

Source d'énergie du Soleil

Quel processus physique?

Contenu énergétique du Soleil

Luminosité du Soleil : $L = 3.9 \cdot 10^{26} \text{ J.s}^{-1} \text{ (W)}$

Masse du Soleil : $M = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

➤ contenu énergétique : $L/M = 2 \cdot 10^{-4} \text{ J.s}^{-1}.\text{kg}^{-1}$

Première possibilité: combustion

Production domestique de lumière et de chaleur sur Terre: **feu** d'une cheminée, barbecue, etc., soit une combustion de bois, charbon, ...

➤ processus chimique

Source d'énergie solaire

Processus chimique?



Source d'énergie du Soleil

Processus chimique?

Charbon: excellent combustible

Rendement calorifique du charbon: $R = 30\,000 \text{ kJ/kg}$

- L/M : quantité d'énergie par unité de temps et par unité de masse
- R : quantité d'énergie par unité de masse
- donc M kg de charbon produisent pendant un temps Dt une quantité d'énergie L Dt avec un rendement R , soit: $L / M = R / Dt$

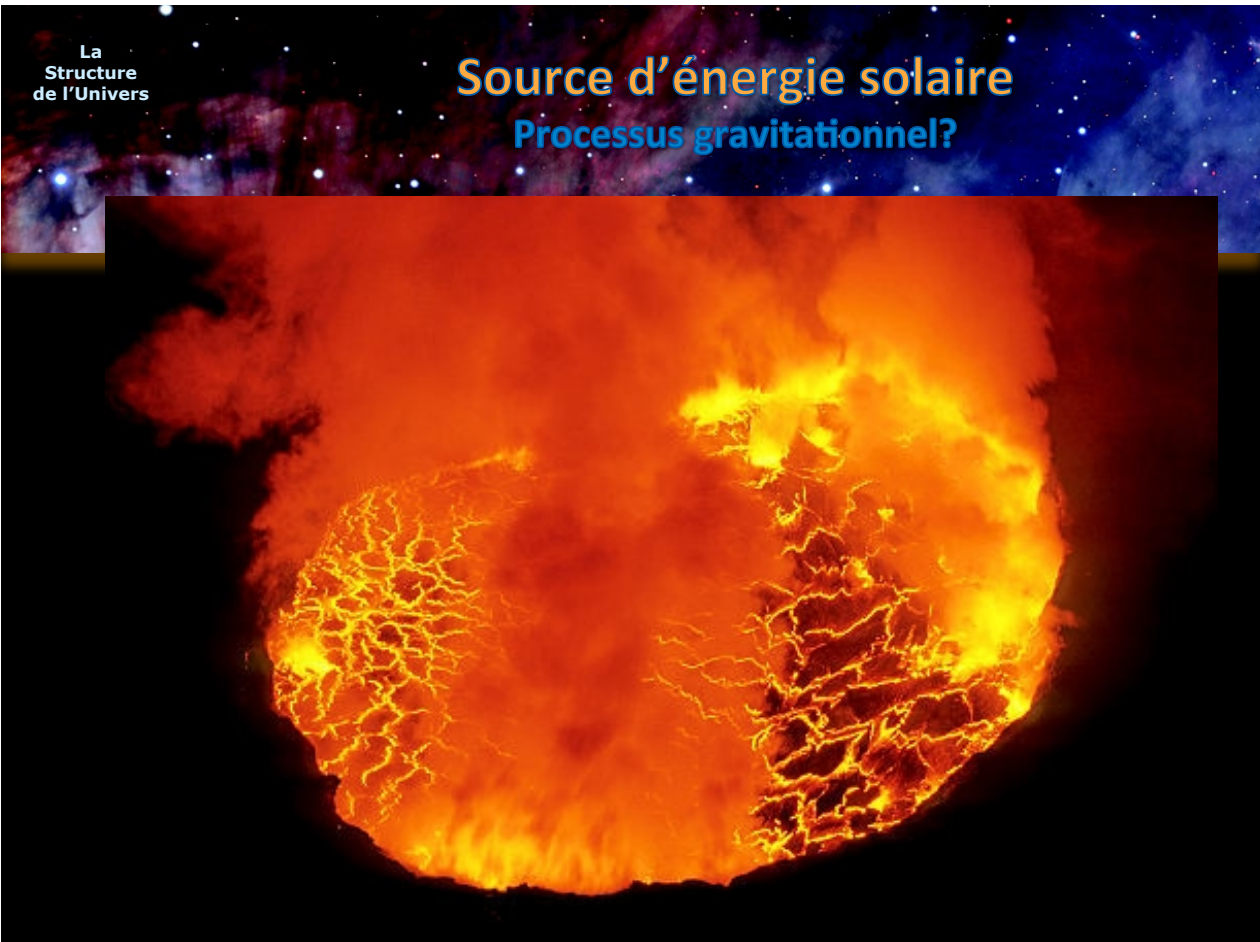
➤ $Dt = 1.5 \cdot 10^{11} \text{ s} = 5000 \text{ ans !}$

Camille Flammarion, *Astronomie Populaire* (1879)

« Si le soleil était composé de charbon de terre massif brûlant dans l'oxygène pur, il ne pourrait brûler pendant plus de six mille ans sans être entièrement consumé: il serait donc éteint depuis l'origine des temps historiques »

Source d'énergie solaire

Processus gravitationnel?





Processus géologique: dès 100 km de profondeur, les conditions de pression et de température permettent la fusion partielle du manteau terrestre (magma)

Le poids (**force gravitationnelle**) des couches externes est la cause de processus énergétiques (ici transformation de phase): idée pour le Soleil? avec $M_{\text{Soleil}} \gg M_{\text{Terre}}$

Quel rendement calorifique peut-on obtenir de la transformation de **l'énergie potentielle gravitationnelle** du Soleil en énergie thermique?

Mécanisme de Kelvin-Helmholtz (1860)

- équilibre hydrostatique du Soleil: la pression interne contrebalance la gravité
- la luminosité évacue une partie de la chaleur interne
- refroidissement à l'intérieur du Soleil : pression interne plus basse
- la gravité prend le pas sur la pression interne: le Soleil se contracte
- la contraction fait augmenter le pression interne
- l'équilibre hydrostatique est rétabli, le cycle redémarre avec un Soleil plus petit



Energie libérée lorsqu'une masse ΔM tombe dans le champ gravitationnel d'une masse M , depuis l'infini (où elle se trouvait au repos) jusqu'à la distance r du centre de la masse M :

$$E_g = -G \frac{M \Delta M}{r}$$

Energie rayonnée pendant l'effondrement de ΔM depuis r_i jusqu'à r_f :

$$DE_g = - (E_f - E_i)$$

Supposons $r_i \gg r_f = R_s$ (rayon du Soleil), alors:

$$DE_g \approx - E_f \approx G M_s \Delta M / R_s \approx G M_s^2 / R_s \approx 4 \cdot 10^{41} \text{ J}$$

- **Energie totale rayonnée** pour aboutir à un Soleil de masse M_s et rayon R_s par un phénomène de contraction gravitationnelle

Source d'énergie du Soleil

Gravitation?

