

Théorie astrophysique de la nucléosynthèse

Les spécialistes de la physique nucléaire — en particulier ceux qui font des recherches dans le domaine de l'astrophysique — emploient le terme de *nucléosynthèse*¹ pour parler de la création des différents noyaux atomiques selon divers processus. Leur approche théorique se divise en trois parties, qui se suivent et se chevauchent partiellement :

- ***La nucléosynthèse primordiale***
- ***La nucléosynthèse stellaire***
- ***La nucléosynthèse explosive***

A ces trois processus que l'on peut qualifier de « naturels », on peut ajouter la synthèse des noyaux des atomes dits *transuraniens* — au-delà de l'atome d'*uranium* — produits dans les réacteurs nucléaires et dans des laboratoires, mais dont on soupçonne toutefois la présence possible dans certaines étoiles particulières :

- ***La nucléosynthèse des noyaux atomiques transuraniens***

Il faut également signaler le phénomène dit de *spallation cosmique*, également appelé *nucléosynthèse interstellaire*, qui produit des noyaux atomiques légers, lorsque la matière est bombardée par des rayons cosmiques. Ce sont essentiellement les *noyaux des atomes de lithium 3, de béryllium 4 et de bore 5* :

- ***La nucléosynthèse interstellaire***

Tous les mécanismes de *décroissance nucléaire* qui viennent d'être évoqués dans les précédentes sections — en excluant les idées « magiques » non reconnues par la communauté des physiciens — sont susceptibles de participer à la *nucléosynthèse* des noyaux atomiques, mais le plus souvent dans un sens opposé, c'est-à-dire de *croissance nucléaire* :

- ***Capture de neutrons***
- ***Capture de protons***
- ***Fusion nucléaire***
- ***Fission nucléaire***
- ***Spallation***
- ***Désintégration radioactive***
- ***Fission spontanée***

1 Voir article WIKIPÉDIA : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Nucléosynthèse>

THÉORIE NR

Nucléosynthèse primordiale

Il s'agit du processus initial¹, décrit dans le cadre des théories astrophysiques fondées sur l'hypothèse du Big Bang, l'acronyme anglais étant BBN pour *Big Bang Nucleosynthesis*.

L'hypothèse du Big Bang est retenue par la majorité des modèles cosmologiques, suite au constat de l'expansion de l'univers et à l'interprétation qui en est faite dans le cadre de la *Théorie de la relativité générale* proposée par Albert Einstein en 1915. De ce choix résulte qu'a existé une phase initiale où l'Univers était extrêmement dense et chaud, voire réduit à une singularité de dimension nulle et de densité infinie, ce qui peut se concevoir d'un point de vue *mathématique* — c'est-à-dire en faisant une lecture stricte des équations de la relativité — mais n'a guère de sens *physique*, d'où les nombreuses tentatives d'inclure des considérations relevant de la *Théorie quantique* pour éviter cet écueil.

Ceci étant, le présent sujet n'est pas vraiment concerné par ce problème, puisque dans la chronologie du Big Bang, la nucléosynthèse primordiale intervient dans un intervalle de temps — plus précisément de *temps cosmique* qui est une des formes du *temps mathématique* — allant de dix secondes à vingt minutes.

Selon la théorie, la nucléosynthèse primordiale concerne la formation des noyaux les plus légers, ceux des atomes d'hélium $4\text{ }^4\text{He}$, de deutérium $2\text{ }^2\text{D}$, de lithium $6\text{ }^6\text{Li}$ ou $7\text{ }^7\text{Li}$ en faibles quantités et de quelques traces de celui de béryllium $5\text{ }^9\text{Be}$.

L'adoption par les physiciens théoriciens de cette phase initiale de la nucléosynthèse est basée expérimentalement sur le constat de l'abondance des différents éléments chimiques présents dans l'Univers. Plus précisément, la quantité d'hélium formée par la *nucléosynthèse stellaire* — objet de la prochaine section — n'est pas suffisante pour expliquer l'abondance de cet élément.

La conclusion est que les galaxies primordiales devaient déjà contenir une grande partie de l'hélium actuellement détecté dans l'Univers, ce qui vient fortement appuyer l'hypothèse d'un Big Bang initial.

