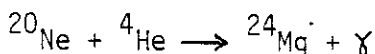
L'oxygène se forme ensuite, par choc d'un noyau d'hélium avec un noyau de carbone:



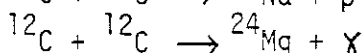
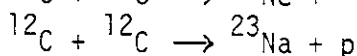
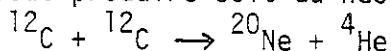
puis le néon:



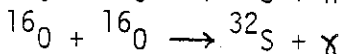
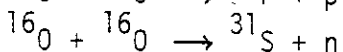
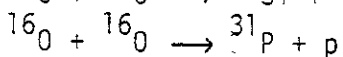
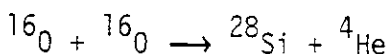
et le magnésium:



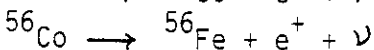
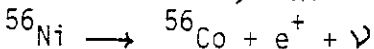
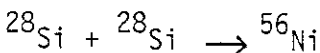
A des températures plus élevées, de 5 à  $8 \times 10^8$  K, le choc de deux noyaux de carbone peut produire soit du néon soit du sodium, soit du magnésium:



Si la température atteint  $1,5 \times 10^9$  K, l'oxygène fusionne à son tour pour former soit du silicium, soit du phosphore, soit du soufre:



Entre 2 et  $4 \times 10^9$  K enfin, le fer peut se former par la série de réactions:



En fait, les éléments de masse atomique supérieure à  $A = 40$  se forment difficilement dans ce type de réactions, car, à la température de quelques milliards de kelvins, les réactions de photodésintégration où le noyau formé est cassé par un photon de grande énergie sont importantes.

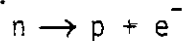
En outre, le fer est l'élément le plus stable: c'est lui qui a l'énergie de liaison maximale. La formation d'éléments plus lourds que lui nécessite donc un apport d'énergie. Ces éléments ont donc une origine différente qui provient de la nucléosynthèse explosive.

## NUCLEOSYNTHESE EXPLOSIVE.

Des éléments lourds peuvent se former par les additions successives de neutrons dans des noyaux déjà formés et transformation ultérieure de ces neutrons

en protons. Ces neutrons sont formés au cours de réactions du type de celles que nous avons décrites précédemment ou lors de l'explosion d'une supernova.

Pour pouvoir pénétrer dans les noyaux et provoquer ces transformations, ils doivent certes avoir de grandes énergies. On distingue cependant parmi eux deux catégories, ceux de plus faible énergie, que l'on dit "lents" ("slow" en anglais) et ceux que l'on dit "rapides", les plus énergétiques. Ces deux familles provoquent des réactions de type différent, que l'on appelle "s" pour la première et "r" pour la seconde. L'origine de la différence provient du résultat de la compétition entre deux processus qui sont d'une part l'addition de neutrons supplémentaires dans le noyau et d'autre part la désintégration  $\beta$  :



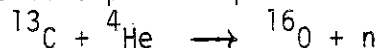
qui peut transformer un neutron en proton avec expulsion d'un électron, quand l'isotope formé est instable.

Si le flux de neutrons est lent (processus s) la désintégration  $\beta$  a le temps de se produire avant qu'un nouveau neutron s'installe dans le noyau. Au contraire, si le flux est rapide (processus r) il peut se former des noyaux beaucoup plus riches en neutrons.

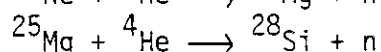
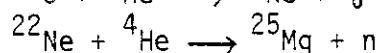
Donnons un exemple: l'isotope  $^{110}\text{Cd}$  du cadmium peut se transformer successivement, par addition de neutrons en 4 isotopes tous stables qui sont:  $^{111}\text{Cd}$ ,  $^{112}\text{Cd}$ ,  $^{113}\text{Cd}$  et  $^{114}\text{Cd}$ . L'isotope suivant,  $^{115}\text{Cd}$ , est instable; avec une période de 54 heures, il se transforme par désintégration  $\beta$  en indium (l'élément qui suit le cadmium dans le tableau de Mendeleiev), soit en  $^{115}\text{In}$ . Si le flux de neutrons est rapide, la désintégration  $\beta$  n'a pas le temps de se produire et l'adjonction d'un nouveau neutron conduit à l'isotope stable  $^{116}\text{Cd}$  du cadmium; si le flux de neutrons est lent, il se forme de l'indium. Typiquement, cet isotope  $^{116}\text{Cd}$  du cadmium ne peut se former que par un processus r. On peut donc classer les éléments et leurs isotopes dans la catégorie "r" ou dans la catégorie "s". De façon générale, les éléments plus lourds que le plomb ne peuvent se former que par un processus "r".