Age du Soleil

Rendement calorifique lors d'une production d'énergie DE_g par une masse M_s :

$$R = DE_g / M_s = 2 \cdot 10^{11} \text{ J/kg}$$

La masse M_s a produit pendant un temps Dt une quantité d'énergie $L Dt$ avec un rendement R , soit $L Dt = M_s R$ ou encore :

$$Dt = (M_s / L) \times (DE_g / M_s) = 10^{15} \text{ s}$$

➤ le Soleil aurait alors un âge de **30 millions d'années**

Trop court par rapport aux estimations de l'âge de la Terre basées sur la vitesse de sédimentation typique: **700 millions d'années** au minimum !

Source d'énergie solaire

Processus nucléaire?

$$E = mc^2$$

Source d'énergie du Soleil *Processus nucléaire?*

Troisième possibilité: équivalence énergie-matière

Production d'énergie par les centrales nucléaires: la fission d'un noyau d'atome lourd produit des nucléides plus légers et de l'énergie => transposable au Soleil?

Energie nucléaire: l'énergie dégagée lors d'un processus nucléaire correspond au *défaut de masse*, c'est la formule d'Einstein (1905) : $DE = Dm c^2$

Rendement calorifique de l'équivalence énergie-masse

Une masse m de matière complètement convertie en énergie DE :

$$R = DE / m = c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ J/kg} \quad (\text{charbon: } R = 3 \cdot 10^7 \text{ J/kg !})$$

Le Soleil dans son entièreté (masse M) pourrait maintenir sa production d'énergie L avec ce rendement R pendant:

$$Dt = (M / L) \times R = 4.5 \cdot 10^{20} \text{ s} = \mathbf{15 \text{ mille milliards d'années !}}$$

Comment convertir masse en énergie dans le Soleil?



Le Soleil n'est certainement pas composé de matière fissile en grande quantité: uranium, neptunium, plutonium, ... sont des éléments très rares

➤ l'élément le plus abondant est l'**hydrogène** (le plus léger)



Réaction de fusion nucléaire de l'hydrogène

Transformation de 4 noyaux d'atomes d'hydrogène (4 x 1 proton) en 1 noyau d'atome d'hélium (1 x 2 protons+2 neutrons) : **fusion de l'hydrogène**



Rendement calorifique de la fusion de l'hydrogène : masses nucléaires

Masse du noyau ^1H = masse du proton = $1 m_p = 1.6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1.007 \text{ uma}$

1 unité de masse atomique = $1/12$ masse atome $^{12}\text{C} = 1 \text{ uma} = 1.66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Masse du noyau ^4He = $4.001 \text{ uma} = 3.9726 m_p$

Attention: masse des noyaux ! La masse nucléaire est différente de la masse atomique mentionnée dans les tableaux de Mendeleïev, car cette dernière inclut la masse des électrons (moins leur énergie de liaison)

$$m_e / m_p = 5.45 \cdot 10^{-4}$$



Rendement calorifique de la fusion de l'hydrogène : défaut de masse

La transformation de 4 noyaux d'hydrogène ($1 m_p$) en 1 noyau d'hélium ($3.9726 m_p$) s'accompagne d'un **défaut de masse** de :

$$(4 \times 1 - 3.9726) m_p = 0.0274 m_p$$

Ce défaut de masse correspond à une **libération d'énergie** de $0.0274 m_p \times c^2$ joule = énergie produite par une masse de $(4 m_p)$ kg de noyaux ^1H

La combustion de chaque kg de noyaux d'hydrogène s'accompagne donc de la libération de :

$$R = 0.0274 m_p \times c^2 / 4 = \mathbf{6.17 \cdot 10^{14} \text{ J}}$$

Durée de production d'énergie solaire à partir d'1/10 de sa masse

$$Dt = (0.1 M / L) \times R = 3 \cdot 10^{17} \text{ s} = \mathbf{10 \text{ milliards d'années}} \quad (\text{compatible avec géologie})$$

Fusion de l'hydrogène

Conditions nécessaires

Cycle de réactions

La plausibilité de faire interagir **4 noyaux** d'hydrogène au même endroit au même moment est nulle...

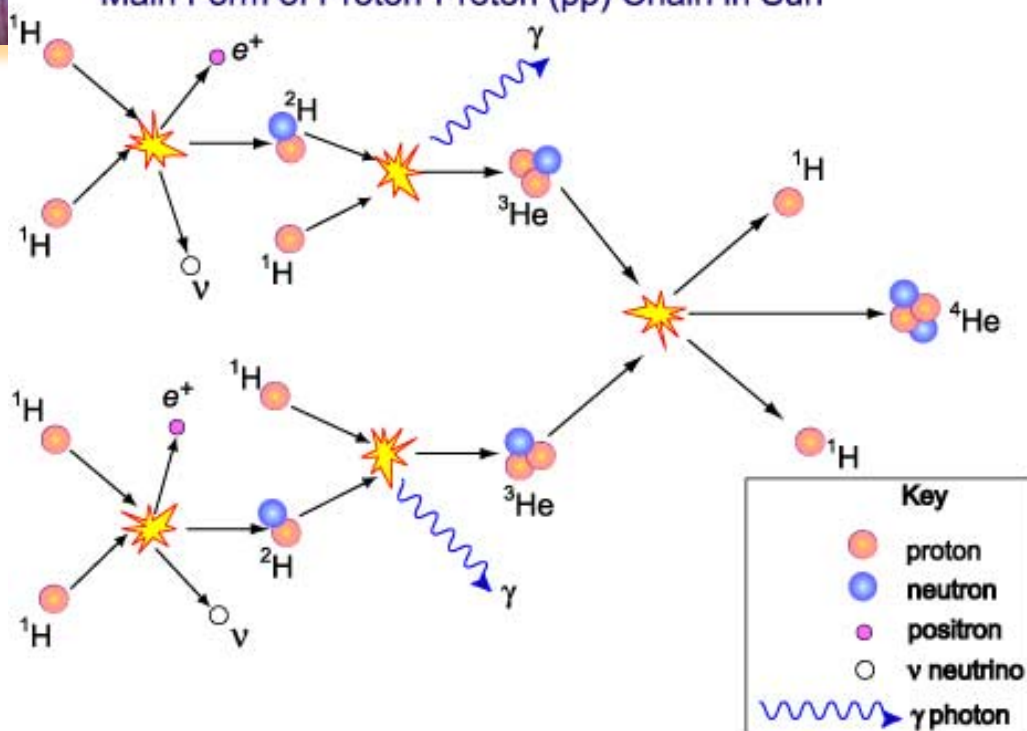
La réaction « 4 protons => 1 noyau hélium » est en réalité une **équation-bilan**

