

Les étoiles, creusets du cosmos

Patrick Boissé

Sorbonne Université et
Institut d'Astrophysique de Paris (IAP)

Creuset :

- Récipient servant à faire fondre certaines substances en chimie
- Lieu où diverses choses se mêlent, se fondent

Trois questions :

- Lien entre le Soleil et les étoiles ?
- Source d'énergie du Soleil et des étoiles ?
- Origine des éléments chimiques dans l'Univers ?



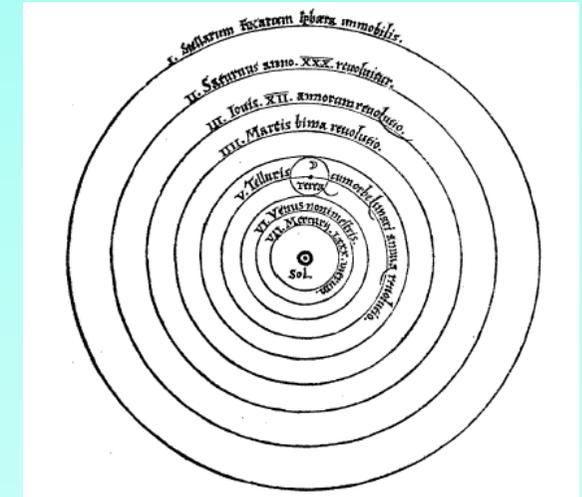
Soleil, Lune, étoiles et planètes

Observation du ciel :

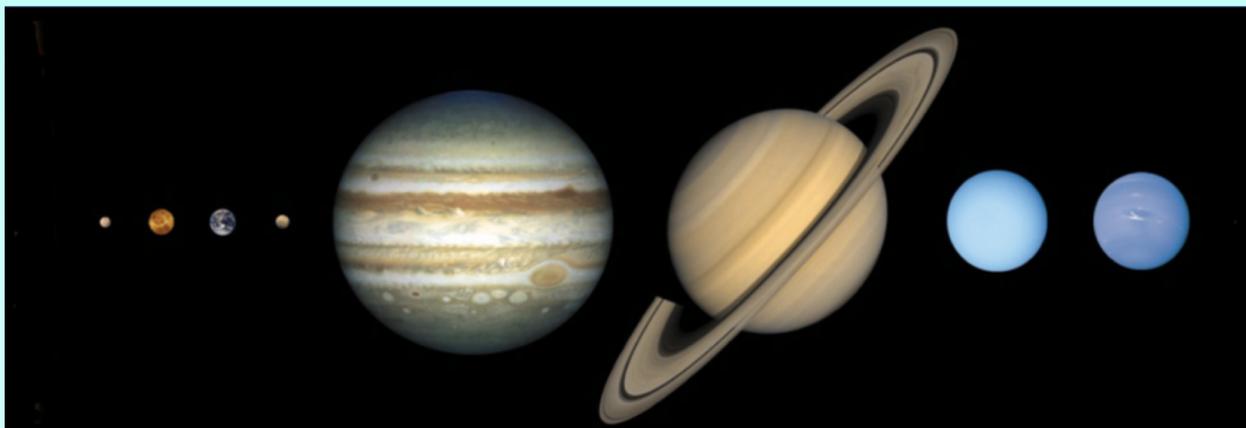
- Soleil et Lune
- points lumineux « fixes » : étoiles
- astres « errants » : planètes
(actuellement : Mars, Jupiter, Saturne)

Géocentrisme → Héliocentrisme

(Aristarque, Copernic (1473-1543), Kepler, Galilée ...)



La Terre : une planète du système solaire !



3 décembre 2022

Etoiles, creusets du cosmos

2

Le soleil, une étoile parmi d'autres ?

Conceptions initiales :

- « Sphère des fixes » (2D, pas de profondeur)
monde immuable, parfait, divin
- Giordano Bruno (1548 – 1600)
« *L'Infini, l'Univers et les Mondes* » : 1584
 - * Adopte le système de Copernic
 - * Univers infini
 - * Étoiles analogues au Soleil
avec des planètes (→ exoplanètes)



Intuitions: comment prouver ?

