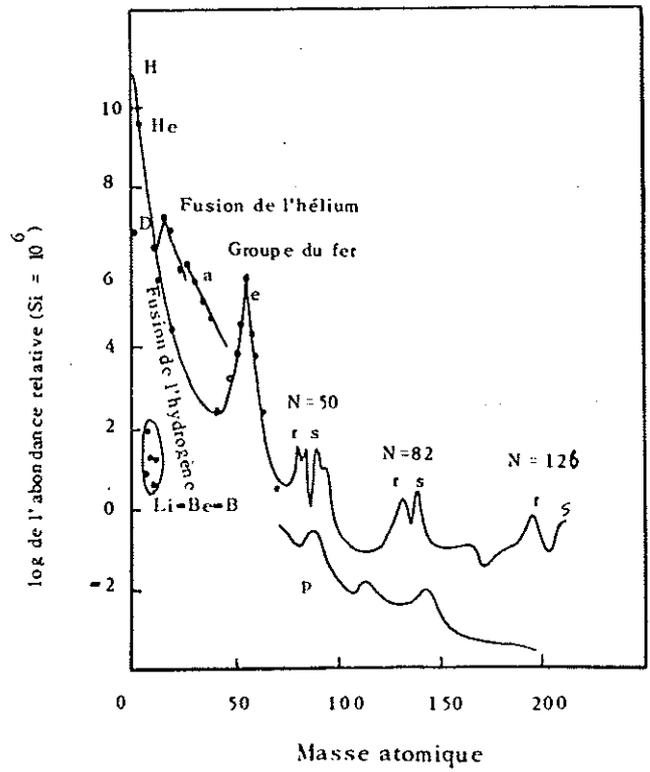


ABONDANCE DES ELEMENTS - NUCLEOSYNTHESE

I.- ABONDANCES OBSERVEES

Au voisinage solaire, on dispose à la fois des mesures spectrométriques du rayonnement solaire et de l'étude chimique des météorites. Plus loin dans la galaxie, et dans les galaxies extérieures, l'étude des abondances est uniquement spectroscopique.

Dans une certaine variété de météorites (les chondrites carbonées) la composition en éléments réfractaires est très semblable à celle du soleil (bien sûr les éléments volatils ont disparu). Ainsi on peut définir une distribution cosmique "standard" des éléments et étudier ensuite les quelques variations et exceptions selon les lieux de la galaxie.



Courbe d'abondance "cosmique" des éléments.

Les caractéristiques principales de cette courbe sont :

- décroissance très rapide des abondances à partir de l'hydrogène (90%) et de l'hélium (10% en nombre). La chute est très rapide jusqu'à un minimum correspondant aux éléments = scandium, vanadium, titane. Deux groupes d'éléments sont toutefois plus abondants que la moyenne : d'abord le carbone, l'azote et l'oxygène, puis le néon, magnésium, silicium. Le groupe des éléments légers lithium - béryllium - bore est particulièrement sous-abondant par rapport aux éléments du voisinage :

$$\frac{N(\text{Li Be B})}{N(\text{C N O})} \sim 10^{-5} \text{ à la surface du soleil.}$$

De plus, les abondances des éléments ayant un noyau de masse paire sont généralement plus élevées que celles des éléments de noyau de masse impaire.

- Autour du Fer, on constate une remontée des abondances, le maximum correspondant au fer lui-même : ce groupe est donc appelé le pic du fer.

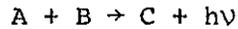
- Après le pic du fer, la décroissance des abondances est bien plus lente. Il existe aussi des maxima correspondant aux nombres magiques pour les neutrons (50, 82, 126).

D'autre part, il existe des éléments appelés éléments p, sous-abondants d'un facteur 100 à 10^3 , et qui sont plutôt enrichis en protons.