➤ en détails: **cycle p-p** (proton-proton)

Cycle p-p

Collisions ${}^1\text{H}-{}^1\text{H}$, ${}^2\text{H}-{}^1\text{H}$, ${}^3\text{He}-{}^3\text{He}$

Main Form of Proton-Proton (pp) Chain in Sun



La Structure de l'Univers

Fusion de l'hydrogène

Conditions nécessaires

Cycle de réactions

La plausibilité de faire interagir **4 noyaux** d'hydrogène au même endroit au même moment est nulle...

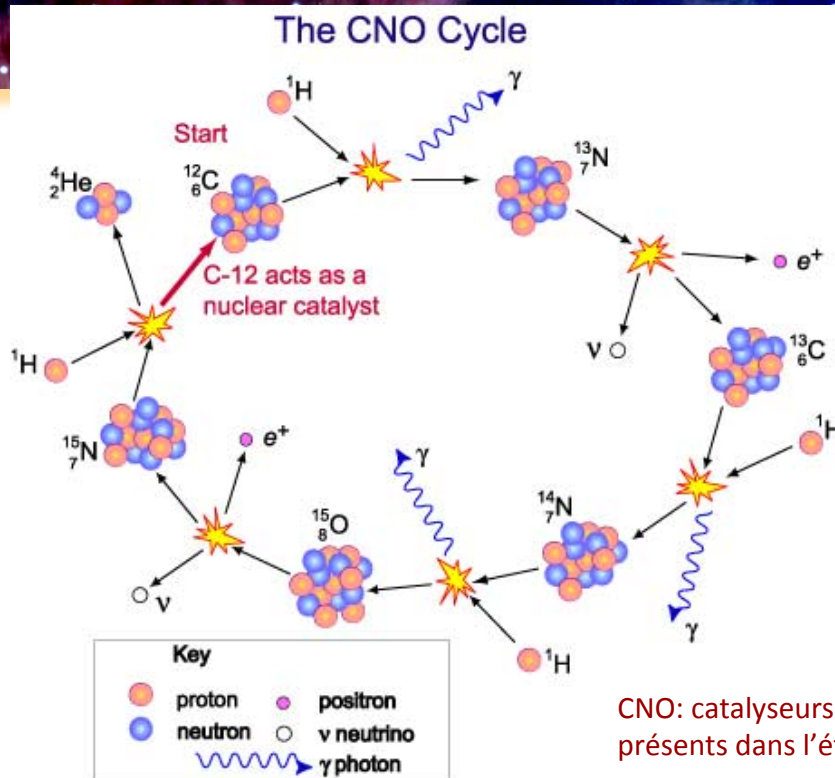
La réaction « 4 protons => 1 noyau hélium » est en réalité une **équation-bilan**

➤ en détails: cycle p-p et **cycle CNO**

La Structure de l'Univers

Cycle CNO

Collisions $^{12}\text{C}-^1\text{H}$, $^{13}\text{C}-^1\text{H}$, $^{14}\text{N}-^1\text{H}$, $^{15}\text{N}-^1\text{H}$



CNO: catalyseurs initialement présents dans l'étoile



La plausibilité de faire interagir **4 noyaux** d'hydrogène au même endroit au même moment est nulle...

La réaction « 4 protons => 1 noyau hélium » est en réalité une **équation-bilan**

➤ en détails: **cycle p-p** et **cycle CNO**

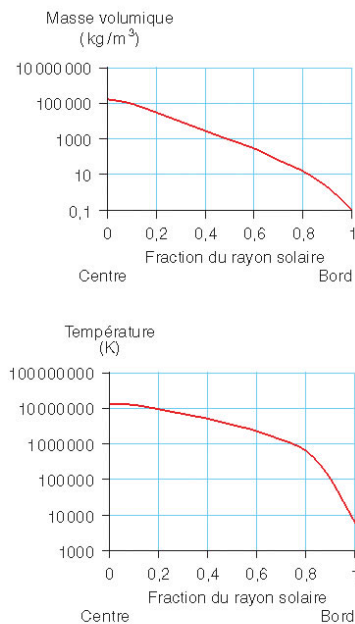
Comment permettre les collisions?

Les protons et noyaux sont chargés positivement: **répulsion coulombienne!**

Heureusement, l'**interaction forte** (cohésion des noyaux) est plus forte que l'interaction électromagnétique (répulsion)

Mais elle est de **courte portée**... Il faut une grande agitation thermique

➤ il y a collision si **la densité et la température sont suffisamment grandes**



Equilibre hydrostatique: la température, la pression et la densité **augmentent** avec la profondeur

➤ à **10 millions de degrés K**, le cycle p-p peut débuter (90% de la production d'énergie dans le Soleil)

➤ à **15 millions de degrés K**, le cycle CNO peut débuter (10% de la production d'énergie dans le Soleil)

Figure 6.4
Modèle théorique de la masse volumique et de la température à l'intérieur du Soleil.



