



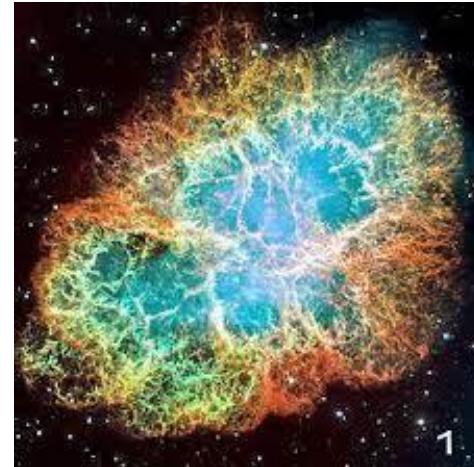
ASSOCIATION
DE MAILLET

Vivre mieux!



Club d'astronomie

Caroline H



Création de la matière

Jean-Pierre Maratrey - Août 2009 – MAJ octobre 2024

Au menu

Généralités

Composition de la matière

Les réactions nucléaires

Genèse de la matière

Nucléosynthèse primordiale

Nucléosynthèse stellaire

Cycle p-p

Cycle CNO

Conclusion

Au menu

Généralités

Composition de la matière

Les réactions nucléaires

Genèse de la matière

Nucléosynthèse primordiale

Nucléosynthèse stellaire

Cycle p-p

Cycle CNO

Conclusion

Généralités

Notion simple jusqu'au début du 20^{ème} siècle :

Matière = substance, réalité tangible constitutive des corps (\neq esprit), douée de propriétés physiques.

Vision macroscopique :

Caractérisée par son état (gaz, liquide, solide), selon la densité de ses constituants. Des propriétés y sont associées comme la pression et la température.

Vision à une échelle beaucoup plus petite :

Constituée d'électrons, de neutrons et de protons. Ces deux derniers étant faits de quarks.

Caractéristiques corpusculaires et ondulatoires, comme la lumière.

Au menu

Généralités

Composition de la matière

Les réactions nucléaires

Genèse de la matière

Nucléosynthèse primordiale

Nucléosynthèse stellaire

Cycle p-p

Cycle CNO

Conclusion

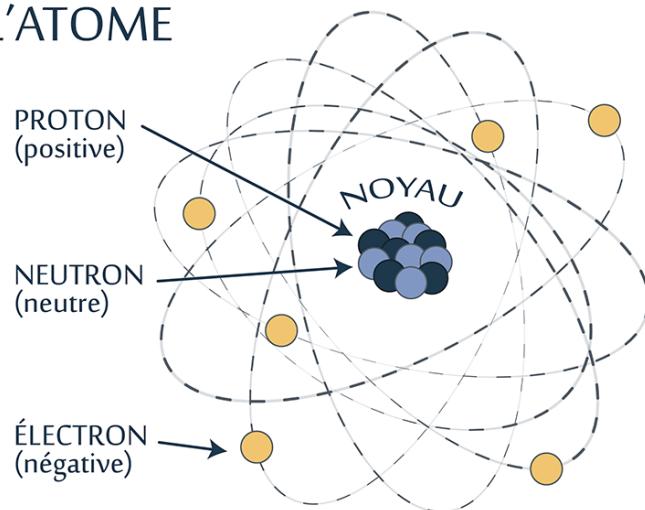
Composition de la matière

Elle est constituée de molécules, assemblages plus ou moins compliqués d'atomes.

Ex : l'eau H₂O, le gaz carbonique CO₂, le méthane CH₄, l'alcool C₂H₅OH, etc.

Un atome, c'est un noyau (protons et neutrons) autour duquel « tournent » des électrons.

L'ATOME



Masse du proton \approx masse du neutron ($1,67 \cdot 10^{-27}$ kg)

Masse de l'électron = masse du proton/1830.

Rayon d'un atome : 10^{-10} m. Rayon du noyau : 10^{-15} m

Exemple pour l'hydrogène : si le noyau est une bille de 1 cm de diamètre, les électrons tournent à 1 km !

L'atome est plein de « vide »...

Physique nucléaire : étude des noyaux d'atomes.

Chimie : Etude des relations entre atomes, par l'interaction des électrons des couches périphériques.