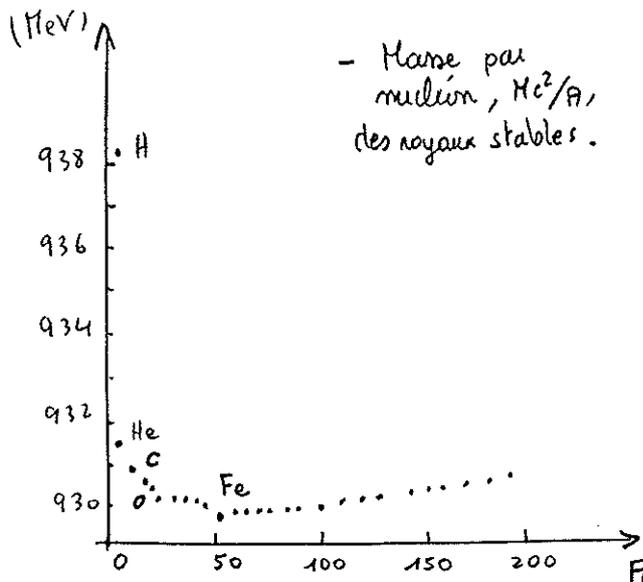
Toutes ces caractéristiques peuvent être expliquées par les différents processus de formation.

(1) Les éléments légers $A < 40$:

La décroissance rapide de l'abondance des éléments dans cette partie de la courbe s'explique bien par le mécanisme des réactions de fusion :



Pour les éléments légers, l'élément C ainsi formé a un défaut de masse par nucléon supérieur à ceux des éléments A et B. (l'élément le plus stable à ce point de vue, celui dont le défaut de masse est le plus fort est le ${}_{26}^{56}\text{Fe}$).



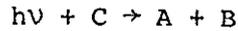
Ces réactions de fusion sont donc exoénergétiques, mais ne se produisent qu'à haute température pour vaincre la barrière de potentiel que constitue la répulsion coulombienne des noyaux chargés positivement.

Or, cette barrière est d'autant plus élevée que la masse de A et B augmente. Les réactions de fusion correspondantes se produisent à des températures

de plus en plus grandes, qui ne sont atteintes que dans des régions de moins en moins étendues au coeur de l'étoile. Les éléments formés sont donc de moins en moins abondants.

(2) Les éléments autour du fer :

Ces éléments correspondent à la stabilité maximale vis-à-vis des réactions nucléaires. A haute température, les réactions de photo-désintégration, inverses des réactions de fusion :



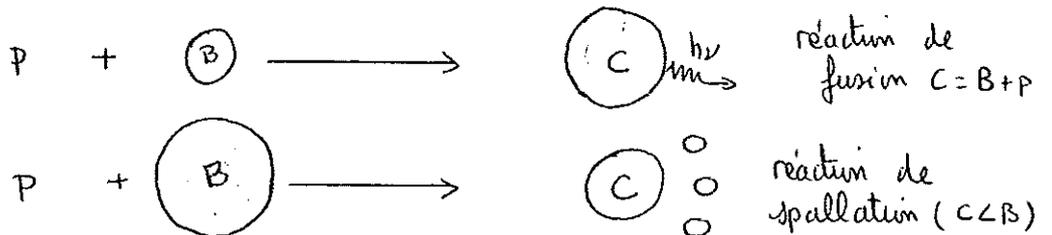
commencent à être favorisées (nombre de photons $\propto T^4$).

La série d'équilibres entre réactions de fusion et photodésintégration favorise les noyaux les plus stables, autour du fer.

Les réactions de fusion de l'hélium et du carbone produisent des maxima locaux par rapport à la courbe moyenne correspondant à la prolongation de la fusion de l'hydrogène.

(3) L'exception Li, Be, B :

Ces noyaux sont particulièrement peu stables et sont détruits par les réactions de fusion dans les étoiles. L'abondance d'équilibre entre réactions de formation et destruction est bien inférieure à l'abondance observée. Ces noyaux sont donc formés par un processus différent : ce sont les réactions de spallation, dans lesquelles un proton de grande énergie, par collision avec un noyau lourd (C, N, O), le casse en morceaux.