Le Soleil (et les étoiles) sont des réacteurs de **fusion thermonucléaire** autorégulés par la gravitation

- haute température au cœur $T_c \Rightarrow$ haute pression P_c thermique qui s'oppose à l'effet de compression de la gravité : **équilibre hydrostatique**

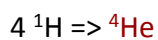
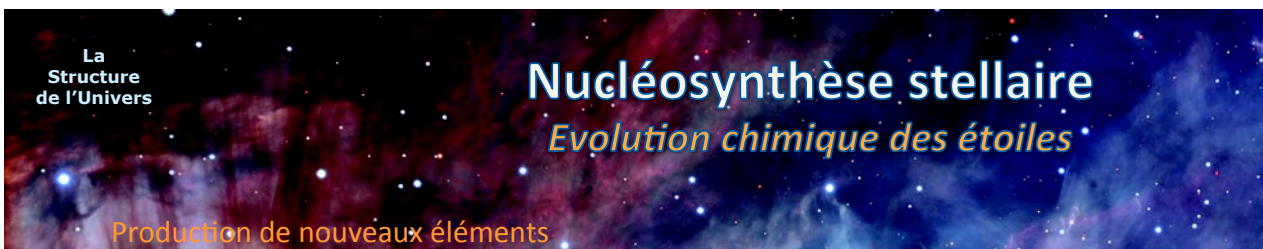
- si la production d'énergie e baisse, la température T_c et donc la pression P_c baissent, le cœur se contracte sous l'effet de la gravité, ce qui fait augmenter la densité et donc la température T , ce qui augmente la production d'énergie $e =$ **autorégulation**

Combustion de l'hydrogène en hélium

Au cœur du Soleil, la proportion de noyaux d'hydrogène **diminue** au profit de celle de noyaux d'hélium

Combustible H épuisé? $e \rightarrow 0 \Rightarrow$ contraction du cœur $\Rightarrow T_c \nearrow$

➤ à de plus hautes températures, de **nouvelles réactions** se produisent



combustion H

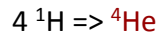
$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$

cycle p-p

Nucléosynthèse stellaire

Evolution chimique des étoiles

Production de nouveaux éléments



combustion H

$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$

$T > 15 \cdot 10^6 \text{ K}$

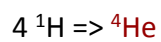
cycle p-p

cycle CNO

Nucléosynthèse stellaire

Evolution chimique des étoiles

Production de nouveaux éléments



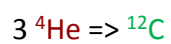
combustion H

$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$

$T > 15 \cdot 10^6 \text{ K}$

cycle p-p

cycle CNO



combustion He

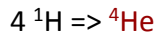
$T > 100 \cdot 10^6 \text{ K}$

réaction 3 α

Nucléosynthèse stellaire

Evolution chimique des étoiles

Production de nouveaux éléments



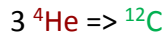
combustion H

$$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$$

$$T > 15 \cdot 10^6 \text{ K}$$

cycle p-p

cycle CNO



combustion He

$$T > 100 \cdot 10^6 \text{ K}$$

réaction 3a

forte répulsion coulombienne ! (noyau : Z protons)

Rappel: conservation charge et nombre de nucléons lors des réactions nucléaires

- bilan nombre de protons:

Z :

$$6 + 2 = 8$$

- bilan nombre de nucléons:

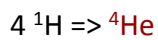
A:

$$12 + 4 = 16$$

Nucléosynthèse stellaire

Evolution chimique des étoiles

Production de nouveaux éléments



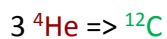
combustion H

$$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$$

$$T > 15 \cdot 10^6 \text{ K}$$

cycle p-p

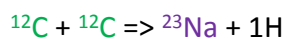
cycle CNO



combustion He

$$T > 100 \cdot 10^6 \text{ K}$$

réaction 3a



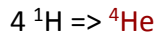
combustion C

$$T > 600 \cdot 10^6 \text{ K}$$

Nucléosynthèse stellaire

Evolution chimique des étoiles

Production de nouveaux éléments



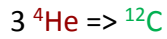
combustion H

$$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$$

$$T > 15 \cdot 10^6 \text{ K}$$

cycle p-p

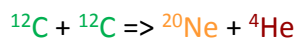
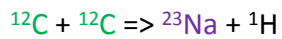
cycle CNO



combustion He

$$T > 100 \cdot 10^6 \text{ K}$$

réaction 3a



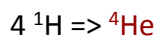
combustion C

$$T > 600 \cdot 10^6 \text{ K}$$

Nucléosynthèse stellaire

Evolution chimique des étoiles

Production de nouveaux éléments



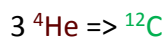
combustion H

$$T > 10 \cdot 10^6 \text{ K}$$

$$T > 15 \cdot 10^6 \text{ K}$$

cycle p-p

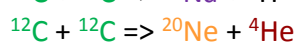
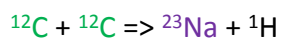
cycle CNO



combustion He

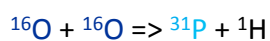
$$T > 100 \cdot 10^6 \text{ K}$$

réaction 3a



combustion C

$$T > 600 \cdot 10^6 \text{ K}$$



combustion O

$$T > 1.5 \cdot 10^9 \text{ K}$$

Nucléosynthèse stellaire

Evolution chimique des étoiles

Production de nouveaux éléments

$4\ ^1\text{H} \Rightarrow\ ^4\text{He}$	combustion H	$T > 10\ 10^6\ \text{K}$ $T > 15\ 10^6\ \text{K}$	cycle p-p cycle CNO
$3\ ^4\text{He} \Rightarrow\ ^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C} +\ ^4\text{He} \Rightarrow\ ^{16}\text{O}$	combustion He	$T > 100\ 10^6\ \text{K}$	réaction 3a
$^{12}\text{C} +\ ^{12}\text{C} \Rightarrow\ ^{23}\text{Na} +\ ^1\text{H}$ $^{12}\text{C} +\ ^{12}\text{C} \Rightarrow\ ^{20}\text{Ne} +\ ^4\text{He}$	combustion C	$T > 600\ 10^6\ \text{K}$	
$^{16}\text{O} +\ ^{16}\text{O} \Rightarrow\ ^{31}\text{P} +\ ^1\text{H}$ $^{16}\text{O} +\ ^{16}\text{O} \Rightarrow\ ^{28}\text{Si} +\ ^4\text{He}$ $^{16}\text{O} +\ ^{16}\text{O} \Rightarrow\ ^{31}\text{S} +\ \text{n}$ $^{16}\text{O} +\ ^{16}\text{O} \Rightarrow\ ^{32}\text{S}$	combustion O	$T > 1.5\ 10^9\ \text{K}$	

