

Eléments de cours de Géologie : les illustrations et les commentaires seront examinés pendant les séances de cours

Chapitre 2

NUCLEOSYNTHESE ET EVOLUTION DE L'UNIVERS

I - INTRODUCTION

Selon les cosmologistes, l'Univers est constitué de deux types de matière :

- La matière ordinaire formant étoiles et des galaxies visibles ; elle représente un faible pourcentage de la masse de l'Univers et dont connaît les propriétés physiques,

- La matière noire, invisible qui n'est perceptible que par son influence gravitationnelle sur la matière visible. Elle a été détectée dans le centre de la plupart des galaxies en particuliers les quasars et dans certaines étoiles. Elle représente un grand pourcentage de la masse de l'Univers et elle serait d'une nature différente de la matière ordinaire. Les lois de la physique régissant cette matière demeurent inconnues.

On s'intéresse donc qu'à la matière ordinaire. Celle-ci est issue des éléments chimiques du tableau de *Mendeleïev* (**fig.1**) parmi lesquels l'hydrogène est l'élément le plus abondant (90%) dans l'Univers. Les autres éléments montrent une décroissance progressive de leur abondance en fonction des numéros atomiques croissants. On note cependant que 3 éléments échappent à cette règle : le Lithium, le Béryllium et le Bore qui sont des éléments moins abondants qu'il va falloir expliquer (**fig.2**).

Tous ces éléments, formant la matière ordinaire de l'Univers, résultent de la **nucléosynthèse**. Celle-ci correspond à la formation des noyaux atomiques, à partir des **particules élémentaires de base**, dans les différents sites astrophysiques (**fig.3**). Elle est intimement liée à la physique nucléaire.

Dans ce chapitre on tentera de montrer les différentes étapes conduisant à la formation des éléments chimiques et leur évolution depuis la création de l'Univers jusqu'à l'actuel.

II - NUCLEOSYNTHESE PRIMORDIALE ET NAISSANCE DE L'UNIVERS

1 – Les particules élémentaires de la matière

Jusqu'en 1964, on croyait qu'il n'existait que trois *particules élémentaires* constitutives de l'atome : l'électron, le proton et le neutron. Cependant, de nombreuses particules instables, de durée de vie de l'ordre de 10^{-23} secondes, avaient été détectées soit dans le rayonnement cosmique, soit dans les chocs de haute énergie créés au laboratoire dans les *accélérateurs de particules* (*collisionneurs*). Plus l'énergie de collision est élevée, plus les nouvelles particules créées seront massives en donnant des renseignements sur les constituants ultimes de la matière.

Plusieurs particules élémentaires ont été mises en évidence, à partir desquelles les protons et neutrons (et donc les noyaux atomiques en captant les électrons) seront constitués pour former toute la matière dans sa quasi infinité.

Les constituants de base de la matière sont appelés les **fermions**. L'interaction entre ces particules pour former la matière nécessite :

- d'autres particules porteuses d'énergie ou de "forces" appelées les **bosons**.
- des interactions physico-chimiques fondamentales.

a - Les fermions

Les fermions sont des particules sphériques avec un rayon qui est inférieur à 10^{-19} m (il s'agit d'une échelle inférieure au femtomètre; ce dernier étant qui est égal 10^{-15} m ; soit un milliardième de micromètre).

Les fermions se répartissent en deux groupes les **quarks** et les **leptons**.

a₁ - Les quarks

En 1975 les physiciens ont détectés expérimentalement que protons et neutrons sont eux-mêmes constitués de quarks. On distingue six types de quarks, notés u, d, s, c, b et t. Les deux premiers, plus légers, forment la matière ordinaire. Chacun de ces quarks porte une charge électrique (quark u = $+2/3$ et quark d = $-1/3$) et un nombre quantique de «couleur» : bleu, jaune ou rouge. La taille des quarks est théoriquement ponctuelle, mais en réalité elle est inférieure à 10^{-18} m; soit au moins mille fois plus petite que la taille d'un *nucléon* (proton ou neutron) qui est de l'ordre de 10^{-15} m.