Ces réactions sont endothermiques (il faut casser le noyau le plus lourd) et l'énergie nécessaire est de l'ordre de 10 Mev. Cette énergie n'est disponible qu'avec les rayons cosmiques (jusqu'à 10^{14} Mev !). Les

éléments lithium, béryllium, bore se forment alors par interaction entre les rayons cosmiques et les atomes lourds du milieu interstellaire. Le rayonnement cosmique a d'ailleurs une teneur en éléments légers $\frac{N(\text{Li Be B})}{N(\text{C N O})} = 0,23 (4 \cdot 10^4 \text{ fois plus que l'abondance normale})$.

(4) Les éléments lourds $A > 70$:

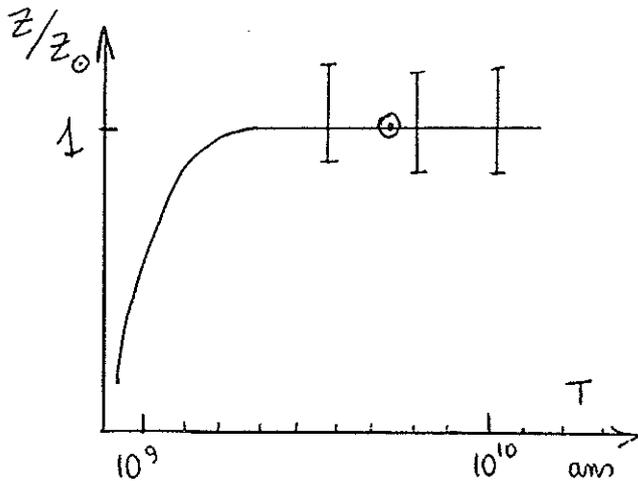
Nous avons vu que les réactions de fusion ne peuvent se produire que jusqu'au fer. D'autre part, lorsque la masse des noyaux augmente, les barrières coulombiennes deviennent très hautes : c'est pourquoi l'on pense que ces éléments sont formés par accréation de neutrons (dont la neutralité empêche la formation de barrière). Beaucoup de réactions de fusion dans les étoiles produisent des neutrons, de même dans certaines phases explosives (supernovae) le flux de neutrons peut être intense.

Cette absorption de neutrons de proche en proche, favorise la formation des noyaux lourds les plus stables, ceux dont la couche externe de neutrons est complète (ils n'ont plus alors tendance à en absorber), d'où les nombres magiques. Parmi les processus de capture des neutrons on distingue le processus s lent (slow) et r rapide (cf. plus loin).

En ce qui concerne les éléments p, riches en protons, ils sont probablement formés à partir d'éléments lourds ayant capturé des neutrons, par transformation secondaire de neutron en proton (éjection d'un électron ou capture d'un positron).

(5) Variations et tendances par rapport aux abondances
"standard" :

- Puisque les éléments lourds sont synthétisés peu à peu dans les étoiles, on s'attend à ce que leur abondance soit fonction de l'âge des étoiles ou de la population concernée et de la position dans la galaxie. L'hélium, dont l'abondance est en majeure partie primordiale, ne varie que très peu avec les régions ($n(\text{He})/n(\text{H}) \sim 0.10$ partout et augmente légèrement vers le centre galactique).



Les étoiles des amas globulaires sont les plus pauvres en métaux, et la variation de Z en fonction de l'âge des étoiles est assez prononcée (cf. figure). Il existe aussi des gradients d'abondance d'éléments lourds vers le centre de la galaxie (également dans

les galaxies M101, M33...)

- D'autre part, il existe des types d'étoiles particulières, dont les abondances sont "anormales" : étoiles carbonées (abondantes en C, N, O), étoiles de type A à surface chaude, possédant de forts champs magnétiques et une surabondance en éléments lourds, novae enrichies en O et N, etc...

II.- NUCLEOSYNTHESE - REACTIONS NUCLEAIRES :

Lorsque la température s'élève jusqu'à 10^7 K au centre d'une étoile, les réactions de fusion entre éléments légers peuvent commencer.

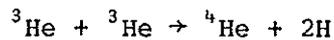
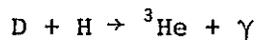
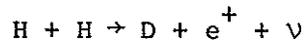
La fusion de l'hydrogène, qui peut s'écrire globalement



s'exécute pratiquement selon deux processus principaux :

- le cycle de réactions proton-proton ou PP
- le cycle du carbone, ou cycle CNO.