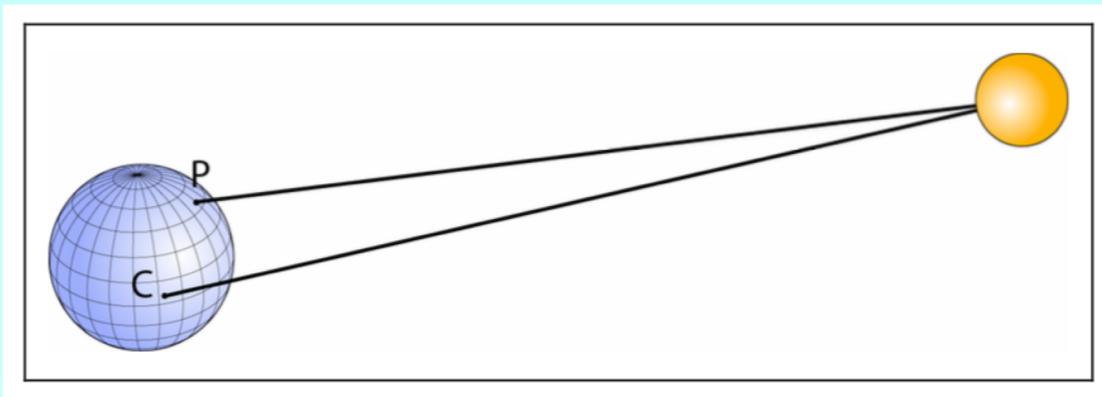
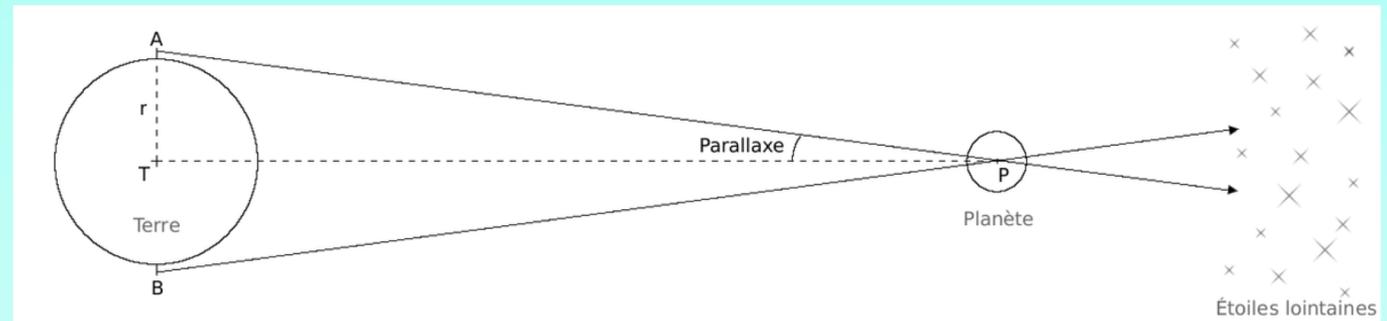
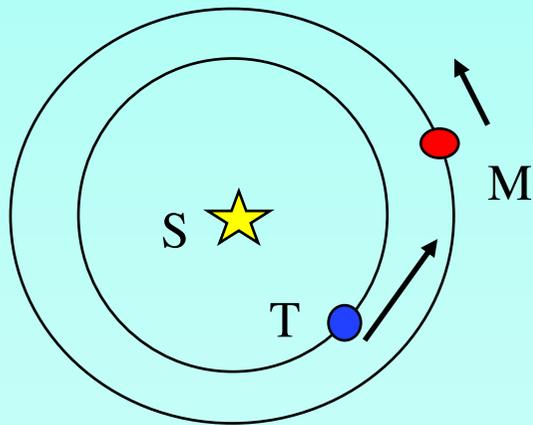
- mesurer de la distance Terre-Soleil
- mesurer de la distance Terre - étoiles

Mesure de la distance Terre - Soleil

Méthode :

- 1) **parallaxe** de Mars au plus près de la Terre
- 2) **3^{ème} loi de Kepler** (relation période – distance pour T et M)

Distance Terre – Soleil = 1,91 x Distance Terre – Mars



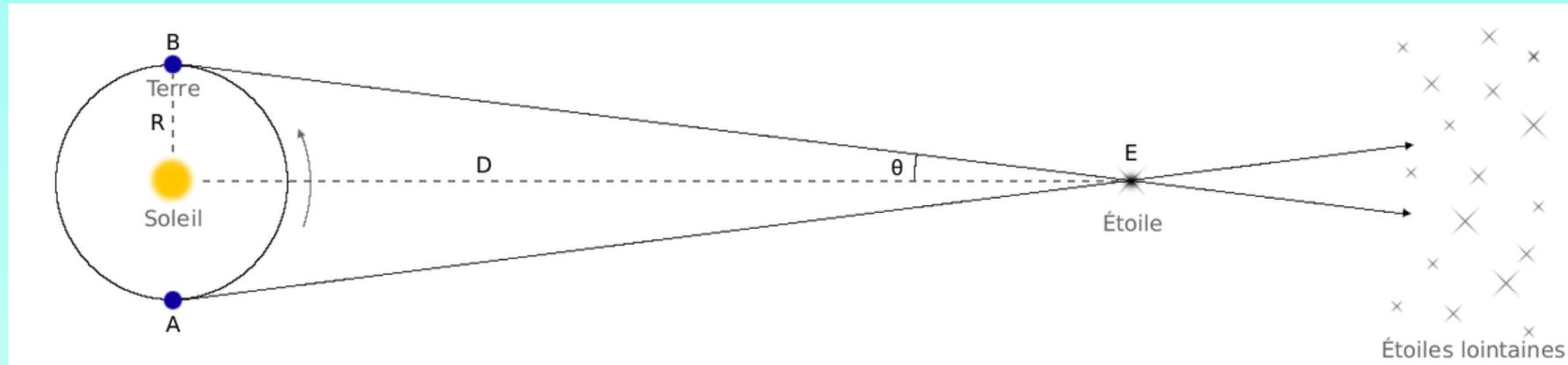
Mesure en 1672 par

- Cassini (Paris) et
- Richer (Cayenne)