Composition de la matière

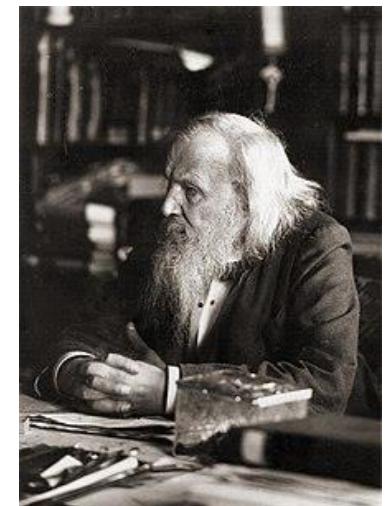
Dans un atome neutre : $p = e^-$.

Le nombre de protons est caractéristique de la nature de l'atome.

Ce nombre est le numéro atomique A. Le nombre de protons + neutrons est la masse atomique Z. Par exemple :

Hydrogène : 1 proton, pas de neutron	A = 1	Z = 1
Hélium : 2 protons, 2 neutrons	A = 2	Z = 4
Carbone : 6 protons, 6 neutrons	A = 6	A = 12
Fer : 26 protons, 30 neutrons	A = 26	Z = 56
Uranium : 92 protons, 143 neutrons	A = 92	Z = 235

Tous les éléments (naturels + ceux créés par l'Homme) sont regroupés dans le « tableau périodique des éléments » de Mendeleiev (1834-1907)



Composition de la matière

1 1a H	2 IIa Be	3 IIIa B	4 IVa C	5 Va N	6 VIa O	7 VIIa F	8 VIIIB Ne	9 VIIIB Ar	10 Ib S	11 Ib Cl	12 IIb Br	13 IIIA Al	14 IVa Si	15 Va P	16 VIa S	17 VIIa Cl	18 VIIIA Kr
3 Li	4 Mg	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
11 Na	12 Mg	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
19 K	20 Ca	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn	
37 Rb	38 Sr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt										
55 Cs	56 Ba	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu	
89 Fr	90 Ra	90 Ac	91 Th	92 Pa	93 U	94 Np	95 Pu	96 Am	97 Cm	98 Bk	99 Cf	100 Es	101 Fm	102 Md	103 No	104 Lr	

Au menu

Généralités

Composition de la matière

Les réactions nucléaires

Genèse de la matière

Nucléosynthèse primordiale

Nucléosynthèse stellaire

Cycle p-p

Cycle CNO

Conclusion

Les réactions nucléaires

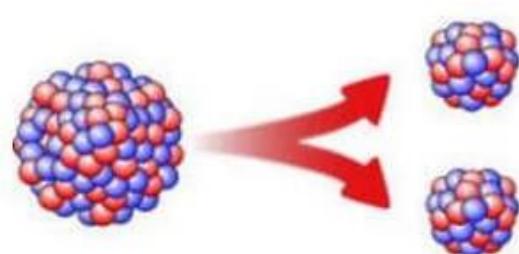
Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme (Lavoisier 1743-1794).

Les réactions nucléaires suivent ce principe universel.



Les deux sortes de réactions nucléaires :

Fission



Réacteurs, bombes

Fusion



Etoiles

Au menu

Généralités

Composition de la matière

Les réactions nucléaires

Genèse de la matière

Nucléosynthèse primordiale

Nucléosynthèse stellaire

Cycle p-p

Cycle CNO

Conclusion

Genèse de la matière

Evolution de la matière sur Terre, jusqu'à la vie :

- | | |
|---------------|--|
| Big-bang | <ul style="list-style-type: none">✓ Fabrication des neutrons et protons✓ Fabrication des noyaux d'atomes✓ Fabrication des atomes : H, He, Li, Be |
| Etoiles | <ul style="list-style-type: none">✓ Complexification des atomes |
| Espace, Terre | <ul style="list-style-type: none">✓ Fabrication de molécules à partir des atomes |
| Espace | <ul style="list-style-type: none">✓ Complexification des molécules (acides aminés, protéines...) |
| Terre | <ul style="list-style-type: none">✓ Spécialisation des molécules✓ Fabrication des cellules✓ Complexification et spécialisation des cellules |

Genèse de la matière

Nucléosynthèse primordiale

Fabrication de noyaux d'atomes lors des premiers instants après le Big-bang.