(1) Réactions directes - Cycle PPl :



(γ symbolise le photon gamma, ν est le neutrino électronique).

- Notons ici que si le bilan énergétique de ce cycle est de produire 26.7 Mev, une certaine fraction échappe de l'étoile avec les deux neutrinos produits (2% du total). En effet, les neutrinos ont une section efficace si faible (10^{-43} cm^2) qu'ils quittent l'étoile sans interagir avec la matière.

- La première réaction, qui doit se produire en deux fois dans le cycle, est assez lente ; c'est, en fait, une interaction faible (transformation d'un proton en neutron). La destruction de l'hydrogène par cette réaction, qui s'écrit $d\text{H}/dt = -\text{H}/\tau_{pp}$, correspond, pour des conditions physiques typiques du centre du soleil ($T = 1.5 \cdot 10^7 \text{ K}$, $\rho = 100 \text{ g/cm}^{-3}$), à $\tau_{pp} = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ ans}$!

Les autres se produisent alors pratiquement immédiatement (temps respectifs 6 sec et 10^6 ans).

- L'abondance du deutérium à l'équilibre pour ce cycle de réactions peut être calculée :

$$\frac{d\text{D}}{dt} = \lambda_{pp} \frac{\text{H}^2}{2} - \lambda_{\text{PD}} \text{HD}$$

ce qui donne $D/H = 2.8 \cdot 10^{-18}$ (pour $T = 1.5 \cdot 10^7$ K), alors que l'abondance observée est de l'ordre de $D/H \sim 2 \cdot 10^{-5}$. On constate que le deutérium est plutôt détruit par les réactions de fusion dans les étoiles.

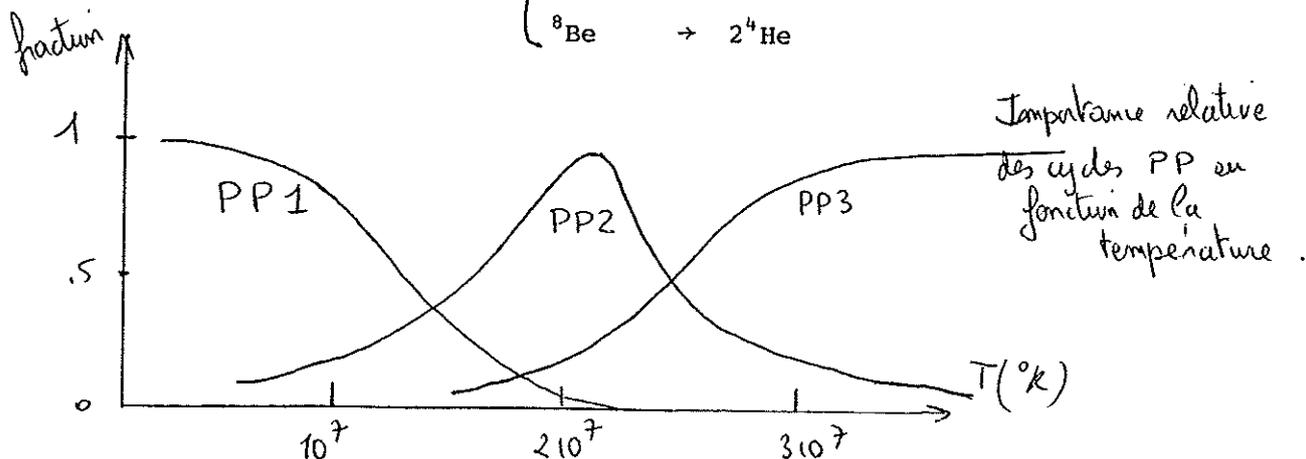
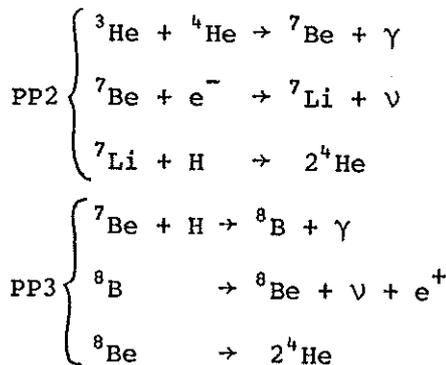
- Le taux de production d'énergie de ce cycle peut être représenté, avec une bonne approximation, par :