$D(T-S) \approx 130$ millions km

Mesure d'une distance Terre - Etoile

Méthode : **parallaxe annuelle** (mesures séparées de ≈ 6 mois)



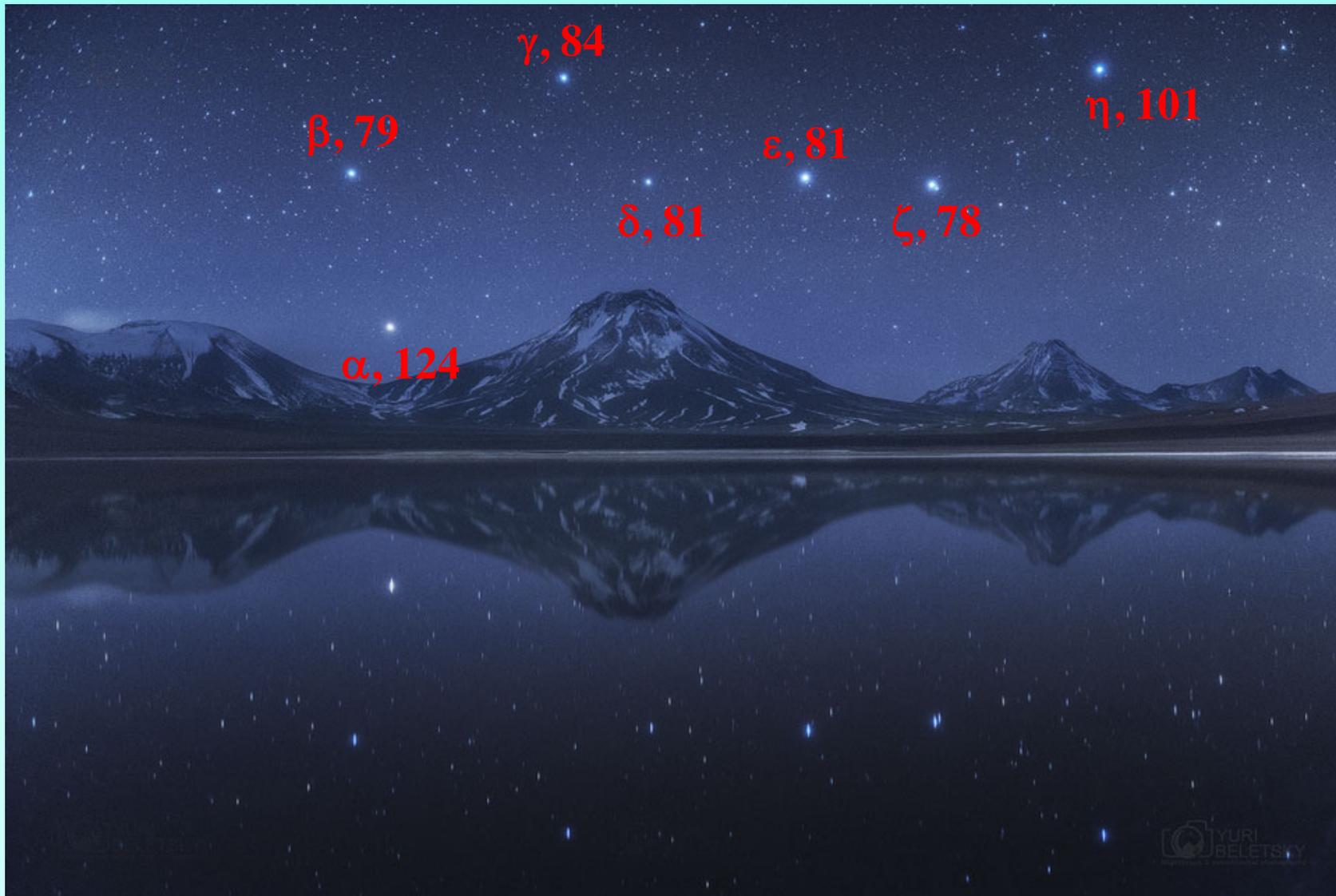
Angles très petits : mesure difficile !

F. Bessel en 1838 pour **61 Cygni** (mouvement propre $\approx 5''$ / an)

Parallaxe = $0,31''$ (soit 1,5 mm à 1 km !) $\rightarrow d = 11,4$ a.l.

61 Cygni est 700 000 fois plus loin que le Soleil \rightarrow très peu brillante

Distance (en a. l.) aux étoiles de la Grande Ourse



Spectre du soleil et des étoiles

En 1814, **Fraunhofer** observe les raies sombres du Soleil, de Vénus et Sirius : fortes ressemblances !