Nucléosynthèse stellaire

Evolution chimique des étoiles

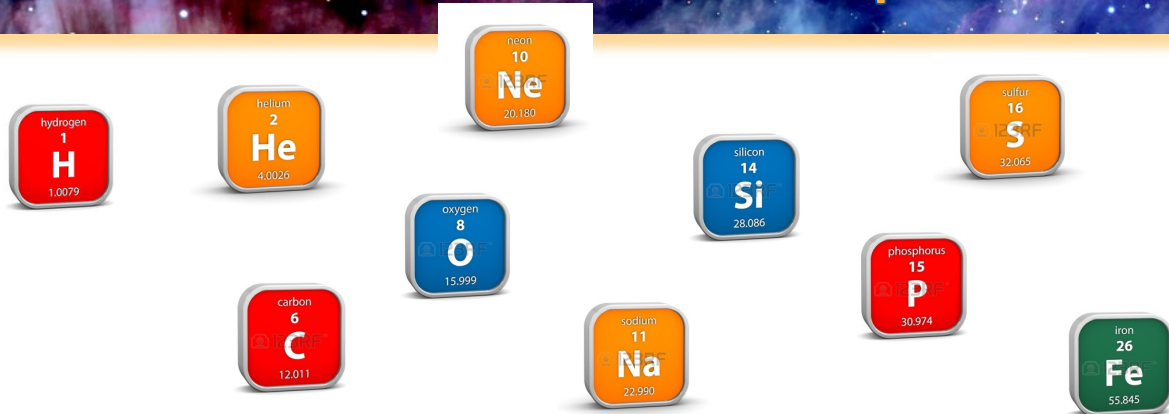
Production de nouveaux éléments

$4\ ^1\text{H} \Rightarrow\ ^4\text{He}$	combustion H	$T > 10\ 10^6\ \text{K}$ $T > 15\ 10^6\ \text{K}$	cycle p-p cycle CNO
$3\ ^4\text{He} \Rightarrow\ ^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C} +\ ^4\text{He} \Rightarrow\ ^{16}\text{O}$	combustion He	$T > 100\ 10^6\ \text{K}$	réaction 3a
$^{12}\text{C} +\ ^{12}\text{C} \Rightarrow\ ^{23}\text{Na} +\ ^1\text{H}$ $^{12}\text{C} +\ ^{12}\text{C} \Rightarrow\ ^{20}\text{Ne} +\ ^4\text{He}$	combustion C	$T > 600\ 10^6\ \text{K}$	
$^{16}\text{O} +\ ^{16}\text{O} \Rightarrow\ ^{31}\text{P} +\ ^1\text{H}$ $^{16}\text{O} +\ ^{16}\text{O} \Rightarrow\ ^{28}\text{Si} +\ ^4\text{He}$ $^{16}\text{O} +\ ^{16}\text{O} \Rightarrow\ ^{31}\text{S} +\ \text{n}$ $^{16}\text{O} +\ ^{16}\text{O} \Rightarrow\ ^{32}\text{S}$	combustion O	$T > 1.5\ 10^9\ \text{K}$	
$^{28}\text{Si} +\ ^4\text{He} +\ ^4\text{He} +\ \dots \Rightarrow\ ^{56}\text{Fe}$	combustion Si	$T > 3\ 10^9\ \text{K}$	

➤ peuplement du tableau de Mendeleïev

La Structure de l'Univers

Création de nouveaux éléments chimiques



Mécanisme de nucléosynthèse : fin du combustible => contraction du cœur => augmentation de la température => nouvelles réactions nucléaires

La production d'énergie par les réactions nucléaires (Eddington 1920) implique une **modification** progressive de la composition chimique de l'étoile

➤ jusqu'où peut-on aller?

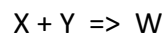
La Structure de l'Univers

Réaction nucléaire

Energie d'une réaction

Défaut de masse d'une réaction nucléaire

On peut généraliser le concept de **défaut de masse** à n'importe quelle réaction nucléaire :



Energie de la réaction : $E = (m_X + m_Y - m_W) c^2$

$$Z_X + Z_Y = Z_W \quad (\text{conservation du nombre de protons } Z)$$

$$A_X + A_Y = A_W \quad (\text{conservation du nombre de nucléons } A = Z + N)$$

L'énergie de la réaction peut s'écrire en fonction du **défaut de masse propre** à chaque noyau atomique

➤ défaut de masse du noyau X : $(Z_X m_p + N_X m_n) - m_X$

Energie de la réaction X+Y => W:

$$E = \underbrace{(m_X - Z_X m_p - N_X m_n + m_Y - Z_Y m_p - N_Y m_n - m_W + Z_W m_p + N_W m_n)}_{\text{défaut masse noyau X}} c^2$$



Le **défaut de masse propre à chaque noyau atomique** permet donc de calculer les énergies des réactions nucléaires dans lesquelles ce noyau intervient

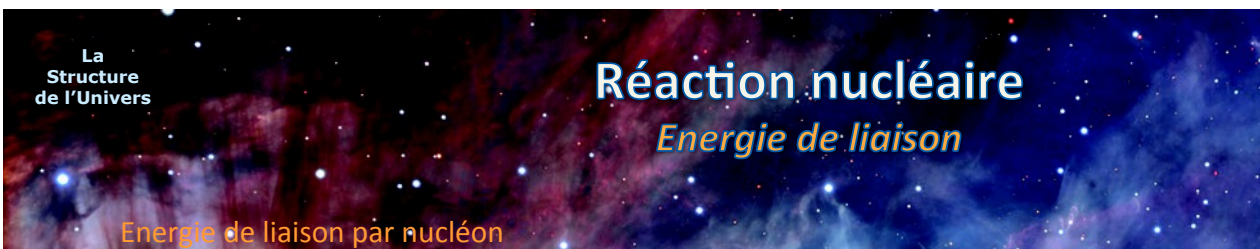
La masse d'un noyau est **toujours inférieure** à la somme des masses de ses constituants: le défaut de masse d'un noyau est **positif**

➤ défaut de masse d'un noyau atomique : $(Z m_{\text{proton}} + N m_{\text{neutron}}) - m_{\text{noyau}} > 0$

On peut définir, de manière analogue, la **masse par nucléon** du noyau :

$$M = m_{\text{noyau}} / A < 1$$

Comme la quantité « défaut de masse », la grandeur « masse par nucléon » est propre à **chaque noyau atomique** (chaque élément)



La masse manquante (le défaut de masse) lors de la formation du noyau à partir de ses constituants (neutrons et protons) est **libérée sous forme d'énergie** (photons gamma):

énergie de liaison du noyau : $E_l = [(Z m_{\text{proton}} + N m_{\text{neutron}}) - m_{\text{noyau}}] c^2$

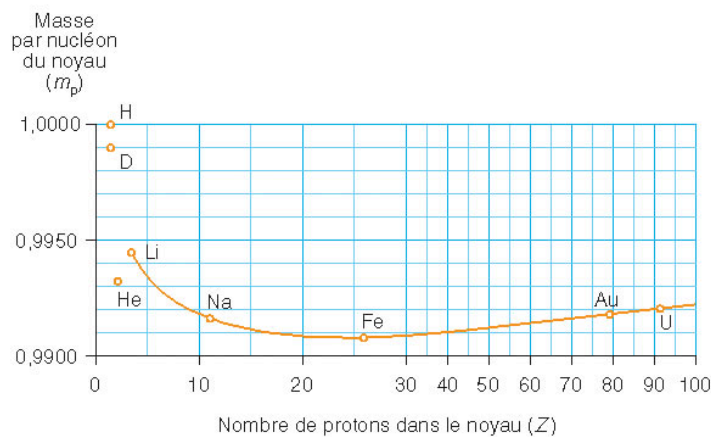
C'est aussi l'énergie qu'il faut fournir au noyau pour le **briser** en ses constituants (neutrons et protons).