$$\epsilon_{pp} = A_{pp} \rho X^2 T^n$$

où X est l'abondance relative en masse de l'hydrogène, ρ la densité, et n et A_{pp} des constantes dépendant légèrement du domaine de températures considéré.

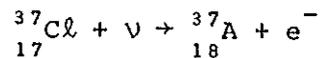
(2) Les cycles PP2 et PP3 :

Lorsque l'hélium devient assez abondant au centre de l'étoile et que la température monte au-dessus de $1.3 \cdot 10^7$ K, l'hélium peut servir de catalyseur à la fusion de l'hydrogène. Les deux cycles suivants sont possibles :



Ces cycles dépendent fortement de la température, ils devraient permettre de déterminer la température interne du soleil. En effet, dans le cycle PP3, le neutrino émis est très énergétique : 7.2 Mev (alors que $E \leq 1$ Mev dans les autres cas) et peut alors être détecté.

Rappelons que les neutrinos sont détectés grâce aux réactions faibles, du type :



La section efficace de ces réactions est très petite, $\sim 10^{-40} \text{ cm}^{-2}$, mais croît comme le carré de l'énergie des neutrinos.

Détaillons un peu l'expérience, car c'est la seule qui nous permette de tester les théories de structure interne, directement : R. Davis, du Laboratoire National de Brookhaven, dans les années 70, rassembla, dans une mine désaffectée du Dakota du Sud, 400 000 litres de C_2Cl_4 . Un quart des atomes de chlore sont des isotopes ${}^{37}\text{Cl}$ (l'atome le plus abondant est ${}^{35}\text{Cl}$) et l'on attend environ une réaction par jour. A chaque interaction $\nu + {}^{37}\text{Cl}$, un atome d'argon radioactif est formé ; on mesure le nombre total d'atomes d'argon ainsi produits, en purgeant le liquide avec de l'hélium gazeux. Le détecteur est situé à 1500 m sous terre, pour éviter les réactions avec les rayons cosmiques. De plus, l'ensemble du détecteur est placé dans un bassin rempli d'eau, qui arrête les neutrons.

Le résultat fut très surprenant. Si l'on mesure le flux de neutrinos solaires dans l'unité standard de neutrinos SNU (qui correspond à 10^{-36} capture par seconde et par atome de Cl), on devrait pouvoir détecter 35 SNU, toutes réactions nucléaires comprises

(cycles PP, cycle du carbone). Or le résultat des mesures en 1980 n'était que de $1,6 \pm 0,1$ SNU. En raffinant les calculs à l'extrême, on estime aujourd'hui que l'on ne peut descendre au-dessous de 7 SNU théoriques, sans modifier sensiblement nos idées sur la structure interne du soleil.

Plusieurs hypothèses peuvent être avancées pour résoudre le problème. Par exemple, les neutrinos auraient une masse finie et il existerait trois types de neutrinos (neutrinos e , μ et τ). Les particules ν pourraient alors osciller d'un type à l'autre. Le détecteur de Brookhaven n'étant sensible qu'aux neutrinos e , ne détecterait en fait que le tiers du flux solaire total.