Les quarks sont incapables d'exister seuls. Ils peuvent s'agréger de deux manières différentes en donnant naissance à des particules composites qu'on appelle les **hadrons**. Ces derniers se groupent en deux familles :

- **les baryons** qui sont toujours formés d'un triplet de quarks :
- Les *nucléons* c'est-à-dire les protons et les neutrons qui sont les baryons les plus courants, constitués de quarks légers (u et d),
- Les *particules instables* (particules A) constituées d'autres triplets formés de quarks plus exotiques et plus lourds.
- **les mésons** c'est-à-dire des paires de quark et d'antiquark qui sont des particules très instables.

a₂ - Les leptons

Les leptons sont de deux types :

- **l'électron** e^- , chargé négativement, gravite autour du noyau atomique Z^+ chargé positivement. Sa taille est de l'ordre du femtomètre. L'antiélectron est appelé *positron*.
- **le neutrino** est une particule ayant une charge nulle et il est 50.000 fois plus petit qu'un électron. Sa masse extrêmement faible. Son rôle dans la nucléosynthèse reste une énigme.

Les neutrinos sont abondamment produit par les étoiles dont notre Soleil : à chaque seconde, des centaines de milliards de neutrinos solaires peuvent traverser la Terre et notre corps sans subir le moindre choc ! D'où la difficulté extrême à les détecter...

b - Les bosons

Les forces ne s'exercent entre deux fermions que s'il y a échange d'une particule médiatrice, appelée *boson*. Plus ce dernier sera lourd, plus l'interaction sera de courte portée.

Les principaux bosons sont : le **photon**, les **gluons** et les **bosons W^+ , W^- , Z**. Par exemple, on a mis en évidence que deux quarks porteurs d'une charge de couleur échangent entre eux un gluon.

2. – L'antimatière

La Physique quantique a permis également de mettre en évidence qu'à chaque type particule, existe une **antiparticule** qui lui est opposée et qui est de très courte durée de vie.

Dans la réaction matière antimatière, la conversion est total, le rendement est de 100% : 1 kg d'hydrogène en présence de 1 kg anti-hydrogène dégagerait de l'énergie qui est équivalente à celle d'une centrale géante pendant 10ans de fonctionnement. Pour fabriquer de l'antimatière dans les

accélérateurs de particules, il faut dépenser des milliards de fois plus d'énergie que ce que l'on retient, sans oublier que la quantité de matière fabriquée jusqu'à présent ne suffit même pas à remplir une petite cuillère d'antiatomes.

3. – Les interactions fondamentales

a - La gravitation

La force de gravitation résulte de l'interaction d'un objet massif qui modifie les propriétés de l'espace, en créant autour de lui un champ qui peut être ressenti jusqu'aux distances les plus éloignées. On attribue l'interaction gravitationnelle à l'échange d'une particule encore mystérieuse, appelée *graviton* (qui est un boson, non encore détecté et qui est responsable de l'attraction de l'électron autour du noyau atomique). La gravitation est omniprésente aux niveaux macroscopique et microscopique. Lorsque d'autres interactions peuvent se manifester, la gravitation devient tout à fait négligeable

b - L'électromagnétisme

L'interaction électromagnétique agit sur la charge des particules Elle résulte de la communication des particules chargées qui créent autour d'elles un champ électromagnétique. Ce dernier se propage à la vitesse de la lumière jusqu'à de très grandes distances. La physique quantique décrit cette interaction comme l'échange de *photons* entre particules chargées.

c.- L'interaction nucléaire forte

L'interaction nucléaire forte est responsable de l'union des quarks ensemble en assurant une forte cohésion des nucléons et donc des noyaux des atomes. Elle est très intense, elle n'agit qu'à très faible distance, pas plus loin que le rayon du noyau. Elle est aussi à l'origine des phénomènes de fission et de fusion nucléaires.

d. – L'interaction nucléaire faible

L'interaction nucléaire faible correspond à l'échange de bosons W et Z entre les fermions portant une «charge faible». Elle est beaucoup moins intense que l'électromagnétisme ; sa portée est inférieure à la taille des noyaux. Cette interaction faible est responsable de la radioactivité bêta et grâce à laquelle la matière a vaincu l'antimatière.