Très peu de temps après le temps T_0 , à un millionième de seconde, la taille de l'Univers est celle du système solaire, et sa composition est la suivante :

- ✓ Beaucoup de rayonnement
- ✓ Des quarks
- ✓ Des électrons

$T \approx 10\ 000$ milliards de degrés. Celle-ci baisse par l'effet de l'expansion, les quarks se combinent par trois et forment les neutrons et les protons.

Au bout de 3 minutes, la température se refroidissant, les neutrons et protons se combinent pour former les premiers noyaux de Deutérium, de Tritium, d'Hélium 3, d'Hélium 4 et un peu d'éléments plus lourds comme le Lithium et le Béryllium.

Genèse de la matière

Nucléosynthèse primordiale

Du fait de l'expansion et du refroidissement de l'univers, les particules ne se rencontrent plus, et les autres réactions de fusion ne peuvent avoir lieu. On s'arrête à H, He, Li, Be et quelques isotopes.

Les proportions sont les suivantes (en masse) :

Hydrogène : 75 %

Hélium : 24 %

Li, Be, isotopes : 1 %

La nucléosynthèse s'arrête là !

Pour fabriquer le reste des noyaux d'atomes de la classification périodique, il faut des conditions de température et de pression plus favorables.

Les étoiles apportent ces conditions.

Mais avant, vers 10 000 degrés, les noyaux vont commencer à capturer des électrons et former les atomes neutres.

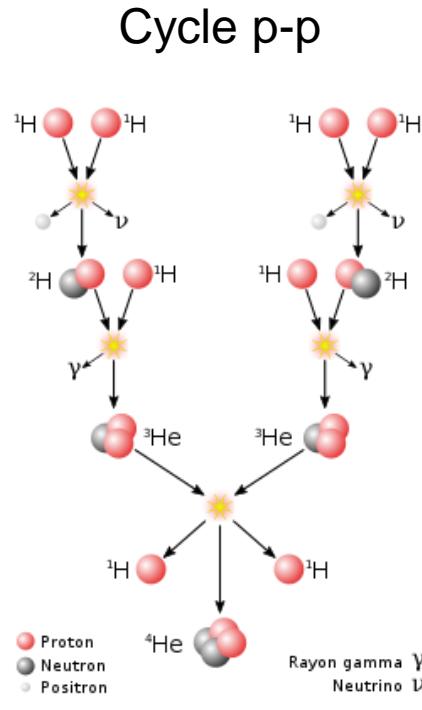
Toutes les captures seront terminées 380 000 ans après le Big-bang. L'univers est alors à 3 000 degrés.

Genèse de la matière

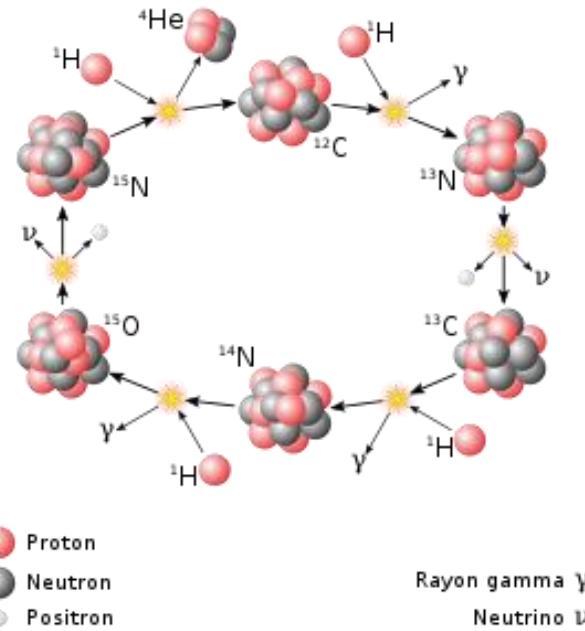
Nucléosynthèse stellaire

Le cœur des étoiles est le siège de réactions nucléaires. Pendant la vie de l'étoile (séquence principale), de l'hélium est formé à partir d'hydrogène.

