



HAL
open science

PROPRIÉTÉS DES NOYAUX ET ABONDANCE COSMIQUE DES ÉLÉMENTS

Hubert Reeves

► **To cite this version:**

Hubert Reeves. PROPRIÉTÉS DES NOYAUX ET ABONDANCE COSMIQUE DES ÉLÉMENTS. Journal de Physique Colloques, 1969, 30 (C3), pp.C3-132-C3-136. 10.1051/jphyscol:1969321 . jpa-00213698

HAL Id: jpa-00213698

<https://hal.science/jpa-00213698>

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

PROPRIÉTÉS DES NOYAUX ET ABONDANCE COSMIQUE DES ÉLÉMENTS

Hubert REEVES

S. E. P. Saclay, I. A. P. Paris, Université de Montréal

Résumé. — On montrera comment certaines propriétés des forces nucléaires se trouvent directement reflétées dans le diagramme des abondances relatives des éléments chimiques dans l'univers.

La théorie de la nucléosynthèse stellaire nous permet de comprendre comment ces propriétés ont influencé la forme de cette courbe.

Abstract. — Certain properties of the nuclear forces are reflected in the cosmic abundance curve. From the theory of stellar nucleosynthesis we understand how these properties have shaped the cosmic abundance curve.

Imaginons que, peu avant la naissance de la physique nucléaire, un physicien particulièrement astucieux ait reçu du ciel un message « révélé » dont le contenu est décrit par la première figure : la courbe de l'abondance

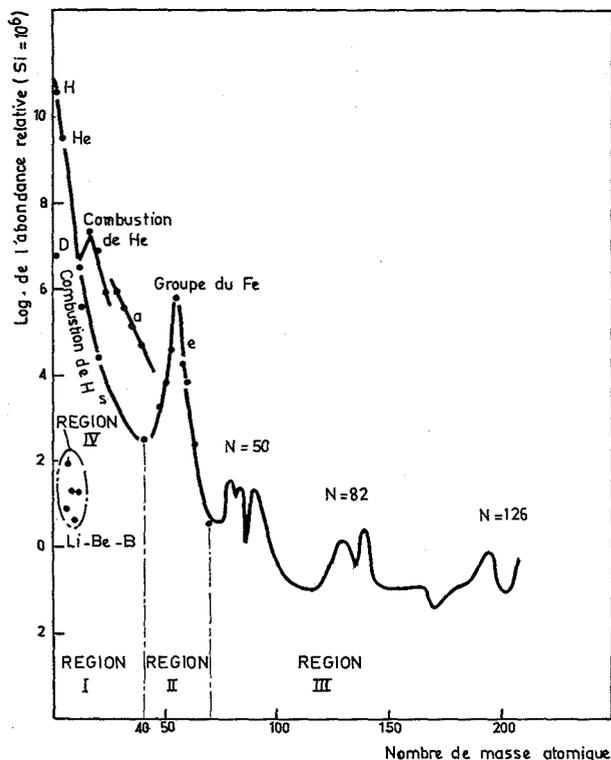
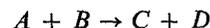


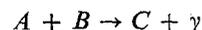
FIG. 1. — Courbe d'abondance des éléments.

relative des éléments et des isotopes dans l'univers ($n(A)$ vs A). Imaginons que, semblable au prophète biblique, notre physicien se voit assigner la tâche de comprendre et d'interpréter le sens profond et caché de ce message, en d'autres termes, d'en extraire pour ses confrères physiciens toute la physique fondamentale sous-jacente. Voyons jusqu'où il pourrait vraisemblablement aller.

D'emblée darwinien (c'est-à-dire écartant les hypothèses fixistes) il introduira au départ la notion d'évolution ; la possibilité de transformation des atomes les uns dans les autres par des réactions de composition du type



ou mieux



(la capture radiative dont il a déjà rencontré l'analogie en physique atomique).

Il sera donc amené à mettre sur pied une théorie évolutive pour laquelle il lui faudra d'abord inventer une « donnée initiale », une unité fondamentale, une « brique ». Puis il cherchera une « loi d'évolution », une façon à imbriquer les briques pour former des unités composées. Cette construction devra se placer dans un « cadre d'évolution » (dont la nature influencera le jeu des interactions fondamentales) et durer un certain « temps d'évolution ».

