

L'Univers dans ma poche



Nous venons  
des étoiles



Grażyna Stasińska  
Observatoire de Paris

Les **atomes** sont les constituants élémentaires de la matière. Ils se composent d'un **noyau** (qui contient des **protons** et des **neutrons**) et d'**électrons**. Les atomes s'unissent en **molécules** en partageant leurs électrons. Les cellules du corps humain sont composées de milliards de **molécules**.

### Histoire de la nucléosynthèse stellaire

Robert d'Escourt Atkinson **A** publia son article « Synthèse atomique et énergie stellaire » en 1931. Hans Bethe **B** identifia en 1938 et 1939 les deux mécanismes de transformation d'hydrogène en hélium dans les étoiles. Fred Hoyle montra en 1946 comment se fait la synthèse des éléments à partir de l'hydrogène. Margaret et Geoffrey Burbidge, William Fowler et Fred Hoyle **B<sup>2</sup>FH** publièrent en 1957 leur article très détaillé « Synthèse des éléments dans les étoiles » et, la même année, Alastair Cameron **C** publia « Les réactions nucléaires dans les étoiles et la nucléogénèse ».



2



Notre corps est fait d'eau (63%), de protéines (20%), de graisse (10%), de sucres (2%) et de divers minéraux (5%).

Depuis qu'est née la chimie, à la fin du 18ème siècle, on sait que tous ces matériaux sont composés de **molécules** complexes qui contiennent des **atomes** d'hydrogène, de carbone, d'oxygène et d'autres **éléments** en plus petite quantité. Ces **éléments** sont exactement les mêmes qu'on trouve dans les plantes, dans la croûte terrestre et dans l'atmosphère.

Par la spectroscopie, les astronomes ont montré que ces mêmes **éléments** se trouvent aussi dans les étoiles.

Mais ce n'est qu'au milieu du 20ème siècle que les astronomes ont réussi à comprendre l'origine de ces **éléments** et à découvrir le lien très étroit qui nous rattache aux étoiles.

**Proton** : formé de trois particules élémentaires, les quarks. Il a une charge électrique positive et sa masse est de  $1,672649 \times 10^{-24}$  g.

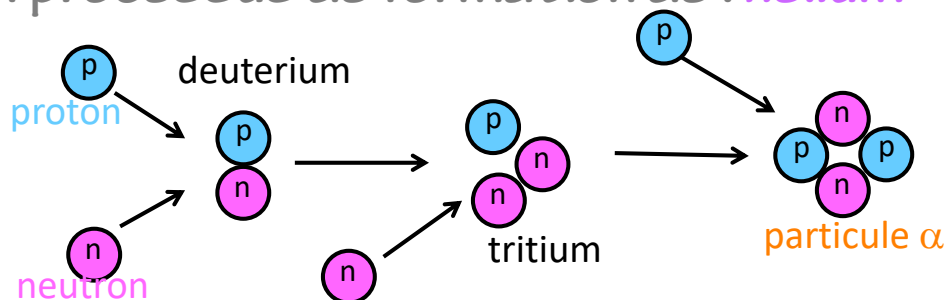
**Neutron** : également formé de trois quarks mais ne possède pas de charge électrique. Sa masse est de  $1,67493 \times 10^{-24}$  g.

**Electron** : particule de charge électrique négative, dont la masse est environ 1/2000 de celle du **proton**.

**Hydrogène** : le plus léger des **éléments**. Il est constitué d'un **proton** et d'un **électron**.

**Hélium** : l'**élément** stable le plus léger après l'**hydrogène**, fait d'une **particule  $\alpha$**  et de 2 **électrons**.

Un processus de formation de l'**hélium**



C'est Georges Gamow, dans un article avec Alpher et Bethe en 1948, qui proposa la théorie de formation de l'**hydrogène** et de l'**hélium** primordial. Dans cet article les auteurs proposaient aussi que tous les autres éléments se formaient également dans le Big Bang par additions successives de neutrons. Mais sur ce point ils se sont **trompés**.

# L'hydrogène et l'hélium

Lorsque l'Univers était très dense et chaud ( $T=10^{12}\text{K}$ ), peu après le Big Bang\*, il ne contenait que des particules élémentaires de matière (quarks, électrons, neutrinos) et des photons, sortes de grains de lumière.

En se refroidissant, les quarks se sont combinés en **protons** et **neutrons** en quantités égales. Mais la température baissant, la plupart des **neutrons** se transformèrent en **protons**, moins massifs. Lorsque la température est passée sous  $10^9\text{K}$ , il y avait 7 **protons** pour un **neutron**.