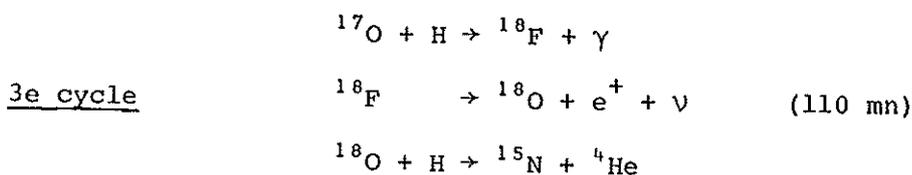
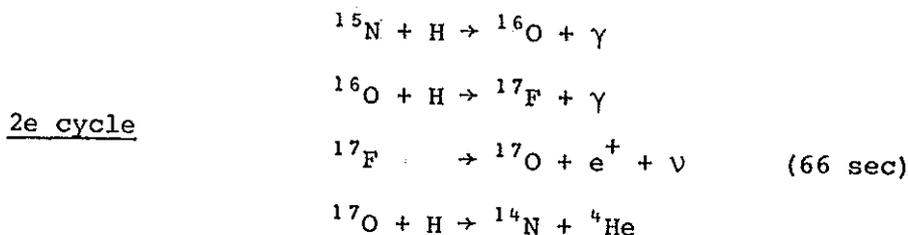
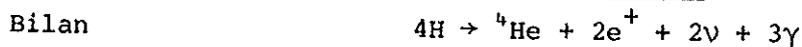
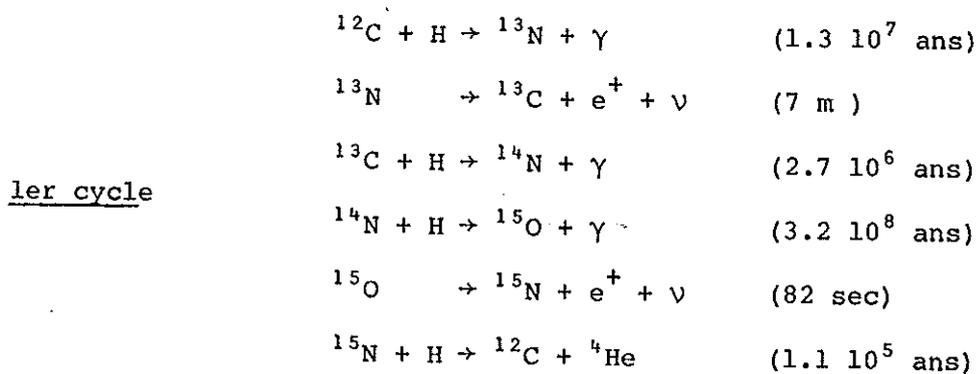
D'autre part, il se pourrait que le Soleil ne tire pas son énergie entièrement des réactions nucléaires, mais aussi de la contraction gravitationnelle. Pour cela, il faudrait que le centre soit beaucoup plus dense (la répartition interne beaucoup moins homogène que prévu). En fait, les hypothèses les plus vraisemblables sont celles qui tendent à réviser en baisse la température au centre du Soleil. Il est possible par exemple qu'il existe des variations de la luminosité solaire sur des périodes de l'ordre du million d'années. En effet, si les neutrinos ne mettent que 2 secondes à sortir du soleil, les photons, eux, ne sortent qu'après $2 \cdot 10^6$ ans. La luminosité actuelle correspond à l'état du Soleil il y a $2 \cdot 10^6$ ans, alors que les neutrinos détectés correspondent à l'état actuel du Soleil. Cette théorie n'est pas compatible, toutefois, avec les variations de température et de climat détectées dans l'histoire de la Terre.

La température au centre du Soleil peut tout de même être plus basse que prévu, si l'abondance des éléments lourds y est moindre.

En effet, si la concentration d'hydrogène est plus grande au centre, on dispose de plus de combustible nucléaire et il faut une température moins élevée pour produire la même luminosité, avec moins de neutrinos. Il se pourrait, par exemple, que la convection soit beaucoup plus étendue qu'on ne le croit et aide ainsi à abaisser la température centrale. Le problème, on le voit, est encore loin d'être résolu.

(3) Le cycle CNO :

Les éléments carbone, azote et oxygène, peuvent aussi "catalyser" la fusion de l'hydrogène. En fait, certaines réactions étant plus rapides que d'autres, il y a transformation (^{13}N et ^{15}O transformés en ^{13}C et ^{15}N , par exemple...). On a la série des 3 cycles :



- Du point de vue de la nucléosynthèse, le cycle CNO s'accompagne de la transformation des éléments comme ^{12}C , ^{16}O , ^{15}N en ^{14}N et ^{13}C .