3.- Le Big bang

Il y a environ *15 milliards d'années* l'Univers est né dans des circonstances inconnues, car les lois physiques qui régissent notre Univers ne semblent pas pouvoir s'y appliquer. La conception traditionnelle de "Grosse Explosion" dite **big bang**¹ suggère que le cosmos résulte d'un point de densité infinie où toutes les lois connues de l'espace et du temps n'ont pas eu lieu.

Le big bang marque l'instant zéro de l'Univers qui, à son origine, n'a rien en commun avec celui que nous connaissons : la densité de matière et la température sont infinies.

4.- Les événements de la première seconde de la création de l'Univers

Grâce à la physique des particules on a pu reconstituer les premiers événements qui se sont déroulés durant la première seconde suivant le big bang (**fig.4**). L'Univers se trouvait constitué d'un mélange de particules élémentaires qui vont interagir en passant par des étapes successives qu'on peut résumer de la façon suivante :

- 0 à 10^{-43} secondes : domaine de la superforce

- Température de 10^{32} K appelée *température de Planck*.

¹ Terme inventé dans les années 1950 par l'astrophysicien anglais Fred Hoyle pour désigner avec ironie le concept "d'explosion originelle" introduit dans le modèle cosmologique initialement développé dans les années 1920 par l'astrophysicien belge Georges Lemaître et le physicien russe Alexander Friedmann.

- Apparition de paires de particules–antiparticules qui font naître de l'énergie très intense régnant dans tout l'Univers (encore assez petit), et qui disparaissent, en s'annihilant, continuellement, déformant sans arrêt la trame de l'espace-temps.

- Les 4 interactions fondamentales seront mis en jeu ensemble; c'est pourquoi on appelle cette étape : domaine de la **superforce**.

- 10^{-43} à 10^{-35} seconde : séparation des forces

- Température est toujours de 10^{32} K
- L'Univers était toujours animé d'éphémères particules et antiparticules fantômes.
- La superforce se scinde en deux forces : la *gravitation*, et la *force électronucléaire*.
- La gravitation fait donc sécession et quitte le monde quantique.
- La force électronucléaire regroupe *l'interaction forte et l'interaction électrofaible*. Cette force elle est décrite par la théorie dite la de *Grande Unification*

- 10^{-35} à 10^{-12} seconde : de l'inflation à l'expansion

- Température est de 10^{25} °K
- Apparition de quarks et d'antiquarks qui surgissent du vide quantique dans un bain de photons et qui sont en perpétuelle *annihilation - matérialisation*. Un petit excédent de matière va apparaître (1 pour 1 milliard); il sera à l'origine la matière de l'Univers tel que nous le voyons actuellement.
- Le volume de l'Univers augmente d'un facteur 10^{27} alors que dans les 15 milliards d'années suivantes, son volume n'augmentera que d'un facteur 10^9 . Cette étape est dite *période d'inflation*; elle correspond à une grande expansion qui a dépassé la vitesse de la lumière.
- *La force électronucléaire se scinde en interaction forte et en interaction électrofaible*. Avec la gravitation, il existe donc désormais *trois forces* distinctes dans l'Univers.

- 10^{-12} à 10^{-6} seconde : naissance des leptons

- Température = 10^{15} °K.
- L'Univers grossit pour devenir une sphère de 300 millions de kilomètres.
- *L'interaction électrofaible se dissocie à son tour en interaction nucléaire faible et en interaction électromagnétique*. Les 4 interactions fondamentales de l'Univers sont donc différenciées comme elles le sont toujours actuellement.