Fraunhofer (1787 - 1826)

A partir de **1859** : identification des raies par **Bunsen et Kirchhoff**

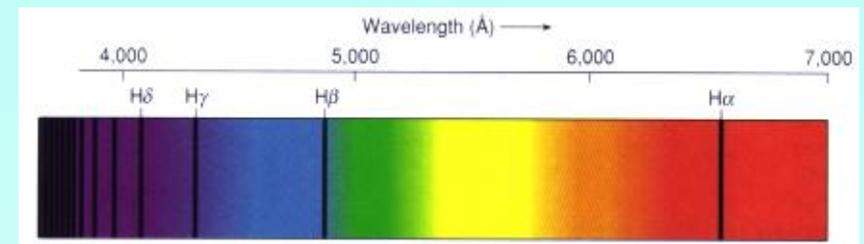
→ **matière analogue / Terre (≠ A. Comte !)**



Raies sombres ≈

« code barre » des éléments.

Atome H →



Spectre du Soleil et d'autres étoiles → astres de même nature

... mais toutes les étoiles ne sont pas identiques.

Diversité des étoiles

Variété des couleurs

- Bleues : très chaudes
- Rouges : plus froides

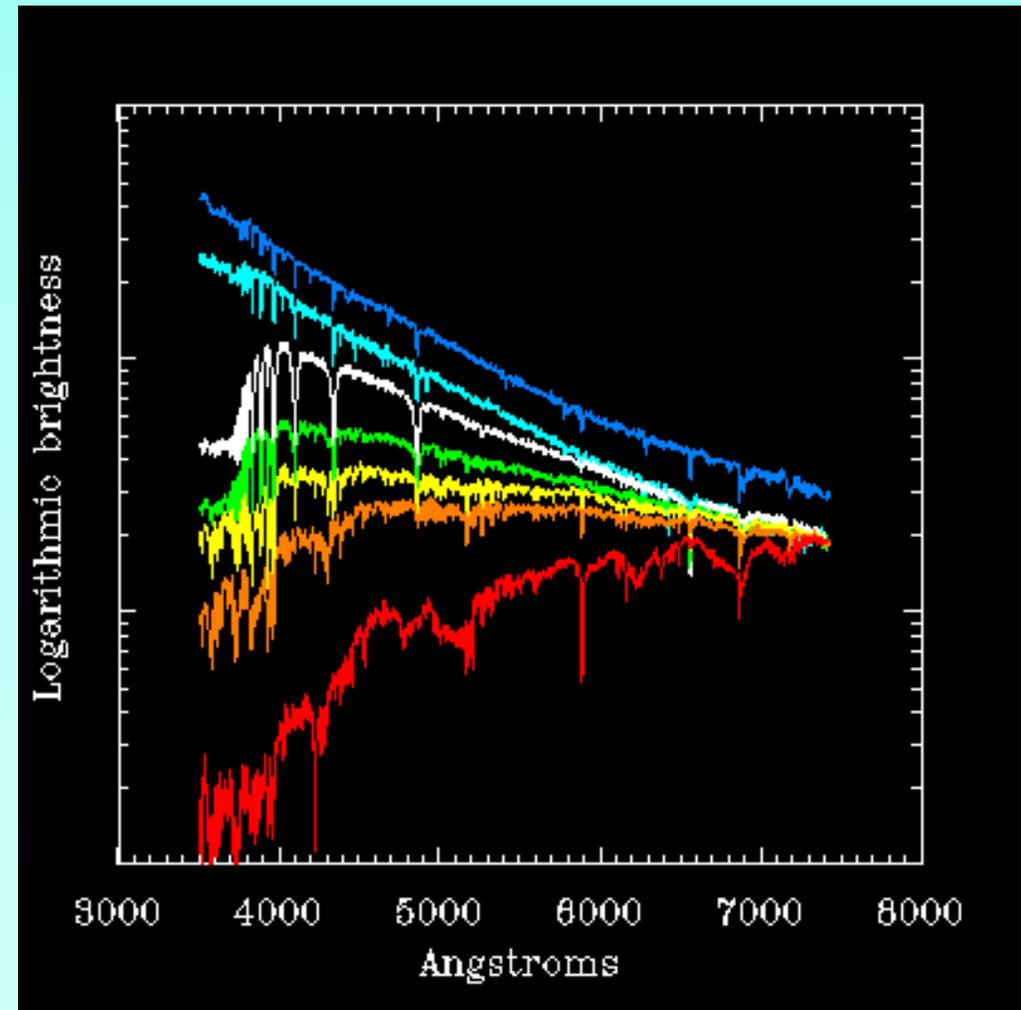
Variété des raies

- température surface
- composition du gaz

Origine de la diversité

- Masses différentes
($\approx 0,1$ à $100 M_{\odot}$)
composition, rotation ...
- Stades d'évolution

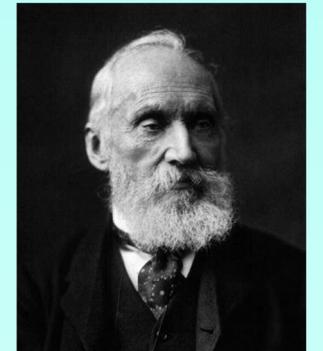
Types stellaires : O, B, A, F, G, K, M



Origine de l'énergie émise par le Soleil

Idées initiales

- **Anaxagore** (450 av. J.C.) : frottement du soleil et des étoiles sur « l'éther »
- **R. Mayer**, principe de conservation de l'énergie (1845)
→ chute de météores (\approx comètes) dans le soleil (1847)
- **H. Helmholtz** : contraction de la nébuleuse présolaire (Kant)
échelle de temps : \approx 30 millions d'années (1854)
- **W. Thompson (Kelvin)**: Soleil chauffé par chute de comètes
puis refroidissement d'une sphère (liquide !) (1850 - 1860)
 \approx 10 à 100 millions d'années