Une étoile de type solaire vit environ 10 milliards d'années. Deux types de réactions permettent de passer de 4 H à 1 He :



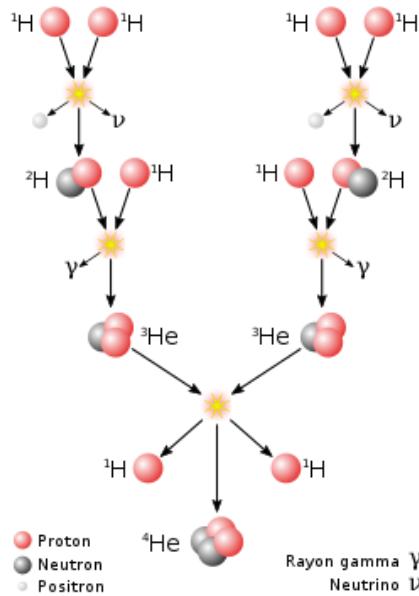
Cycle CNO



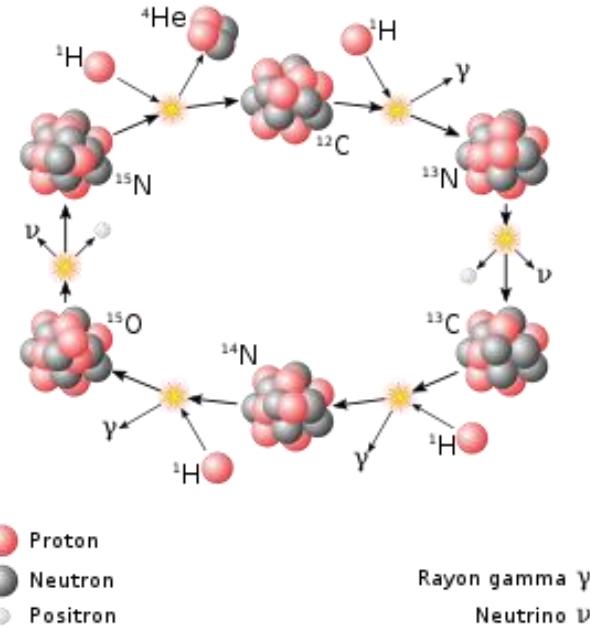
Genèse de la matière

Nucléosynthèse stellaire

Cycle p-p



Cycle CNO



La première réaction ($\text{H} \rightarrow \text{D}$) est très peu probable : rencontre de 2 protons + transformation de l'un en neutron. Probabilité : 1 évènement sur 10^{20} !

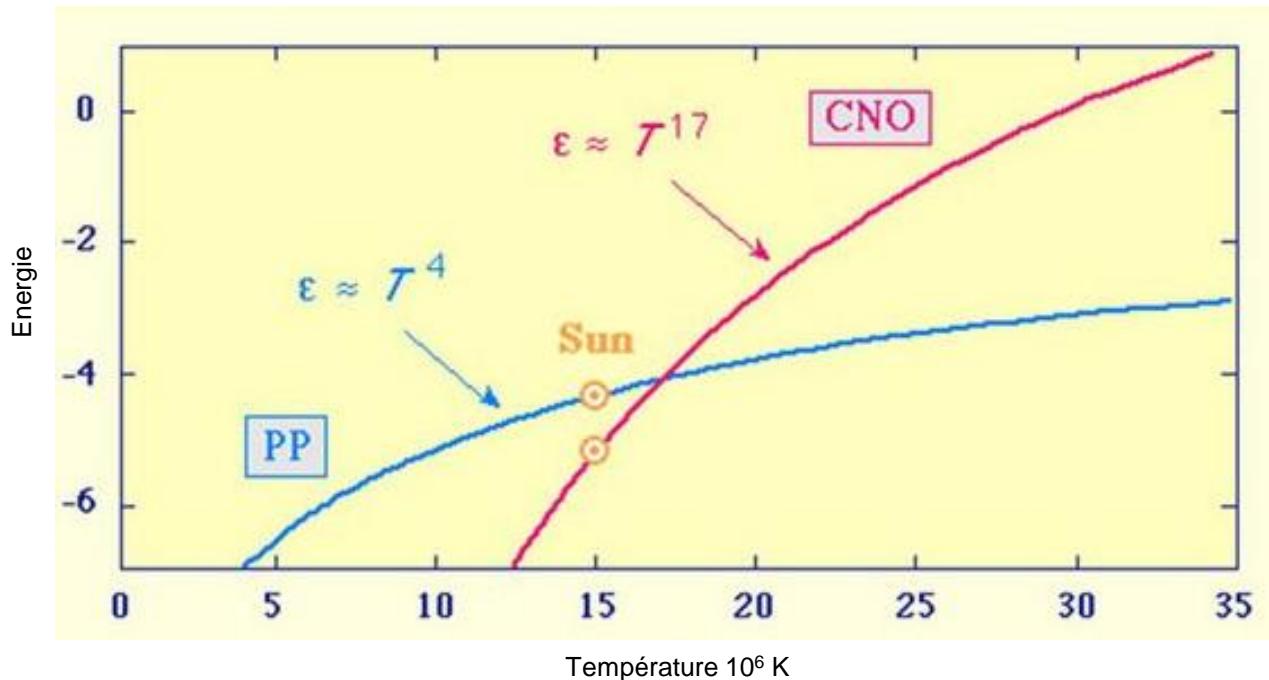
Le Soleil contient environ 10^{60} protons. La réaction est donc courante...