On peut déterminer cette énergie pour **chaque** élément (et ses isotopes) A_Z : il suffit juste de connaître m_{noyau}

Pour permettre la comparaison entre différents éléments chimiques (petits et gros noyaux), il est plus judicieux de considérer **l'énergie de liaison par nucléon** pour chaque élément, ou de manière équivalente:

➤ **l'évolution de la masse par nucléon M en fonction de Z**

Masse par nucléon et élément



Courbe présentant un minimum au niveau du fer: le rapport « masse noyau » sur « nombre de masse A » est le plus petit pour le noyau de l'atome de fer

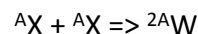
➤ conséquences ?

Réaction nucléaire

Réactions endothermique et exothermique

Noyau-cible et noyau-fille

Soit l'énergie libérée par la fusion de **deux noyaux identiques**:



L'énergie de la réaction est: $E = (m_x + m_x - m_w) c^2$

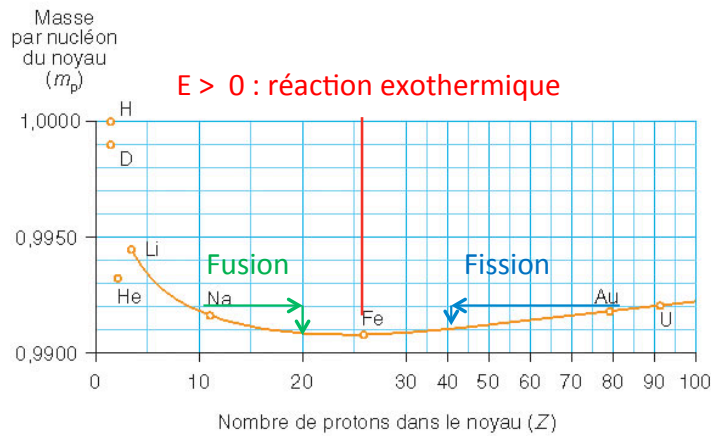
On fait apparaître le paramètre « **masse par nucléon** » $M = m/A$:

$$E = (A M_x + A M_x - 2A M_w) c^2 = 2A (M_x - M_w) c^2$$

L'énergie de la réaction est du **signe de la différence $M_x - M_w$** :

- si masse par nucléon noyau-cible (X) > noyau-fille (W) : énergie positive, réaction exothermique, elle produit de l'énergie
- si masse par nucléon noyau-cible (X) < noyau-fille (W) : énergie négative, réaction endothermique, elle nécessite de l'énergie pour se produire

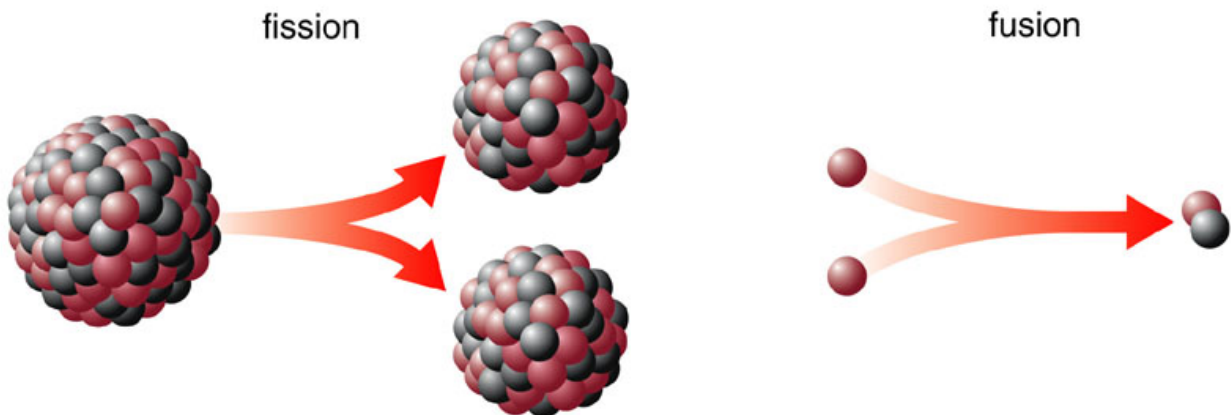
Fusion et fission



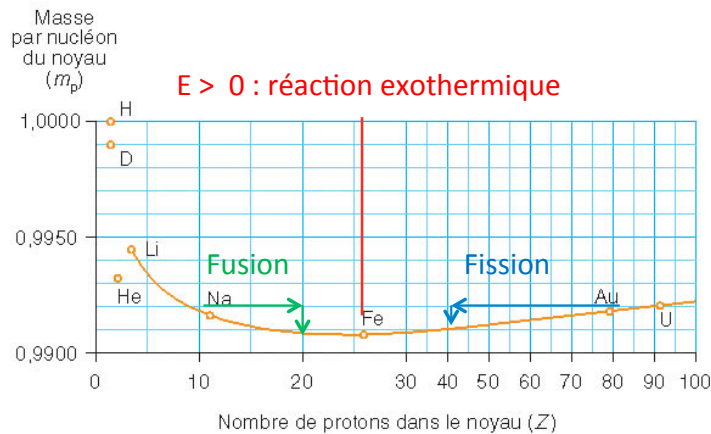
Réaction nucléaire exothermique: en deçà du fer, les réaction de **fusion** produisent de l'énergie; au-delà du fer, les réactions de **fission** produisent de l'énergie

Fusion et fission

Réactions nucléaires exothermiques



Fusion et fission



Réaction nucléaire exothermique: en deçà du fer, les réaction de **fusion** produisent de l'énergie; au-delà du fer, les réactions de **fission** produisent de l'énergie