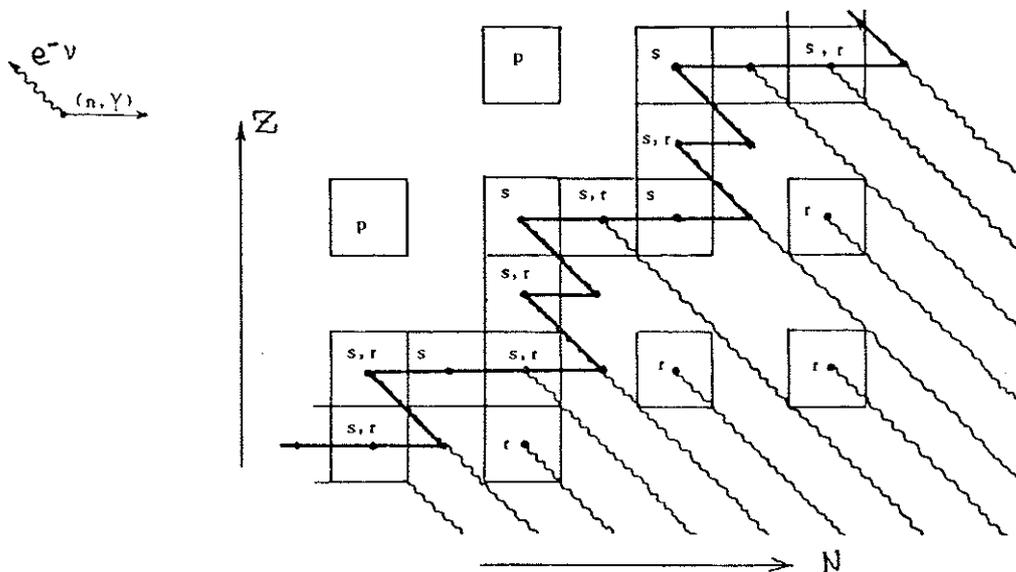
(4) Fusion de l'hélium :

Ces réactions se produisent au centre des géantes rouges (étoiles qui ont quitté la séquence principale). Les éléments de masse 5 et 8 sont extrêmement instables et la réaction dont le bilan est : $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ passe (rapidement) par des états résonnants de ces éléments. Ces réactions se produisent à des températures de l'ordre de 10^8 K et des densités de l'ordre de 10^3 g cm $^{-3}$. Elles conduisent à la formation de carbone et d'oxygène, mais peuvent aussi produire des neutrons (et initier les réactions de capture : exemple : $^{13}\text{C} + ^4\text{He} \rightarrow ^{16}\text{O} + \text{n}$).

Il se produit ensuite (à des températures et densités de plus en plus grandes) la fusion du carbone ($\rightarrow ^{20}\text{Ne}$, ^{23}Na) et la fusion de l'oxygène ($\rightarrow ^{28}\text{Si}$ et ^{31}P).

(5) Processus de capture de neutrons :

- Lorsque la capture de neutrons se produit sur un même élément on produit successivement les différents isotopes stables, en passant de (Z, A) à $(Z, A+1)$, $(Z, A+2)$ etc... (cf figure N/Z)



Lorsque l'absorption de neutrons conduit à la formation d'un noyau instable, deux cas peuvent se produire :

- si le flux de neutrons est faible, le noyau (Z,A) instable a le temps de se désintégrer en $(Z+1,A)$ (désintégration β rapide). On est alors en présence d'une absorption lente, ou processus s.

- si le flux de neutrons est élevé (processus r de capture rapide) le noyau instable absorbe un autre neutron; ce qui conduit à la synthèse d'un élément stable riche en neutrons. Ce cas se produit dans des phases explosives (supernovae), de même que les processus p qui produisent des éléments riches en protons.