Dans la figure 1 il notera d'abord que l'élément le plus abondant (l'hydrogène) est aussi le plus léger.

De là la suggestion de choisir cet élément comme « brique ». De là aussi le corollaire suivant : *en général* les réactions devront aller du plus léger au plus lourd et, en définitive, peu de briques ont été jusqu'ici utilisées (environ 20 % d'après la Fig. 1).

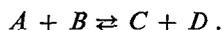
Les « lois d'évolution » que notre homme cherche à établir, ce sont (dans notre terminologie moderne) les lois qui régissent les réactions nucléaires, c'est-à-dire les propriétés des forces nucléaires.

Les « cadres d'évolution » ce sont les conditions thermodynamiques au moment où les réactions se produisent et les « temps d'évolution », nous les transcrivons en termes de modèles stellaires et galactiques.

La première figure se subdivise naturellement en quatre régions :

- I. le versant de l'hydrogène ($A < 40$, moins $5 < A < 11$),
- II. le pic du fer ($40 < A < 70$),
- III. les éléments lourds ($A > 70$),
- IV. le groupe dit L ($5 \leq A \leq 11$).

Connaissant la mécanique statistique notre chercheur aura vite reconnu dans le pic du fer (la région II) le résultat d'un ensemble d'interactions dans lesquelles chaque réaction possible est en équilibre avec la réaction inverse



La distribution en équilibre des éléments de l'ensemble est alors donnée par la relation de Maxwell-Boltzmann ; le rapport de l'abondance de deux éléments i et j est presque entièrement dominé par le rapport de la différence d'énergie de liaison (différence de masse) sur l'énergie thermique.

$$n_j/n_i \propto e^{-(\Delta M_{ij}/A)(1/kT)}. \quad (1)$$

Il s'ensuit donc que l'élément le mieux représenté (le fer) doit être le plus stable, et que la stabilité relative des noyaux doit décroître progressivement à mesure qu'on s'éloigne du fer.

Ce phénomène doit révéler une propriété des forces nucléaires ; quelle que soit leur nature exacte elles doivent engendrer un minimum (vers $A = 56$) dans la courbe de stabilité.

C'est bien ce que l'expérience de laboratoire a révélé après coup (Fig. 2).

Qu'est-ce que notre scientifique pourrait dire sur le cadre d'évolution ? Les équilibres thermodynamiques sont généralement associés à des milieux chauds. Les rapports d'abondance lui auront permis de déterminer les $(\Delta M_{ij}/AkT)$ de l'équation (1) sans plus. Au moyen

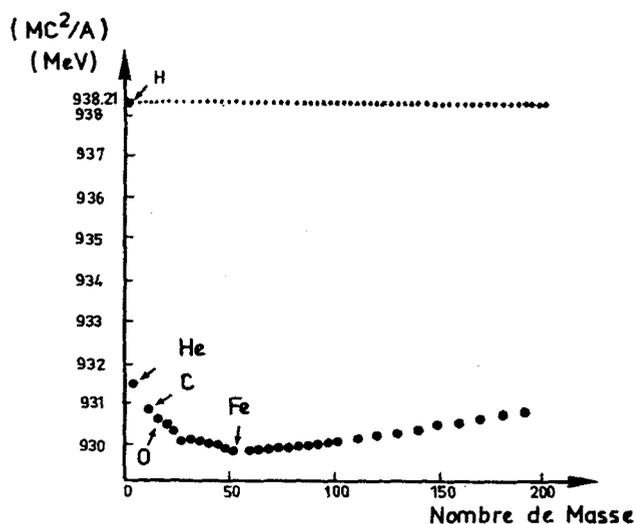


FIG. 2. — Masse par nucléon (MC^2/A) des noyaux stables — exprimée en MeV — (courbe de stabilité des noyaux). On note le minimum au voisinage du fer.

de la figure 2 nous pouvons maintenant déterminer approximativement la température ; on trouve $T = 3$ ou 4×10^9 °K.

Le « temps d'évolution » doit être comparable ou supérieur au temps requis pour que l'équilibre s'établisse (avec nos connaissances actuelles nous évaluons $t \geq 1$ s).