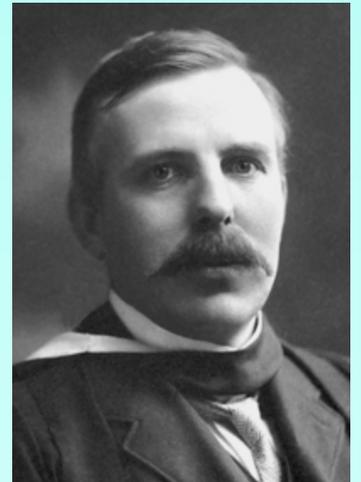


Trop court / échelles de temps géologiques (C. Lyell)

et / échelles du vivant (Darwin) > 300 millions d'années

Origine de l'énergie émise par le Soleil / 2

- **P. Janssen et N. Lockyer** : découverte de l'hélium (1868)
lors d'une éclipse (puis sur Terre : en 1882)
- **H. Becquerel** : découverte radioactivité α de U (1896)
P. et M. Curie : découverte radioactivité Po et Ra (1898)
... mais éléments radioactifs naturels peu abondants dans le soleil.
- **E. Rutherford** : rayons α (noyau He), β (1897)
lois de la radioactivité, utiliser U pour dater (1902)
- **A. Einstein** : équivalence masse-énergie ($E = m c^2$, 1905)
transformation masse \rightarrow énergie, très efficace !
- **Rutherford, Geiger, Marsden** : $\alpha \rightarrow$ feuille d'or (1909 – 1911)
 \Rightarrow taille noyau \approx taille atome /100 000

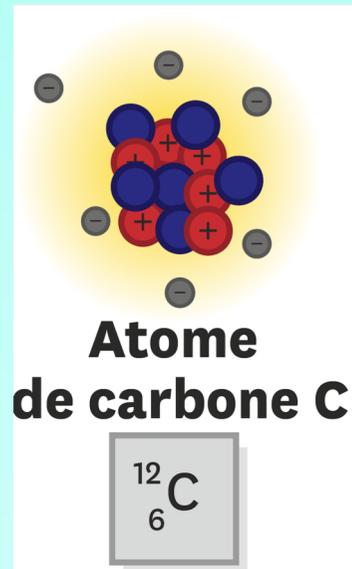
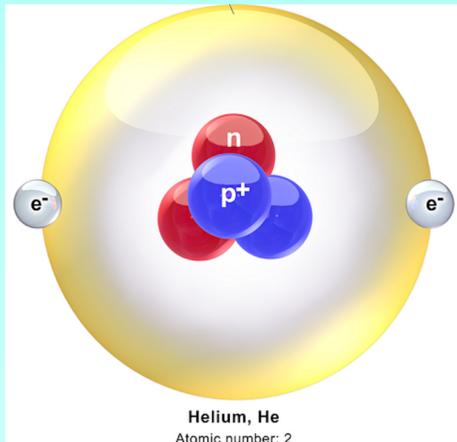


Atomes et particules subatomiques

Dans les années 1920 – 1930 : p, n, e^+, ν (e^- en 1897)

→ vision actuelle de l'atome

- **Atome** = **noyau** { p (+) et n (0)} **et nuage d'électrons** (e^-) autour.
- **Taille des atomes** (1m/10 milliards) et **noyaux** (atome/100 000)



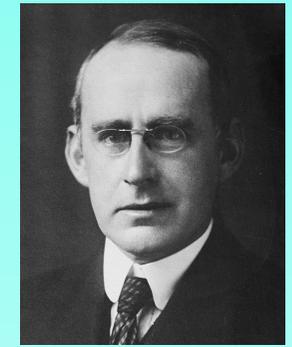
Electrons : liés par force électrique
Propriétés chimique des éléments

Ions si $N(e) \neq N(p)$: $\text{He}^+, \text{C}^{++}$

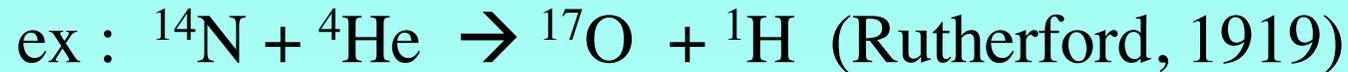
Isotopes selon $N(n)$: ${}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{14}\text{C}$

Nucléons liés par l'interaction forte qui domine la force électrique

Energie des étoiles et réactions nucléaires



Premières réactions nucléaires, ou « transmutations » :



nécessite T très élevée (répulsion noyaux \rightarrow T > millions de degrés)