Alors **neutrons** et **protons** se sont combinés pour former des **noyaux** plus lourds. Le **noyau** le plus stable pouvant se former à cette époque étant celui d'**hélium**, tous les **neutrons** ont servi à former l'**hélium**, donnant un **noyau** d'**hélium** pour 12 **noyaux** d'**hydrogène** à la fin de l'époque primordiale.

Formation du  
carbone à partir  
de trois **noyaux**  
d'**hélium**

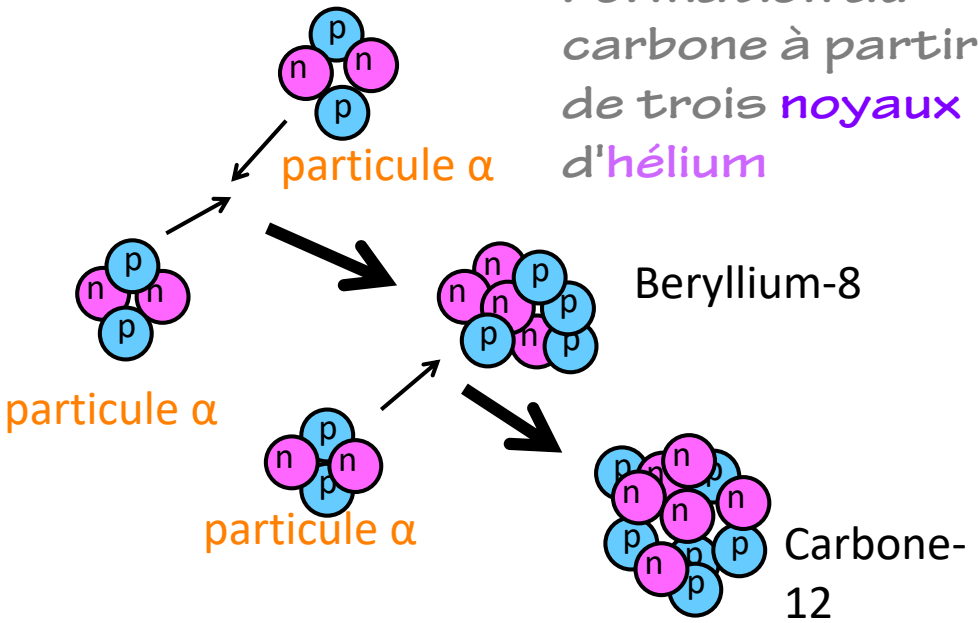
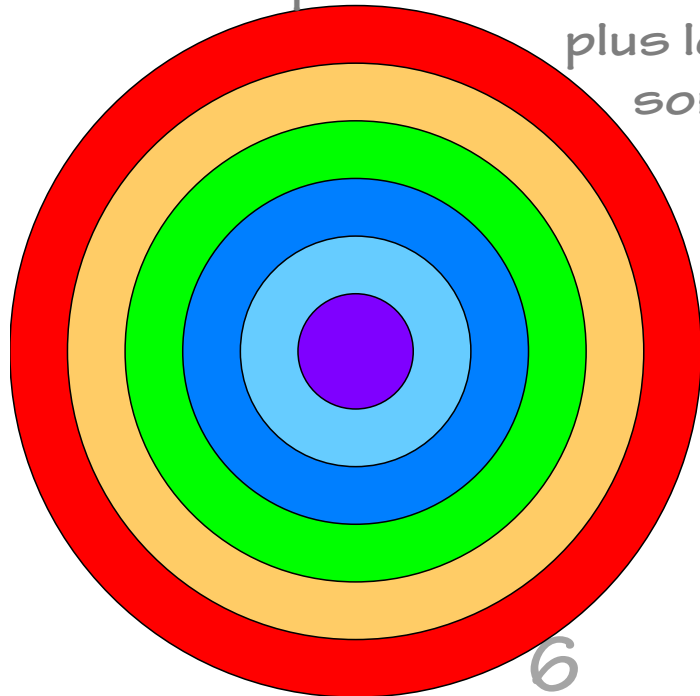


Schéma de la structure en oignon d'une étoile massive en fin d'évolution. Chaque couche a une composition différente. Les **éléments**

plus lourds que le fer sont produits par capture de **neutrons**



**hydrogène**

**helium**

**carbone**

**oxygène**

**silicium**

**fer**

# Fusion dans les étoiles

Le cœur très chaud et dense des étoiles offre des conditions idéales pour produire des **noyaux** de plus en plus gros. D'abord, l'**hydrogène** se transforme en **hélium**. C'est la phase la plus longue de la vie de chaque étoile. Pratiquement toutes les étoiles que nous voyons briller tirent leur énergie de cette fusion. Une fois l'**hydrogène** épuisé, le cœur d'**hélium** se condense et sa température augmente. Alors les **noyaux** d'**hélium** se groupent par trois pour former le carbone, tandis que l'**hydrogène** continue à fusionner dans les couches supérieures. Puis se forment les autres **noyaux**, par adjonctions successives de **particules**  $\alpha$  dans différentes couches. Si l'étoile est assez massive, ce processus se poursuit jusqu'au fer, le plus stable des éléments.