- le processus de nucléosynthèse stellaire doit a priori **s'arrêter** après la création des noyaux de fer

Nucléosynthèse stellaire

Au-delà du pic du fer

Formation des éléments > Fe

Les **éléments plus lourds que le fer** ne peuvent pas être créés par le processus de fusion thermonucléaire

Existence d'un nouveau processus: **captures successives de neutrons**. Réactions possibles car pas de répulsion coulombienne (neutralité du neutron) et processus exothermique. Le neutron se transforme ensuite en proton (Z augmente)

- durant les **phases évoluées** de la vie des étoiles

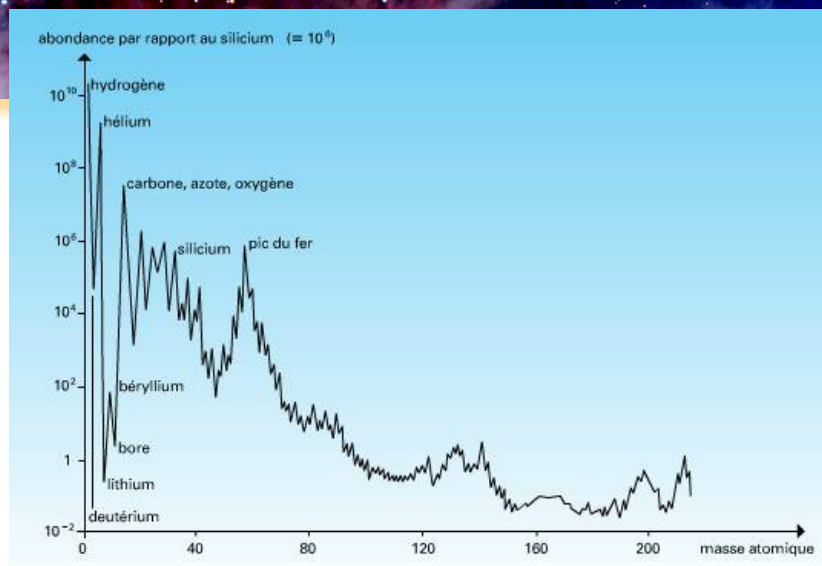
Abondance relative des éléments chimiques

La théorie de la nucléosynthèse explique l'**origine** des éléments chimiques dans l'Univers

Processus physiques de nucléosynthèse **identiques** pour toutes les étoiles:

- la proportion d'abondance entre les différents éléments est donc **fixée** ?

Abondances stellaires des éléments



Spectroscopie solaire et stellaire: détermination des **abondances relatives** des éléments chimiques dans le Soleil et dans les étoiles

➤ **universalité** de la courbe d'abondance stellaire ! (plus ou moins)

Abondances stellaires et non-stellaires

Abondances dans le système solaire

Abondances hors des étoiles

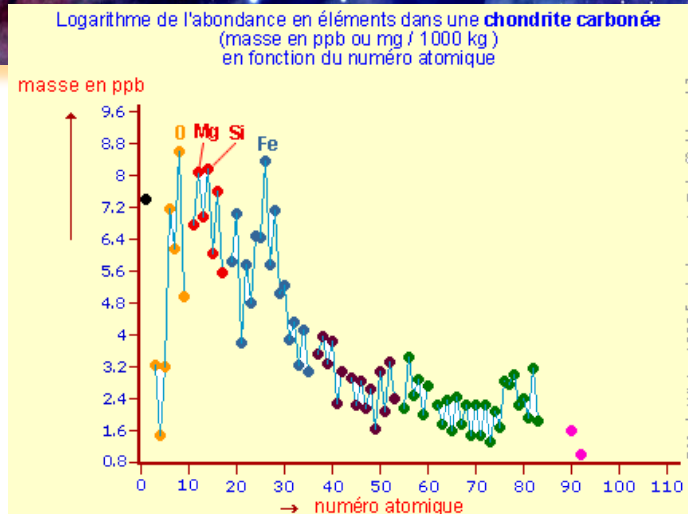
La théorie de la nucléosynthèse explique l'origine et **les abondances relatives** des éléments chimiques dans l'Univers

La courbe d'abondance des éléments chimiques dans les étoiles est (plus ou moins) **universelle**

Comparaison avec les abondances de **corps non-stellaires** ? Dans le système solaire: planètes, astéroïdes, noyaux cométaires, ...

➤ plus facile d'accès et à disposition: **météorites**

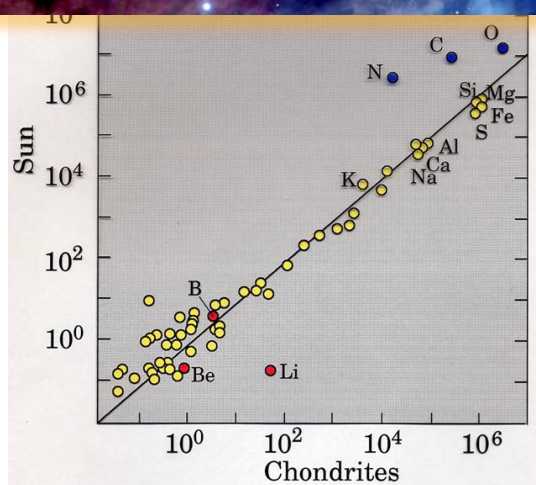
Abondances chondrites carbonées



Météorites « chondrites carbonées »: météorites primitives représentatives de la composition chimique de la nébuleuse protosolaire

- plutôt **rare** (4,6% de l'ensemble des météorites récoltées)

Abondances dans le système solaire

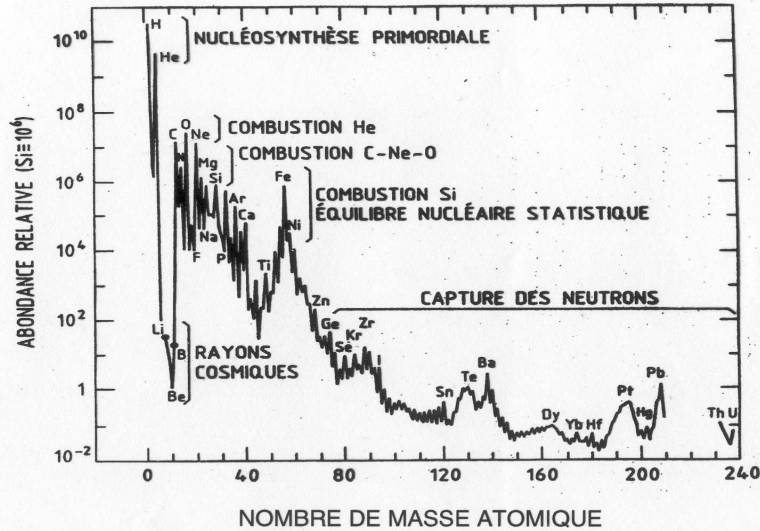


Comparaison abondances Soleil et chondrites carbonées: mêmes proportions des éléments (en dehors des éléments légers)

- **courbe universelle d'abondance des éléments chimiques et de leurs isotopes dans le système solaire !**

Courbe universelle d'abondance des éléments chimiques et de leurs isotopes

Courbe ~ 'universelle'



Les éléments les plus
abondants
sont ceux fabriqués par
les processus de
combustion successifs

Éléments plus lourds que
le fer: capture
successives de neutrons

Pas de nucléosynthèse dans les corps non-stellaires! Pourquoi cette universalité de la courbe d'abondance ?