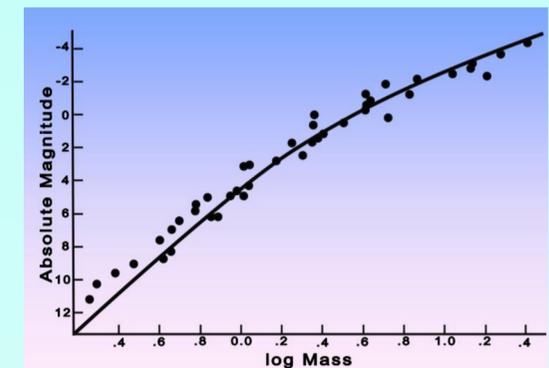
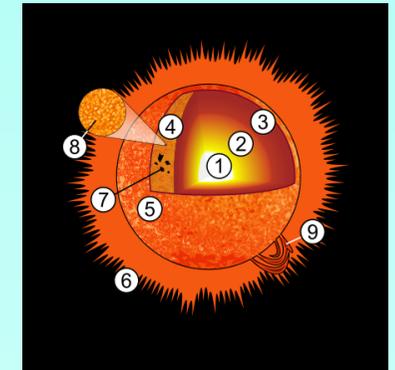
A. Eddington : « modèles » d'étoiles (\approx 1919 – 1926)

- Sphère de gaz en équilibre (symétrie sphérique)
- Forces de gravitation + forces de pression
- Énergie produite : admise
 $p + e^- \rightarrow \text{énergie ?}$ ou $4\ ^1\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + \text{énergie ?}$

\rightarrow pression, densité, température / distance au centre

T(centre) = 18 millions de degrés !

Le modèle prédit la **relation masse – luminosité** :