- 10^{-6} s à 1 seconde : formation de hadrons

- Température = 10^{13} °K.
- Les quarks et les antiquarks s'agglutinent en Baryons et antibaryons qui s'annihilent. Un résidu de baryons de 10^{-9} demeure pour former la matière visible.
- Le volume de l'Univers est équivalent au système solaire actuel, soit 10^{13} m.
- La baisse de température fait que les quarks n'ont plus assez d'énergie pour exister seuls. L'interaction forte peut alors les grouper en *hadrons*.
- La fin de cette période marque aussi la *disparition des antiquarks*. Les éléments de base de la matière sont désormais au grand complet, mais la température est toujours trop élevée pour que les atomes puissent se former. L'Univers est une grosse masse lumineuse de plasma brûlant formé de hadrons et de leptons célibataires. Les neutrinos cessent d'interagir avec la matière et s'en séparent.

5. - La nucléosynthèse primordiale = formation de noyaux atomiques

Une seconde à 3 minutes après le Big Bang :

- La température chute à 10^6 °K elle est suffisamment basse pour que les protons et neutrons puissent s'assembler durablement.
- Les protons seuls forment des *noyaux d'hydrogène*. Les protons et neutrons qui se rencontrent, peuvent aussi s'assembler pour former des *noyaux d'hélium* (2 protons + 2 neutrons). Cette phase se nomme la *nucléosynthèse primordiale*. La matière de l'Univers se compose alors des noyaux d'atomes suivants : 75% d'hydrogène H et 25% d'hélium He.
- des traces de Li-7 (lithium à 3 protons et 4 neutrons) et d'isotopes tels que Deutérium (H-2), He-3, He-4...
- les *électrons sont toujours libres* car ils sont encore très énergétiques. Ils ne se lient donc pas encore aux noyaux pour former les atomes H (hydrogène) et He (hélium).

6. – La transparence de l'Univers (3 minutes à 300 000 ans)

Cette époque est caractérisée par une chute de la température (10^4 °K) due à la dilution de l'Univers par expansion. Il en résulte un calme relatif des forces nucléaires qui permettent à la matière de se stabiliser.

Les forces gravitationnelles créent des différences de densités qui s'amplifient et attirent ainsi davantage de matière. L'Univers s'organise peu à peu en régions denses noyées dans le vide cosmique.

La chute de température et de densité de l'Univers permet aux photons de cesser d'interagir avec la matière : ils vont pouvoir enfin traverser l'Univers sans obstacle : il y a *découplage* entre les photons et la matière. Celle-ci étant constituée essentiellement d'atomes d'hydrogène et d'hélium (en faible proportion).

Pendant cette époque l'Univers devient donc subitement transparent et la lumière libérée et provenant de tout point de l'espace a été actuellement captée par les astrophysiciens : c'est le "*rayonnement fossile*" de l'Univers, vestige du big bang.

III.- LA NUCLEOSYNTHESES STELLAIRE

Lorsque l'Univers était âgé d'environ 300 000 ans, des fluctuations minimes de température associées à celle de la densité apparaissent. Ces fluctuations font apparaître des zones plus denses qui attirent alors la matière environnante du fait de leur plus grande attraction gravitationnelle. La matière va donc se comprimer dans ces zones qui deviennent de plus en plus denses en s'échauffant formant ainsi des étoiles. Celle-ci étant une boule de gaz, surtout de l'hydrogène (90% des atomes) et de l'hélium (9% environ). La température y est suffisamment élevée pour que des réactions nucléaires successives puissent se déclencher en plusieurs étapes successives (**fig.5**) :

- Pendant la plus grande partie de sa vie, l'étoile se contente de convertir à un rythme régulier de l'hydrogène en hélium dans son cœur en libérant de l'énergie.
- Quand l'hydrogène s'épuise au centre de l'étoile, celle-ci réajuste sa structure pour compenser l'arrêt de cette production d'énergie: le coeur se contracte et se réchauffe assez pour que l'hélium puisse à son tour "brûler" en donnant du carbone avec libération d'énergie. A ce stade l'étoile va acquérir une structure en couches concentriques. Pour évacuer toute cette énergie, l'enveloppe de l'étoile se dilate considérablement : l'étoile devient alors une "géante rouge", beaucoup plus lumineuse qu'avant mais plus froide en surface.
- Quand l'hélium s'épuise au centre l'étoile massive, celle-ci réajuste à nouveau sa structure, permettant la combustion du carbone dans la région centrale. Autour de ce coeur, on trouve une zone où l'hélium fusionne en carbone, puis une autre où l'hydrogène fusionne en hélium, puis enfin une zone trop froide où l'hydrogène reste inerte.
- Le même scénario peut se reproduire jusqu'à ce que l'étoile aboutisse à une structure complexe en couches concentriques, avec un coeur où se fait la synthèse du fer (très stable), entouré de couches

successives d'éléments de plus en plus légers (silicium, oxygène, néon, carbone, hélium) jusqu'à une enveloppe extérieure d'hydrogène.