Par contre l'analyse du phénomène ne nous apprend rien sur la donnée initiale puisque les abondances en équilibre ne dépendent en aucune façon de la composition au départ.

En résumé : une fraction d'environ 10^{-3} de la masse de l'univers a, un jour, été portée à des températures d'environ 3 à 4×10^9 pendant environ une seconde (ou plus). La présence d'un maximum au voisinage du fer montre que la courbe de stabilité des noyaux passe par un minimum dans cette région.

Procédant par soustraction notre physicien pourra ensuite s'attaquer à la région I. Il notera d'abord la décroissance extrêmement rapide de la fonction $n(A)$. Revenant à la notion de composition des atomes au moyen de réactions (nucléaires) appropriées il supposera que les réactions responsables de la formation des éléments dans cette région se sont produites dans des conditions telles que le temps d'évolution « t » a dû être petit mais *non négligeable* vis-à-vis du temps de capture ($t < \tau(A + B \rightarrow C)$, $t \ll \tau(A + B \rightarrow C)$). Cette condition explique pourquoi l'abondance des éléments composés est faible mais non négligeable.

Contrairement aux conditions prévalentes pendant la genèse de la région II, ici l'équilibre n'a pas eu le

temps de s'installer : cela suggère des milieux froids où les énergies moyennes sont faibles.

Portant maintenant son attention sur le fait que la pente de ce versant est extrêmement raide, il soupçonnera l'existence d'un facteur d'inhibition des réactions de capture, facteur d'autant plus important que la masse des noyaux à combiner est grande. Il associera aux atomes une certaine grandeur, croissante avec la masse et dont la propriété est de retarder les captures. La charge électrique liée aux atomes et les phénomènes de répulsion électrostatique lui sont déjà familiers.

Il lui semblera naturel de faire intervenir ces phénomènes dans le cadre des réactions de composition.

Dans notre terminologie moderne ce cadre est donné par la section efficace de capture des noyaux à basse énergie (la formule de Gamow)

$$\sigma = \frac{S_{AB}}{E_{AB}} e^{-[2\pi Z_A Z_B e^2 / h v_{AB}]} \quad (2)$$

où Z_A et Z_B sont les charges électriques des noyaux A et B , v_{AB} leur vitesse relative, E_{AB} leur énergie relative et S_{AB} un facteur purement nucléaire décrivant la probabilité de fusion de ces particules.

Pour des noyaux de faible vitesse relative (basse énergie) l'exposant devient très grand et la valeur du produit $Z_A Z_B$ joue un rôle très important : on comprend pourquoi il est plus facile de combiner des noyaux légers que des noyaux lourds...

Notre connaissance expérimentale des S_{AB} nous permet maintenant de donner des valeurs numériques à l'inégalité temporelle établie par notre prophète. En gros toute la région I doit avoir été formée à des températures inférieures à 1 ou 2×10^9 °K.

La figure 3 résume la situation. Partant d'un gaz d'hydrogène (avec peut-être un peu d'hélium) nous obtenons à l'intérieur des étoiles de la séquence principale ($T \sim 10^7$ °K, $t \sim 10^8$ à 10^{10} années) la transformation de l'hydrogène en hélium. Dans une deuxième étape l'étoile devient une géante rouge ($T \sim 10^8$ °K, $t \sim 10^5$ à 10^7 années) et l'hélium se transforme en carbone et oxygène. Par la suite l'étoile s'échauffe encore et devient, semble-t-il, une supergéante rouge ($T \sim 10^9$ °K, $t \sim 10^3$ à 10^4 années) ; le carbone et l'oxygène se fusionnent eux-mêmes pour donner les groupes illustrés dans la figure 3.