#### Origine des neutrons lents:

Certaines réactions de fusion qui se produisent dans les étoiles de grande masse ayant atteint le stade de géantes libèrent des neutrons d'assez grande énergie, de type "s". Citons par exemple le choc entre l'isotope  $^{13}\text{C}$  du carbone et un noyau d'hélium:



ou encore la succession de réactions:

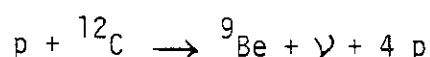


#### Origine des neutrons rapides:

Ces neutrons de très grande énergie ne peuvent se former que dans les explosions de supernovae, où une énergie gigantesque est libérée.

#### PROBLEMES DES ELEMENTS LEGERS: LES REACTIONS DE SPALLATION.

Les éléments légers, lithium, bore et béryllium, ne peuvent pas provenir des étoiles, car ils y sont détruits pour former des éléments plus lourds. Ils n'ont pas pu se former non plus dans les premiers moments de l'Univers, sauf peut-être le lithium. On pense qu'ils sont formés par des réactions de "spallation". Les protons de grande énergie du rayonnement cosmique frappant les atomes du milieu interstellaire ou des régions superficielles des étoiles provoquent la fracture de certains noyaux en plusieurs morceaux. Par exemple:



FORMATION DE L'HYDROGENE ET DE L'HELIUM AU COURS DE L'EXPLOSION PRIMORDIALE

La découverte de l'expansion de l'Univers et du rayonnement thermique cosmologique (rayonnement du fond du ciel isotrope, analogue à celui d'un corps noir à 2,7K) permettent, en remontant le temps, de décrire l'état de l'Univers peu de temps après l'instant initial de l'explosion primordiale où l'Univers avait une densité infinie. A mesure que le temps augmente à partir de cette situation singulière, la température et la densité diminuent. Les particules élémentaires se forment à partir de l'énergie. Les plus lourdes se forment au tout début, car elles nécessitent une grande énergie; les particules plus légères peuvent se former un peu plus longtemps, car elles nécessitent moins d'énergie. Comme les neutrons sont un peu plus massifs que les protons, il s'en forme un nombre un peu plus petit; pour une température de 10 milliards de kelvins, la formation des neutrons et des protons est stoppée, avec un rapport numérique n/p de l'ordre de 0,22. Ultérieurement, protons et neutrons peuvent s'assembler pour former des noyaux de deutérium. Tant que la température est supérieure au milliard de kelvin (c'est à dire pour un âge de l'Univers inférieur à 200 secondes), il ne se produit aucune réaction de fusion à cause des réactions de photodésintégration: les photons sont très énergétiques et détruisent les noyaux dès qu'ils sont formés. Quand la température a suffisamment baissé, les noyaux d'hydrogène, de deutérium et d'hélium qui se sont formés ne permettent pas le démarrage de la chaîne de réactions qui conduit aux autres éléments plus lourds, car la densité n'est plus assez grande pour permettre la formation du carbone par le choc triple de l'hélium.

L. Gouguenheim

PETIT LEXIQUE

On a adopté dans tout le texte les notations suivantes:

proton: p      neutron: n      électron: e<sup>-</sup>      positron: e<sup>+</sup>      neutrino: ν

photon: γ

Un noyau est représenté pour un élément E de numéro atomique Z et de nombre de masse A par le symbole:



Deux isotopes, de nombre de masse A et A+1 sont donc écrits:  $A_E$  et  $A+1_E$

On cite au cours du texte un certain nombre d'éléments et d'isotopes de ces éléments. On rappelle ci-dessous leur constitution

élément		Z	A (isotope classique)	A (autres isotopes)
hydrogène	H	1	1	2 (deutérium) 3 (tritium)
hélium	He	2	4	3
lithium	Li	3	7	
béryllium	Be	4	9	
carbone	C	6	12	13
oxygène	O	8	16	18
néon	Ne	10	20	22
sodium	Na	11	23	
magnésium	Mg	12	24	25
silicium	Si	14	28	
phosphore	P	15	31	
soufre	S	16	32	31
fer	Fe	26	56	
cobalt	Co	27	59	56
nickel	Ni	28	59	56
cadmium	Cd	48	112	110, 111, 113, 114, 115, 116
indium	In	49	115	