Les sections efficaces de capture de neutrons sont d'autant plus grandes que l'énergie du neutron est faible :

$$\sigma \propto \frac{1}{v} \quad (\text{aux énergies thermiques})$$

$$\langle \sigma \rangle \sim 10^{-25} \text{ cm}^2 \quad \text{pour } v = 3 \cdot 10^3 \text{ Km/s} \quad (\text{vitesse thermique})$$

- Dans les phases calmes, on a $n_n \sim 10^5$ neutrons cm^{-3} , et le temps de capture $\tau_n = \frac{10^9}{n_n}$ ans $\sim 10^4$ ans. On a alors affaire au processus s.

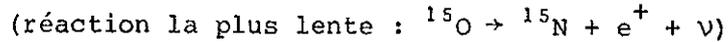
Il faut un flux de $n_n = 10^{22}$ neutrons cm^{-3} pour que $\tau_n \sim 10^{-6}$ sec (temps de la désintégration β) et que l'on ait affaire au processus r.

(6) Nucléosynthèse explosive :

La nucléosynthèse calme ne parvient pas expliquer la formation de tous les éléments, tels qu'on les observe (^{15}N trop peu abondant avec un cycle CNO normal, éléments r et p non expliqués...). Par contre, à des températures et densités plus élevées, les mêmes réactions peuvent s'orienter vers la production d'éléments différents.

Prenons l'exemple du cycle CNO explosif :

Contrairement au cycle CNO "froid", les réactions les plus lentes sont maintenant (à forte T) les interactions β . Au lieu de former essentiellement du ^{14}N , le cycle CNO forme ^{15}O :



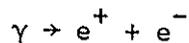
On peut ainsi expliquer certaines anomalies isotopiques dans les novae.

. Formation des éléments p : leur courbe d'abondance est en gros parallèle à celle des éléments r et s ; en particulier, on note aussi des maxima pour les nombres magiques de neutrons ou protons. Par contre, le rapport d'abondance $p/(r+s)$ décroît avec A (de 10^{-2} à 10^{-3}).

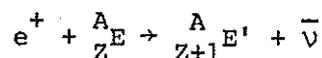
Il s'agirait donc d'éléments dérivés des éléments s et r :

- par interactions faibles :

A haute température ($T > 10^9$ K), les photons ($h\nu > 1$ Mev) se transforment en paires électron-positron :



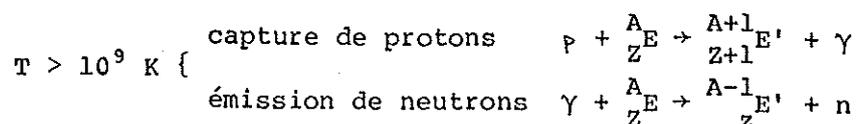
On peut alors transformer des neutrons en protons, selon les réactions :



- par réactions de spallation : ces réactions endothermiques de destruction partielle de noyaux lourds, peuvent se produire par exemple à l'arrivée d'une onde de choc lors du phénomène de supernova.

Certains éléments p peuvent alors en être les produits.

- par réactions thermonucléaires :



. Formation des éléments r :

Seule l'explosion d'une supernova peut produire le flux de neutrons requis $n_n > 10^{22}$ neutrons cm^{-3} . Certains éléments comme le thorium, l'uranium ou le plutonium ne peuvent se former que de cette façon.

Ce processus favorise la formation des éléments à couche complète de neutrons : si l'on soustrait l'abondance des éléments lourds provenant du processus s, à l'abondance observée, on découvre la présence de trois pics correspondant aux nombres magiques $N \sim 50$ (sélénium), $N \sim 82$ (tellure), $N \sim 126$ (platine), avec entre les deux derniers pics la colline des terres rares ($N \sim 100$), autour du gadolinium.

La capture r de neutrons se produit donc jusqu'à des éléments très riches en neutrons et très instables. Cette capture ne s'arrête que lorsque la probabilité d'éjecter un neutron devient supérieure à la probabilité de capture.

Ce "point d'arrêt" atteint, le noyau reste dans cet état jusqu'à ce que survienne une désintégration β , qui le fait passer de Z à $Z+1$. Les captures de neutrons peuvent alors reprendre.