Toutes les étoiles naissent froides et s'échauffent progressivement, mais seules les plus grosses par-

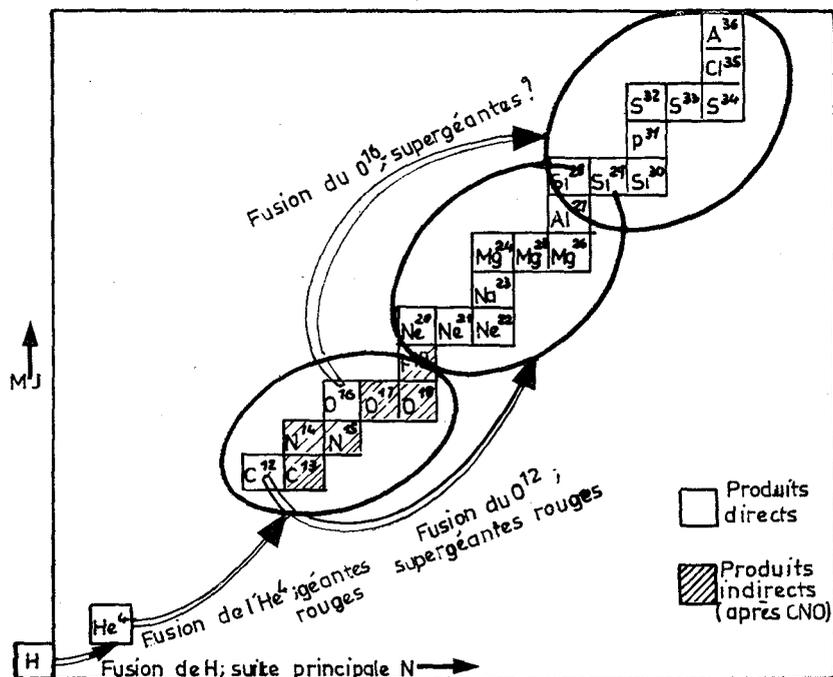


FIG. 3. — Les étapes principales de la nucléosynthèse à basse température (région I). Les carrés blancs représentent des isotopes formés directement par les réactions principales. Les carrés hachurés sont des isotopes formés par des réactions secondaires.

Erratum : sur la figure, au lieu de O^{12} , lire C^{12} .

viennent aux températures requises pour former les éléments les plus lourds du versant de l'hydrogène. Lévy-Leblond a discuté sur les raisons pour lesquelles les autres s'arrêtent en cours de route.

C'est dans ce « cadre d'évolution » que la charge électrique du noyau a agi pour produire une courbe d'abondance aussi raide.

A plus haute température encore (dans les étoiles plus massives) la situation deviendra propice aux réactions en équilibre (la région II).

Ayant observé et décrit l'allure moyenne du versant de l'hydrogène, notre chercheur voudra y regarder de plus près et ne manquera pas de noter la situation assez privilégiée des structures constituées de quatre unités (quatre nucléons).

Il observera d'abord la présence de pics secondaires correspondant à des noyaux faits d'un nombre entier de ces structures (C^{12} , O^{16} , Ne^{20} , Mg^{24} , Si^{28} , ...). Les réactions génératrices de ce versant lui paraîtront modulées d'une façon secondaire mais visibles par des phénomènes d'équilibre thermodynamique partiel par lesquels la stabilité relative de certains noyaux vis-à-vis de leurs voisins immédiats aura réussi à s'exprimer. Nouvelle inférence sur la physique du système : les particules alphas et leurs composés (dans notre jargon) correspondent à des minima secondaires dans la courbe de stabilité. On retrouve encore ce phénomène dans la figure 2.

Par opposition, ce phénomène lui paraîtra responsable de la très faible abondance des éléments situés entre l'hélium et le carbone (la région IV). Tous ces noyaux ont une très forte tendance à se décomposer en particules alphas et le font à la moindre perturbation. Gradsztajn nous a parlé de l'intérêt astrophysique que cette instabilité confère à ce groupe d'éléments. Je n'y reviendrai pas sinon pour signaler que le plus instable parmi les instables c'est le noyau de béryllium-9 et que cette instabilité relative est bien reflétée par le fait qu'il est le plus rare des éléments de ce groupe dans la nature.

Un coup d'œil encore plus attentif sur l'allure du versant lui révélera une modulation tertiaire ; les noyaux de masse paire sont plus abondants que les noyaux de masse impaire. La notion d'énergie d'appariement (l'énergie de liaison croît quand les nucléons peuvent se coupler) lui apparaîtra peut-être.

Peut-être soupçonnera-t-il l'action du principe de Pauli dans cette superposition de modulations (deux en deux et quatre en quatre). Dans ce cas il voudra définir quatre états possibles pour chaque nucléon (dans notre langage : neutron, proton, spin up, spin down).