Les **noyaux** plus lourds que le fer sont créés dans des conditions différentes par ajout de **neutrons**. 7

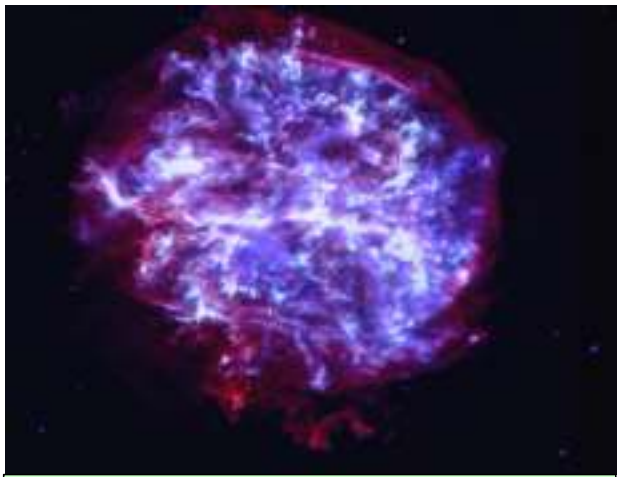




La nébuleuse de l'Œil de Chat. (R. Corradi télescope NOT).

Image composite de la nébuleuse planétaire de l'Œil de Chat. Cet objet résulte de plusieurs épisodes de vents stellaires qui émanent de l'étoile centrale maintenant en passe de devenir une naine blanche.

G292.0+1.8 : Un reste de supernova provenant d'une étoile de grande masse ayant éjecté beaucoup d'oxygène, de magnésium et de néon dans le milieu interstellaire.



G292.0+1.8 en rayons X. Credit : NASA/CXC/SAO



Vue d'artiste (Dana Berry, SkyWorks Digital).

Représentation de la collision de deux étoiles à neutrons. L'or, l'uranium et d'autres éléments lourds se serait formés lors d'un tel événement.



# Vents, collisions, explosions

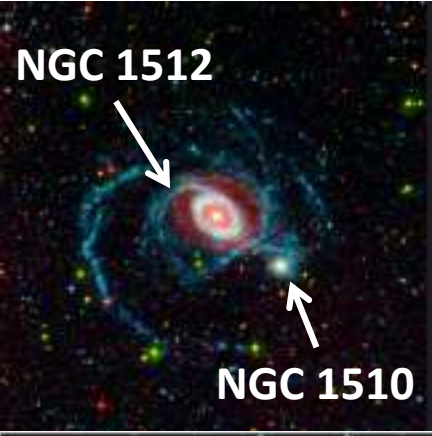
Une partie des **éléments** ainsi formés est éjectée dans le milieu interstellaire tandis que le reste est enfermé pour toujours dans les « cadavres » d'étoiles que sont les naines blanches, les étoiles à **neutrons** et les trous noirs.

Les étoiles de masse inférieure à 8 fois celle du Soleil se défont de leurs couches externes de façon paisible, rejetant ainsi de l'azote, du carbone et quelques **éléments** plus lourds que le fer.

Les étoiles plus massives terminent leur vie dans une explosion spectaculaire - une supernova - et expulsent du carbone, de l'oxygène, du néon, du magnésium, du silicium etc.