Phases finales de la vie des étoiles *Enrichissement du milieu interstellaire*

Ejection des produits de la nucléosynthèse

Produits de la nucléosynthèse stellaire éjectés dans le milieu interstellaire à la fin de la vie de l'étoile

➤ "vent" stellaire



La
Structure
de l'Univers

Vent stellaire

Etoile WR124 de type Wolf-Rayet et nébuleuse M1-67

ESO, VLT



La
Structure
de l'Univers

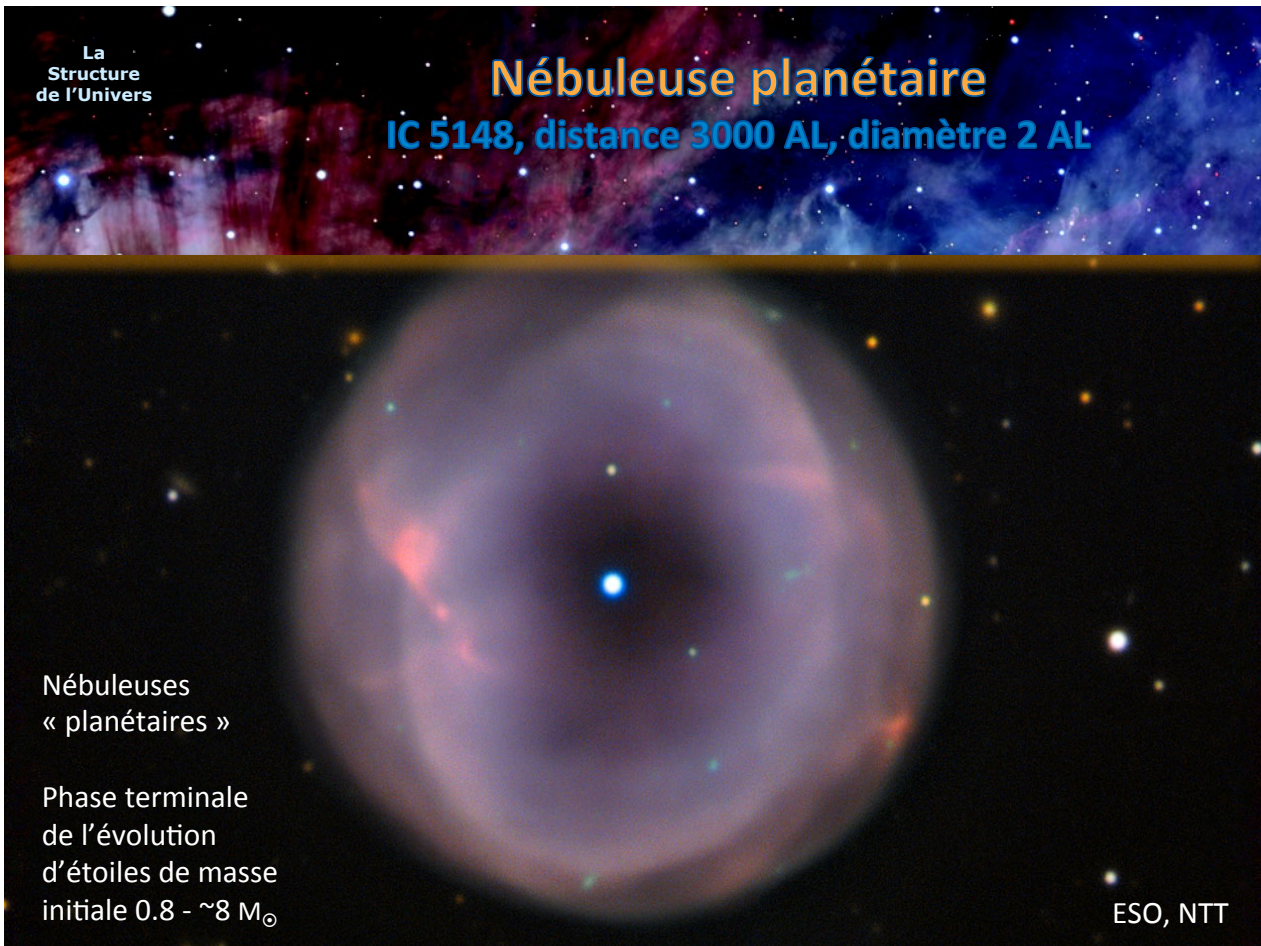
Phases finales de la vie des étoiles

Enrichissement du milieu interstellaire

Ejection des produits de la nucléosynthèse

Produits de la nucléosynthèse stellaire éjectés dans le milieu interstellaire à la fin de la vie de l'étoile

➤ "vent" stellaire, nébuleuses "planétaires"



Produits de la nucléosynthèse stellaire **éjectés dans le milieu interstellaire** à la fin de la vie de l'étoile

- “vent” stellaire, nébuleuses “planétaires”, **explosions supernovae**



Produits de la nucléosynthèse stellaire **éjectés dans le milieu interstellaire** à la fin de la vie de l'étoile

➤ “vent” stellaire, nébuleuses “planétaires”, explosions supernovae

Cycle des étoiles

Les étoiles (et leur cortège: planètes, astéroïdes, ...) se forment à partir d'un **nuage de matière interstellaire**

Le Soleil et les corps du système solaire sont issus de la même **nébuleuse protosolaire** : même abondance des éléments

De manière générale, c'est le résultat du **cycle des étoiles** :
milieu interst. => formation étoiles => prod. éléments => éjection dans le milieu interst.

➤ **évolution chimique de la Galaxie**