1 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nucléosynthèse_primordiale

ARCHITECTURE DE LA MATIÈRE

Nucléosynthèse stellaire

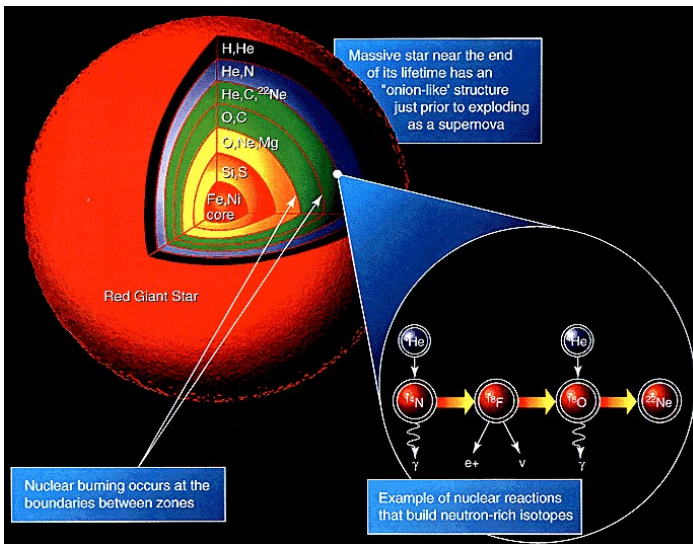
Cette phase de la nucléosynthèse commence par la création de noyaux atomiques par *fusion nucléaire* au cœur des étoiles¹. L'hydrogène 1H produit tout d'abord de l'hélium 4He au cours de ce qui est appelé la *séquence principale* ; puis sont synthétisés les noyaux atomiques allant du lithium 6Li au fer 56Fe . Quelques éléments voisins fer sont également produits au début de ce qu'on nomme le *processus s* (*pic du fer*), en particulier du chrome 52Cr , du manganèse 55Mn , du cobalt 59Co et du nickel 58Ni .

Les différents cycles de la nucléosynthèse stellaire sont :

- **La chaîne proton-proton** ²
- **Le cycle carbone-azote-oxygène** ³
- **La réaction triple α** ⁴
- **La réaction α** ⁵

Ces différentes fusions *exothermiques* allant jusqu'au pic du fer sont résumées par l'illustration suivante :

Fig 9.56 : Fusions « en pelures d'oignon » dans une étoile massive



- 1 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nucléosynthèse_stellaire
- 2 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Chaîne_proton-proton
- 3 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Cycle_carbone-azote-oxygène
- 4 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Réaction_triple_alpha
- 5 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Réaction_alpha

THÉORIE NR

La suite de la nucléosynthèse stellaire située au delà de l'atome de nickel 62 — qui est donc *endothermique*, c'est-à-dire nécessitant un apport d'énergie — se produit par différents processus apparaissant lors de la destruction explosive des étoiles en fin de vie ; ce qui aboutit à la synthèse de la plupart des noyaux atomiques, par différents processus ainsi dénommés :

- **s** : capture neutronique *lente* (*slow* en anglais)¹.
- **r** : capture neutronique rapide (*rapid* en anglais)².
- **p** : capture de protons donnant des isotopes pauvres en neutrons (p signifiant *proton*)³.
- **rp** : création d'éléments chimiques lourds par capture rapide de protons (*rapid proton capture* en anglais)⁴.

Cette version du tableau périodique des éléments indique les principaux processus de synthèse des noyaux atomiques :

Fig. 9.57 : Tableau périodique des éléments (processus s r p et rp)

Le tableau périodique des éléments est coloré selon les processus de synthèse nucléaire suivants :

- Orange** : Fusion lors du Big Bang
- Vert** : Fin de vie d'étoiles peu massives
- Orange** : Explosion d'étoiles massives
- Vert** : Élément artificiel (synthèse humaine) Pas d'isotope stable
- Vert** : Fission de rayons cosmiques
- Orange** : Fusion d'étoiles à neutrons
- Vert** : Explosion de naines blanches

Les éléments concernés par ces processus sont principalement ceux situés entre le cuivre (Z=29) et le plomb (Z=82), ainsi que certains éléments plus légers et plus lourds.

Ce sont donc les éléments signalés par les couleurs verte, orange et gris clair qui peuvent être produits par l'explosion d'étoiles peu massives, massives ou naines blanches. A quelques exceptions près (technétium 43 et prométhéum 61), tous les éléments chimiques allant du cuivre 29 au plomb 82 sont concernés, en proportions très variables, par cette deuxième partie de la nucléosynthèse stellaire.