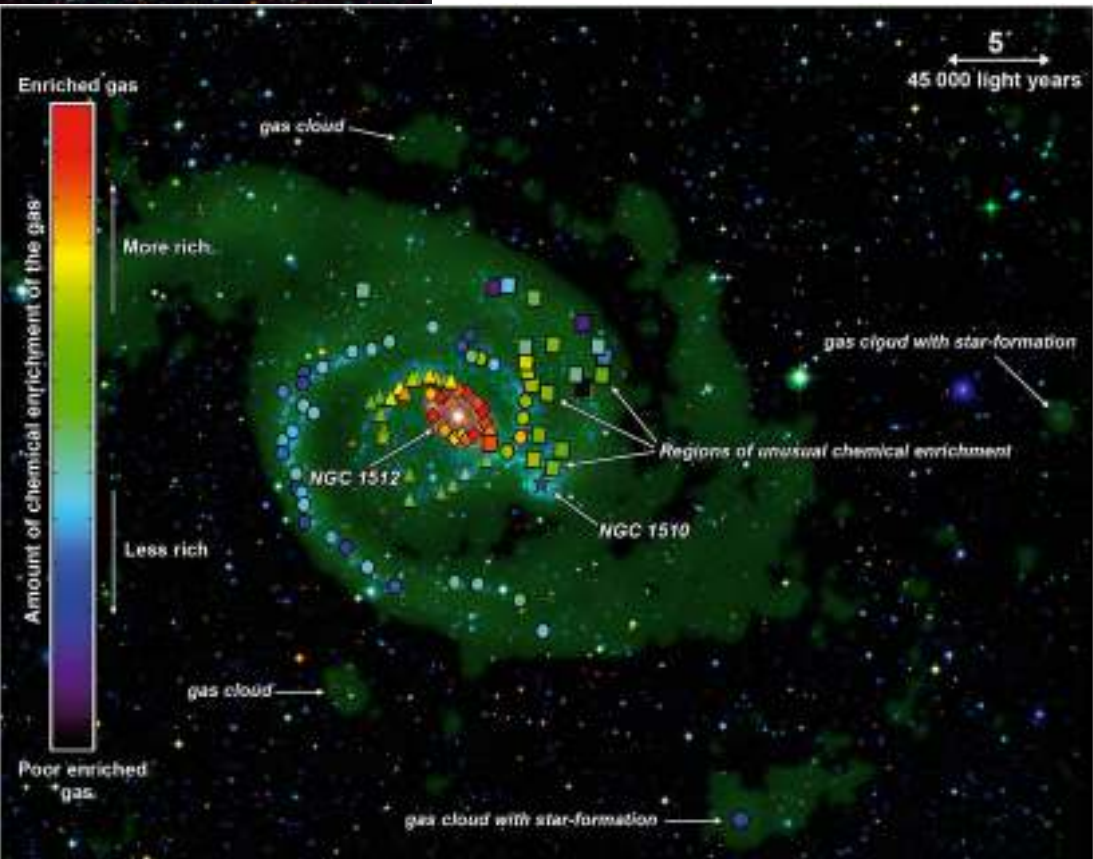
D'autres **éléments** lourds, tels que l'or et l'uranium, nécessitent une très haute densité de **neutrons** pour se former, ce qui est plus susceptible de se produire lors de collisions d'étoiles à **neutrons**.

NGC 1512



NGC 1510

Les galaxies NGC 1512 et NGC 1510 en ultraviolet. Les zones brillantes sont des zones où des étoiles viennent de se former.  
 Crédit: GALEX (NASA)



Ici les symboles indiquent l'abondance d'oxygène (rouge lorsqu'elle est grande, bleu lorsqu'elle est faible).

Crédit: Lopez-Sanchez (AAO/MQU) et Koribalski (CSIRO).

# L'odyssée cosmique des éléments

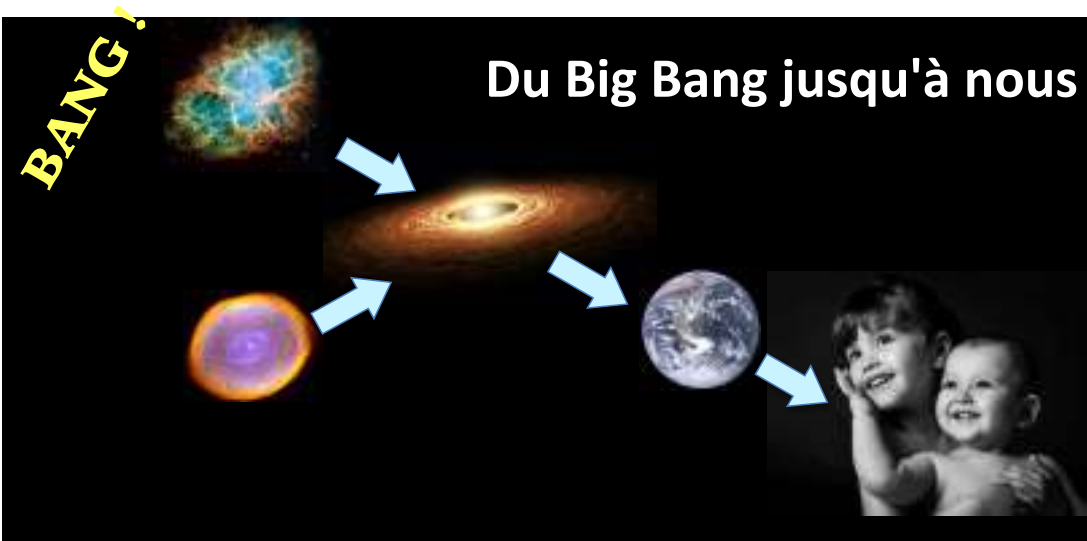
Une fois les **éléments** libérés dans le milieu interstellaire, ils commencent un long voyage au sein des galaxies, avant d'être piégés lors de la formation de nouvelles étoiles. Ainsi, les générations successives d'étoiles deviennent de plus en plus riches en carbone, en azote, en oxygène etc.