En résumé : un versant formé a des températures basses mais progressivement croissantes, pendant des temps longs mais progressivement décroissants pour chaque étape. Des phénomènes dominés par la charge électrique des atomes, mais modulés par la stabilité relative des quadruplets et des paires de nucléons.

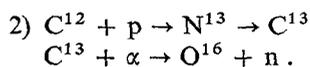
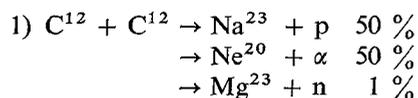
S'attaquant maintenant à la région III notre homme se trouve dans une situation difficile, provoquée en partie par ses succès précédents. L'hypothèse d'une synthèse à basse température dominée par l'effet coulombien n'est plus utilisable ici, précisément parce que la répulsion est maintenant beaucoup trop intense pour permettre la formation des abondances observées (comme le montre l'extrapolation du versant de l'hydrogène dans la Fig. 1).

L'hypothèse d'une synthèse à haute température est également exclue (comme le montre l'extrapolation des pentes du pic de fer).

A cours d'explication il inventera une brique neutre (c'est-à-dire pouvant s'ajouter aux atomes sans le facteur inhibitif décelé dans la région I). Ainsi attribuera-t-il l'existence de la région IV à des captures de ces « neutrons » par des éléments préexistants, soit dans le versant de l'hydrogène, ou mieux encore, dans le pic du fer puisque le chemin à parcourir est plus court. La température sera plutôt faible (pour éviter la photodésintégration). La pente décroissante pourra s'expliquer (par exemple) en supposant que les temps d'évolution ne sont pas trop longs.

Cette pente est elle-même marquée d'un certain nombre d'irrégularités, de pics secondaires. Comme auparavant il sera tenté de relier ces pics secondaires à la présence de nouveaux minima dans la courbe de stabilité.

Aujourd'hui nous savons que certaines des réactions nucléaires responsables de la synthèse du versant de l'hydrogène libère des neutrons. Par exemple



L'équation d'abondance d'un élément A baignant dans un flux de neutrons est donnée par

$$\frac{dn_A}{dt} = \langle \sigma v \rangle_{A-1, n} n_{A-1} n_n - \langle \sigma v \rangle_{A, n} n_A n_n \quad (3)$$

où $\langle \sigma v \rangle_{A-1, n}$ est la probabilité de capture d'un neutron par l'élément $(A-1)$, intégré sur une distribution thermique ; σ étant la section efficace de

capture et v la vitesse relative ; n_n et n_A sont des densités de particules par unité de volume.

Le phénomène le plus remarquable ici est le suivant : la courbe des $\sigma_{A,n}$ vs A présente elle-même des irrégularités importantes mais le produit $\sigma_{A+n} n_A$ est une fonction monotoniquement décroissante ; les bosses de σ_A correspondent à des creux de $n(A)$ et vice versa. Cette corrélation confirme de façon assez convaincante l'intuition de notre physicien.

En résumé : Les éléments lourds sont formés à basse température par captures de neutrons sur des éléments préexistants. Cette explication implique l'existence d'une particule, non chargée, capable de réactions nucléaires.

Certains noyaux lourds sont plus nettement stables que leurs voisins (ce sont nos « noyaux magiques »). Par analogie avec la physique atomique il pourrait s'agir de structures en couches fermées.

Peut-être trouverez-vous que j'ai surévalué l'intuition physique de mon personnage. Vous reconnaîtrez cependant que cette fiction a bien illustré le sujet de cette conférence...

DISCUSSION

J.-C. PECKER. — Que faut-il penser de la thèse selon laquelle une partie de l'hélium se serait formée non pas dans les étoiles mais dans l'explosion initiale (Big Bang).

H. REEVES. — La situation est assez confuse, et il y a du pour et du contre. Au total je crois qu'on est plus ou moins forcé d'adopter cette thèse. Ce qui reste à déterminer c'est la quantité d'hélium ainsi formée.

J.-C. PECKER. — Et pour les éléments plus lourds ?

H. REEVES. — Là c'est plus clair, il n'y a pratiquement aucun espoir de les former en abondances suffisantes dans l'explosion initiale.