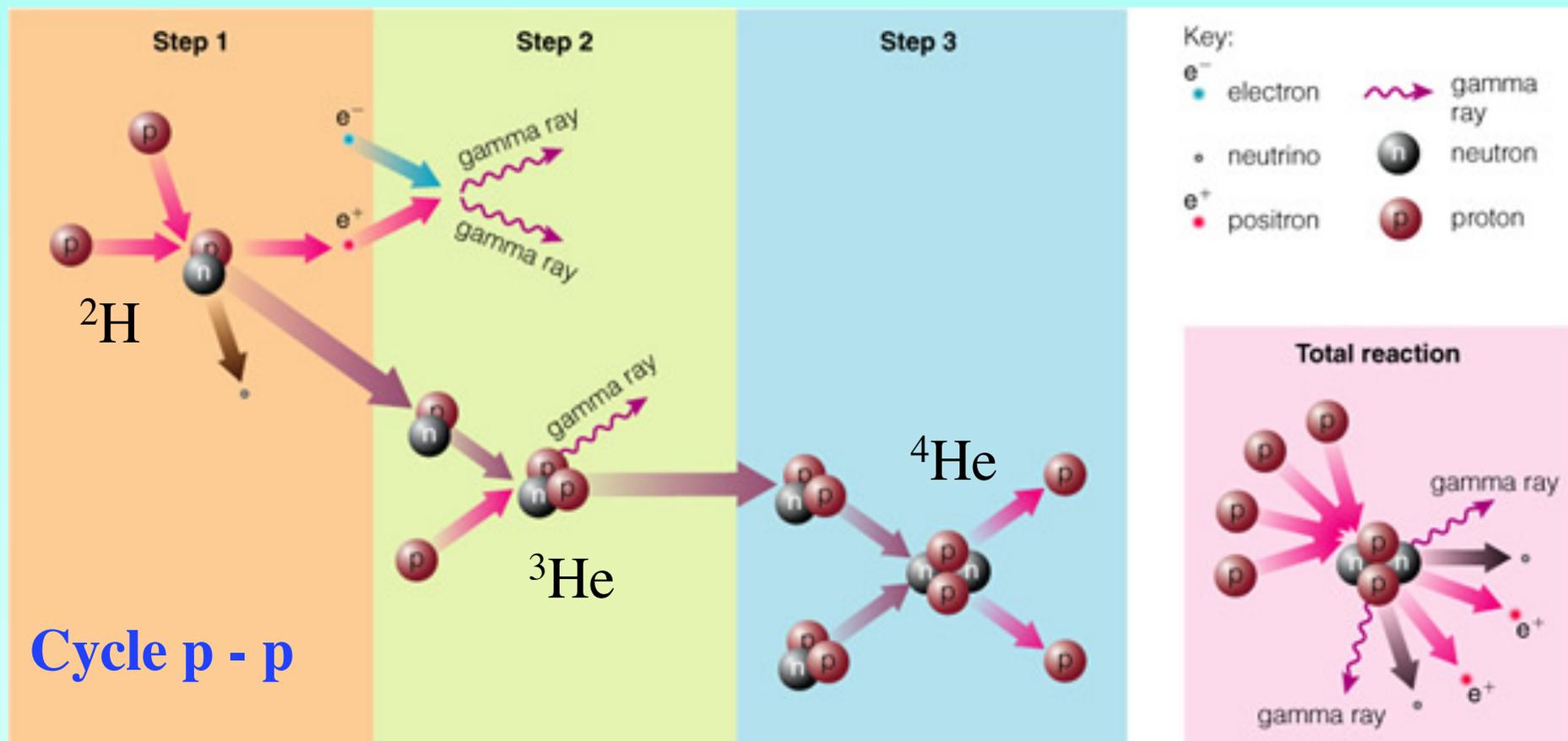


Réactions effectives dans le Soleil

Connaissance des réactions nucléaires en 1939 → réactions possibles

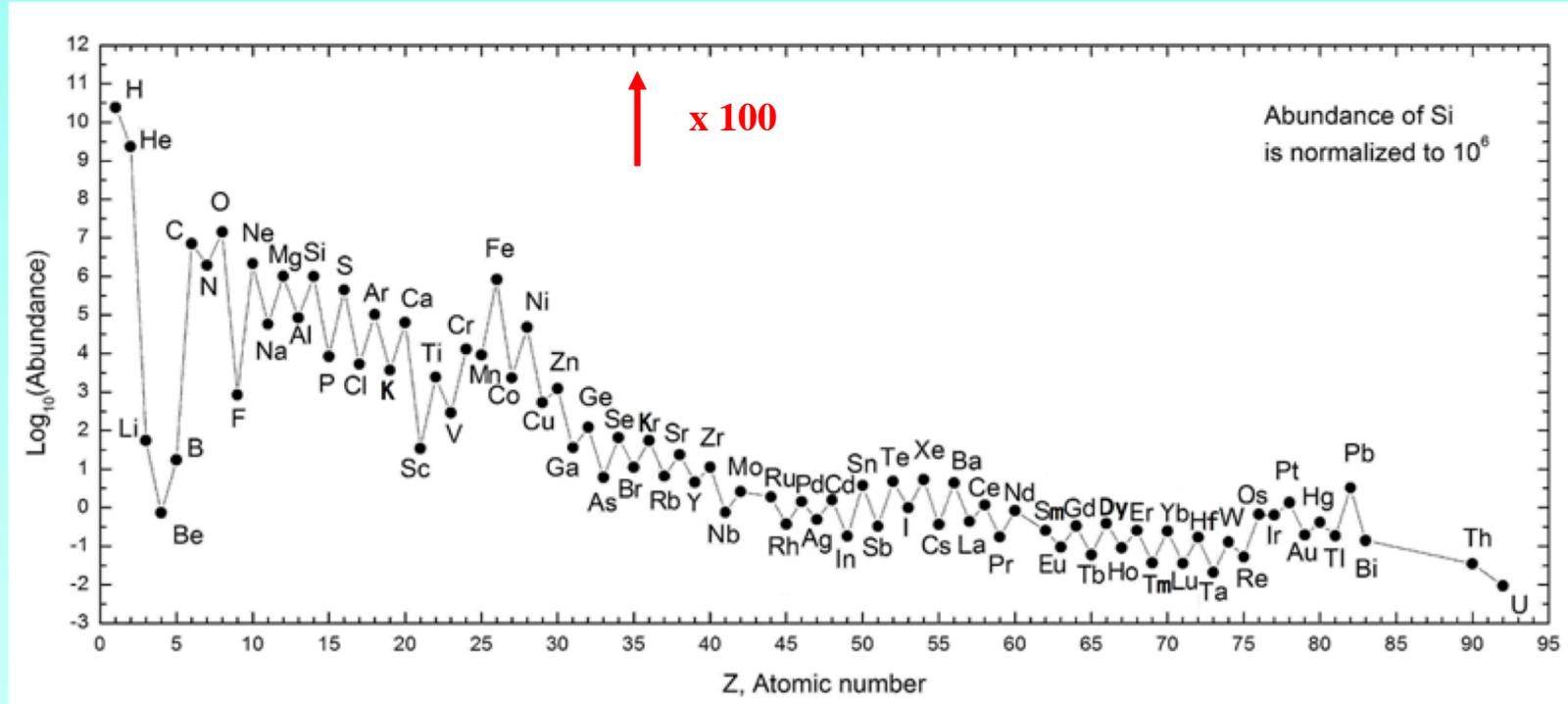
H. Bethe et C. F. von Weizsäcker :

Cycle proton – proton (dominant) et cycle CNO (\approx catalyseurs)