Ces différentes étapes sont d'ailleurs de plus en plus brèves; les centaines de millions d'années de la fusion de l'hydrogène deviennent des centaines de milliers d'années pour la fusion de l'hélium, des années pour celle du carbone, des jours pour celle du néon, et les dernières étapes ne prennent plus que quelques minutes.

Les étoiles légères comme le Soleil ne peuvent pas atteindre des températures suffisantes pour permettre la fusion du carbone. Quand elle perd toute source d'énergie nucléaire, il ne lui reste plus qu'à se contracter sous l'effet de la gravitation, en devenant plus chaude et plus dense et en se transformant en une naine blanche. Celle-ci ne peut plus que se refroidir régulièrement, ce qui peut durer quelques milliards d'années.

VI - LA NUCLOSINTHESE EXPLOSIVE ET REACTION DE SPALLATION

Les étoiles massives continuent de grossir et de synthétiser des éléments de plus en plus lourds à cause de l'élévation de la température (5 milliards °K). A un moment donné l'énergie thermique dépassera l'énergie de liaison des nucléons. Il en résulte une explosion : c'est la supernova.

La matière qui est projetée dans l'espace lors de l'explosion est soumise à un très important flux de neutrons qui s'échappe de l'étoile à neutrons. Les noyaux les plus lourds de la nature (jusqu'à l'uranium) sont ainsi formés par capture rapide de neutrons par les noyaux issus de différentes phases de combustion de l'étoile dans les couches externes de la supernova qui explose. C'est le phénomène de *nucléosynthèse explosive*. Par exemple, les études ont permis de comprendre la production de l'or dans l'Univers par une succession de captures de neutrons et de désintégrations.

La formation de certains noyaux moins légers tels que le lithium (Li), le béryllium (Be) et le bore (B) s'explique par des *réactions de spallation*. Ces derniers se caractérisent par l'action du rayonnement cosmique (flux de particule à haute énergie présent dans l'espace) qui fait éclater les noyaux atomiques lourds (carbone, azote, etc.) présents dans le milieu stellaire en produisant ces trois éléments. C'est ce qui explique leur rareté dans l'Univers.

V - LA PHASE INTERSTELLAIRE

Le milieu interstellaire est composé de restes de supernovas et de nébuleuses planétaires. C'est un milieu froid de quelques dizaines de degrés, favorable aux réactions nucléaires électromagnétiques. Il en résulte la formation d'atomes à partir des noyaux et la combinaison de l'hydrogène avec les éléments lourds pour former des molécules complexes parmi lesquelles on distingue l'eau, l'ammoniac et des molécules organiques. Ces dernières se présentent sous forme de pellicules de glace sur la poussière et elles ont la possibilité de se recombiner grâce au rayonnement cosmique.

VI - LA PHASE PLANETAIRE

La présence de molécules complexes dans le milieu interstellaire favorise la formation de planètes. L'évolution moléculaire se poursuit à la suite d'une condensation de la poussière interstellaire en noyaux de plus en plus gros en absorbant les petits. Ces noyaux finissent par réaliser les conditions pour la synthèse de nouvelles molécules pour donner naissance à des planètes. Pour cela, il faut que cette poussière se trouve dans une zone ayant une température modérée, qu'elle retienne du gaz en formant une atmosphère, permettant une protection contre le rayonnement cosmique et ultraviolets et qu'elle soit alimentée en énergie à partir des étoiles. Cette phase planétaire sera examinée en détail dans le chapitre 3.