1 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Processus_s

2 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Processus_r

3 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Processus_p

4 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Processus_rp

ARCHITECTURE DE LA MATIÈRE

Nucléosynthèse explosive

Cette dernière opération de synthèse « naturelle » concerne les noyaux atomiques les plus lourds¹. Elle est la conséquence de plusieurs types d'explosion d'étoiles massives, phénomènes ainsi définis (source WIKIPÉDIA) :

- **Supernova thermonucléaires Ia**² : supernova survenant dans les systèmes binaires contenant au moins une naine blanche, l'autre étoile pouvant être de n'importe quel type, d'une géante à une naine blanche plus petite.
- **Supernova à effondrement de cœur II**³ : expulsion violente des couches externes d'étoiles massives (à partir de 8 masses solaires) en fin de vie. Juste avant cette explosion, la partie la plus centrale de l'étoile se contracte. Il en résulte la formation d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir.
- **Collapsar**⁴ : étoile massive qui s'effondre et forme un sursaut gamma, puis finalement un trou noir stellaire. Ainsi, lorsqu'une étoile a une masse d'au moins 20 à 30 fois celle du soleil, celle-ci en épuisant son carburant nucléaire possède une pression interne trop faible pour soutenir la masse même de l'étoile. Dans ce cas, le noyau de l'étoile s'effondre en créant un trou noir.
- **Fusion d'étoiles à neutron**⁵ : type particulier de collision stellaire qui génère des ondes gravitationnelles et des sursauts gamma, ce qui produit par processus r des noyaux atomiques lourds (de numéro atomique supérieur à celui du fer 26).

Ce troisième principe de nucléosynthèse a lieu au cours de la fusion explosive de l'oxygène et du silicium. Parmi les éléments synthétisés se trouvent le soufre 16, le chlore 17, l'argon 18, le sodium 11, le potassium 19, le scandium 21 ainsi que des éléments du pic du fer 26 : chrome 24, manganèse 25, cobalt 27 et nickel 28. Ce sont donc des éléments chimiques précédant le pic du fer, produits par des processus explosifs et non par fusion nucléaire.

1 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Nucléosynthèse_explosive

2 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Supernova_thermonucléaire

3 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Supernova_à_effondrement_de_cœur

4 Voir article WIKIPÉDIA : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Collapsar>

5 Voir article WIKIPÉDIA : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fusion_d'étoiles_à_neutrons

Nucléosynthèse artificielle

Les éléments chimiques baptisés transuraniens¹ sont produits artificiellement. Extrait de l'article WIKIPÉDIA dédié :

Les **transuraniens**, ou **éléments transuraniens** sont les éléments chimiques dont le numéro atomique est supérieur à celui de l'uranium, c'est-à-dire supérieur à 92. Ce sont tous des radioéléments n'ayant aucun isotope stable, produits artificiellement, au sein de réacteurs nucléaires pour les plus légers, et par des accélérateurs de particules de certains laboratoires de recherche spécialisés pour les plus lourds (26 avaient été synthétisés en décembre 2016, du neptunium (93 protons) à l'oganesson (118 protons), aucun isotope de numéro atomique supérieur à 118 n'ayant été observé à cette date) ; ou possiblement par certaines étoiles telles que l'étoile de Przybylski, dont le spectre d'absorption révèle la présence de différents actinides.

Les théoriciens distinguent deux catégories d'éléments chimiques synthétiques dits transuraniens (*source WIKIPÉDIA*):

- **Les actinides²** : C'est une famille du tableau périodique comprenant les quinze éléments chimiques allant de l'actinium (89 protons) au lawrencium (103 protons). Ces métaux lourds tirent leur nom de l'actinium, premier de la famille, en raison de leurs propriétés chimiques apparentées. Tous les actinides sont radioactifs, et libèrent de l'énergie par désintégration radioactive. Ils sont tous fissionables en neutrons rapides et quelques uns en neutrons thermiques.
- **Les transactinides³** : Ce sont des éléments dits « superlourds » ayant un numéro atomique supérieur à celui de l'uranium (92 protons). À l'exception du dubnium (105 protons), les isotopes des transactinides ont des demi-vies très brèves, ne dépassant pas quelques secondes. Leur dénomination a souvent fait l'objet de débats qui ont conduit à l'adoption par l'IUPAC d'une dénomination systématique provisoire avec des symboles à trois lettres en attendant que leur identification soit validée pour la remplacer par des noms attribués par leurs découvreurs, avec un symbole à deux lettres.

1 Voir article WIKIPÉDIA : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Transuraniens>

2 Voir article WIKIPÉDIA : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Actinide>

3 Voir article WIKIPÉDIA : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Transactinide>