Les éléments dans l'Univers

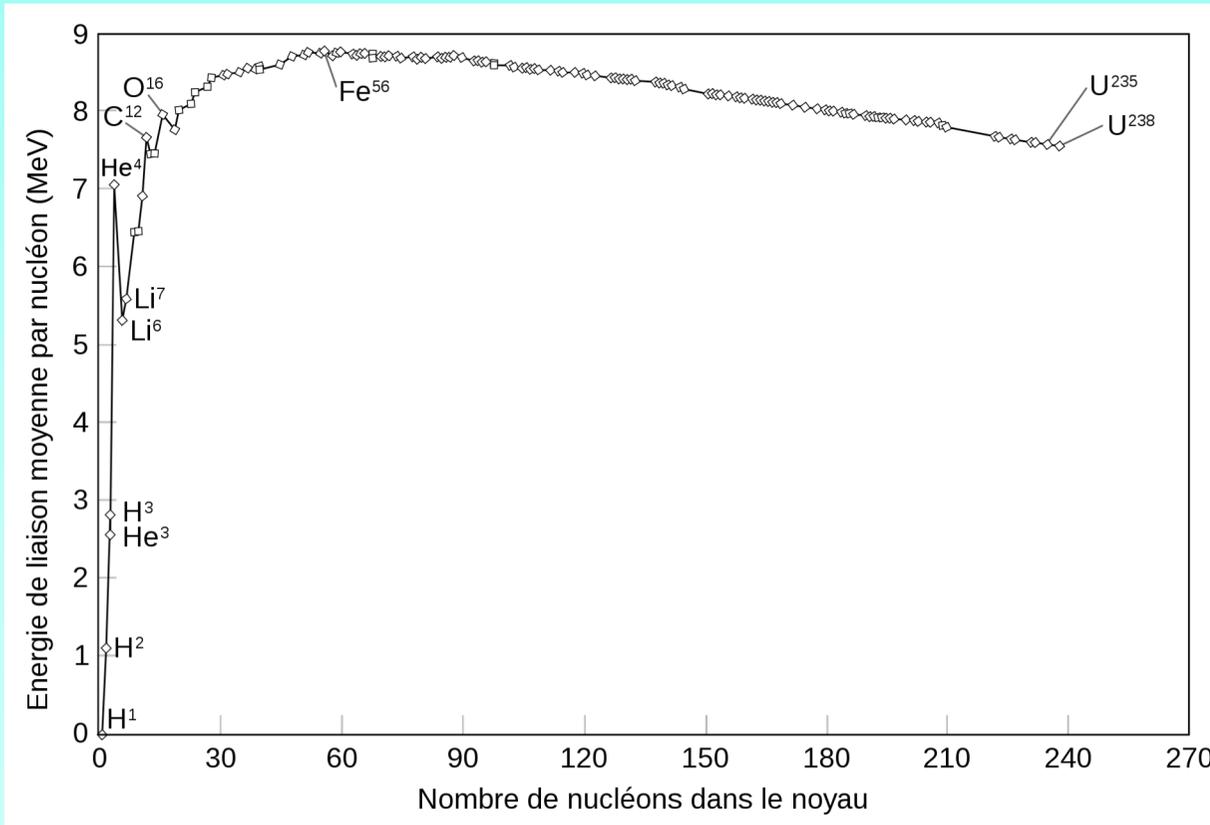
Abondances à la surface du Soleil



- H et He très abondants $\approx 98\%$ en masse : très différent / Terre !
- Li, Be et B: très peu abondants
- Pic du fer
- Effet pair/impair

Abondances et stabilité des noyaux

masse constituants - masse noyau $\rightarrow E(\text{liaison})$



- 2H , 3H , Li, Be, B fragiles \rightarrow abondances faibles
- stabilité maximale pour Fe \rightarrow pic

L'évolution du soleil et des étoiles

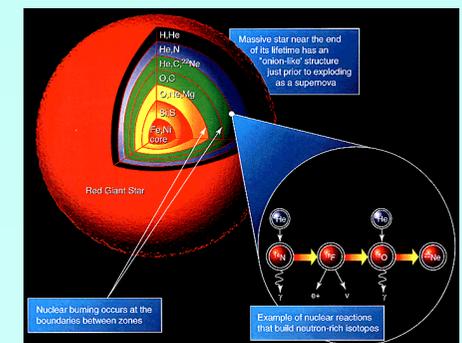
Soleil

- carburant (H) épuisé au centre → évolution
- effondrement du cœur (He) → T_C croît : fusion de H hors du cœur
- dilatation ($R \times 100$!), T_S décroît : géante rouge
- T_C très élevé (10^8 C): fusion de He → C et O
- couches externes éjectées : nébuleuse planétaire
- effondrement → naine blanche (mais C ne peut fusionner)



Etoiles massives

- gravitation plus forte → T_C plus grand → autres réactions
- fin explosive : SN, étoiles à neutrons, TN



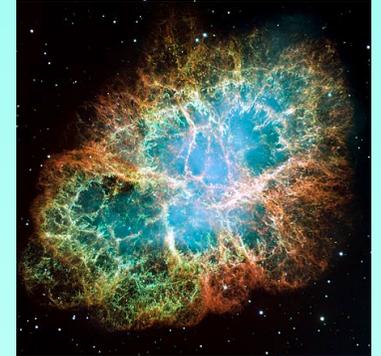
Synthèse des éléments dans l'Univers

Trois contributions aux réactions nucléaires (1939, 1957, 1971 ...)

- Nucléosynthèse par fusion dans les étoiles

- * Phases calmes ($4\text{H} \rightarrow \text{He}$ puis C, O ... Fe)
- * Nucléosynthèse explosive (étoiles massives: SN)

Exemple : l'or (Au) : SN ou fusion d'étoiles à neutrons ?



- Nucléosynthèse primordiale : ^1H , ^2H , ^3H , ^4He , ^3He

Il y a 13,8 milliards d'années, juste après le big-bang (< 20 min)

- Réactions de « spallation » : Li, Be, B

Eclatement de noyaux C, N, O après impact de rayons cosmiques

Bonne cohérence pour l'ensemble des abondances observées

Nous sommes des « poussières d'étoiles » ! (H. Reeves)