Dans ce cycle, les noyaux C, N et O servent de catalyseurs. Ils se retrouvent intacts à la fin de la réaction.

Genèse de la matière

Nucléosynthèse stellaire

Les 2 cycles sont en concurrence et leur proportion varie avec la température :



Dans le Soleil, le cycle p-p est majoritaire.
A partir de 16/17 millions de degrés, c'est le cycle CNO que l'emporte.

A noter que les premières étoiles ne contiennent pas de C, ni N, ni O. Seul le cycle p-p agit.

Genèse de la matière

Nucléosynthèse stellaire

Dans sa vie (séquence principale), une étoile ne fabrique que de l'hélium. D'où viennent les autres éléments ?

C'est la mort de l'étoile qui les produit.

Cas des étoiles de type solaire :

Lorsque l'hydrogène est épuisé, l'équilibre de l'étoile est rompu, le cœur se contracte sous l'effet de la gravité.

Sa température augmente et fait se déclencher la fusion de l'hélium. C et O sont ainsi principalement produits.

Pendant cette fusion, les couches externes de l'étoile s'éloignent du centre dans un premier temps (phase géante rouge), puis sont soufflées pour devenir une nébuleuse planétaire, avec un résidu très dense (le Soleil réduit à la taille de la Terre, 1 cm³ pèse 1 tonne) appelé naine blanche.

Elle se refroidira avec le temps, en formant des réseaux cristallins de carbone et oxygène.

Genèse de la matière

Nucléosynthèse stellaire

Cas des étoiles massives (>10 Ms) :

Lorsque l'étoile est suffisamment massive, la fusion de C et O se fait.

Le cœur se contracte encore et les produits de fusion de l'hélium fusionnent à leur tour. On fabrique ainsi F, Na, Mg, Al, Si, P, S... jusqu'au fer. Là s'arrêtent les réactions nucléaires, car aller plus loin demande de l'énergie.

Cette énergie est fournie par la gravité pour une étoile massive. Le cœur se contracte alors rapidement et l'étoile explose en supernova.

C'est au cours de cette explosion que les éléments lourds (jusqu'à U) sont fabriqués, puis expulsés dans l'espace (rémanant de supernova).

Lors de l'explosion, les noyaux sont cassés, désintégrés par les photons très énergétique (rayons gamma). Le résidu est une étoile à neutrons.

Au menu

Généralités

Composition de la matière

Les réactions nucléaires

Genèse de la matière

Nucléosynthèse primordiale

Nucléosynthèse stellaire

Cycle p-p

Cycle CNO

Conclusion

Conclusion

Big-bang → H et He

Etoiles solaires → jusqu'à O

Etoiles massives → Tous les éléments jusqu'à U

Conclusion

Ainsi se forment, en fin de vie des étoiles, tous les noyaux naturels du tableau périodique. Les éléments légers dans les étoiles peu massives comme le Soleil, les éléments plus lourds dans les étoiles massives.

Les premiers sont éjectés lors de la phase nébuleuse planétaire, les seconds avec les supernovas.

Cette matière est mise à disposition dans les nuages de gaz et poussières, et formera de nouvelles étoiles qui fabriqueront à leur tour la matière que nous connaissons, génération d'étoile après génération d'étoile.

L'Univers s'enrichit ainsi au cours du temps, et les étoiles contiennent à leur naissance de plus en plus de « métaux », ce qui modifie légèrement leurs caractéristiques.

Ces éléments de la nature sont présents partout dans l'Univers, et en particulier sur la Terre.

Ils composent les objets qui nous entourent et notre corps, ce qui fait dire à Hubert Reeves que nous sommes des « poussières d'étoiles ».



ASSOCIATION
DE MAILLET



Club d'astronomie

Caroline H