Le périple des **éléments** dans le milieu interstellaire peut être très tortueux, avec des perturbations liées aux collisions des galaxies entre elles. Les **éléments** libérés lors d'explosions de supernovae peuvent même faire des incursions dans le milieu intergalactique, puis se retrouver dans d'autres galaxies.

En fait, des simulations numériques récentes suggèrent qu'une grande partie des **éléments** présents dans la Voie lactée provient d'autres galaxies.

# Pourcentage de masse des **éléments** chimiques en des lieux différents

	Nb de protons	Système solaire	Croûte Terrestre	Corps humain
H	1	70.5	0.14	9.5
He	2	27.5	-	-
C	6	0.30	0.030	18.5
N	7	0.11	0.005	3.2
O	8	0.96	46.6	65
Si	14	0.065	27.7	0.00002
S	16	0.040	0.050	0.3
Ca	20	0.006	3.6	1.5
Fe	26	0.117	5.0	0.006



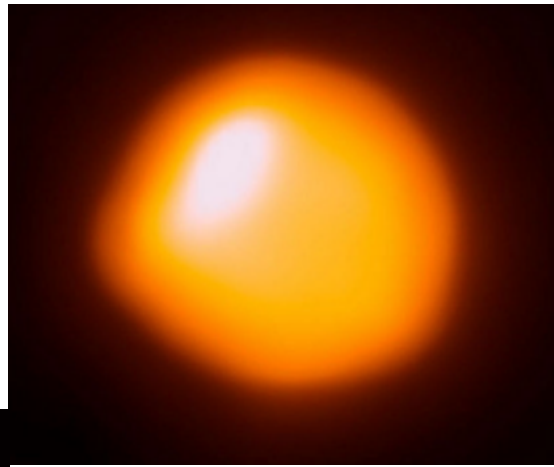
## Des étoiles aux êtres vivants

Pour arriver à l'être vivant, les **éléments** doivent passer par de nombreuses étapes encore mal comprises.

D'abord il y a la formation de nuages de **molécules** et de poussières, au sein desquels naissent les étoiles. Au début, celles-ci sont entourées d'un disque protoplanétaire, constitué d'agrégats de poussières et de glaces. C'est dans ce disque que se forment les planètes. Leur composition chimique diffère suivant leur distance à l'étoile (plus elle est faible, plus les **éléments** volatiles se dissipent) et leur masse (plus elle est faible, plus les particules légères s'échappent facilement).

Une fois la planète formée s'ensuit une ségrégation qui fait que le cœur a une composition différente de la croûte.

Enfin c'est de la croûte que viennent les matériaux dont sont faits les êtres vivants.



# Jeu

Quelle est  
l'origine de l'or ?



Réponse au dos



L'étoile  
Bételgeuse

La planète  
Jupiter

Une créséide : une  
pièce d'or, frappée  
par le roi Crésus au  
6ème siècle av. J.C  
en Lydie.

La nébuleuse  
planétaire IC 418

Le reste de  
supernova du Crabe

Réponse

On pense que l'or se  
forme lors d'une  
collision d'étoiles à  
neutrons comme  
celle représentée  
sur ce tableau



# L'Univers dans ma poche N° 14

Ce mini-livre a été écrit en 2020 par Grażyna Stasińska de l'Observatoire de Paris (France) et revu par Nikos Prantzos de l'Institut d'Astrophysique de Paris.

Image de couverture : extrait d'un tableau de l'artiste japonais KAGAYA



Pour en savoir plus sur cette collection et sur les thèmes présentés dans ce mini-livre tu peux visiter

<http://www.tuimp.org>

TUIMP Creative Commons

