

Des particules au cosmos

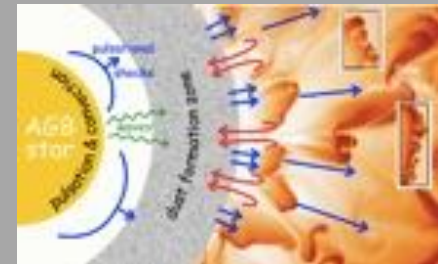
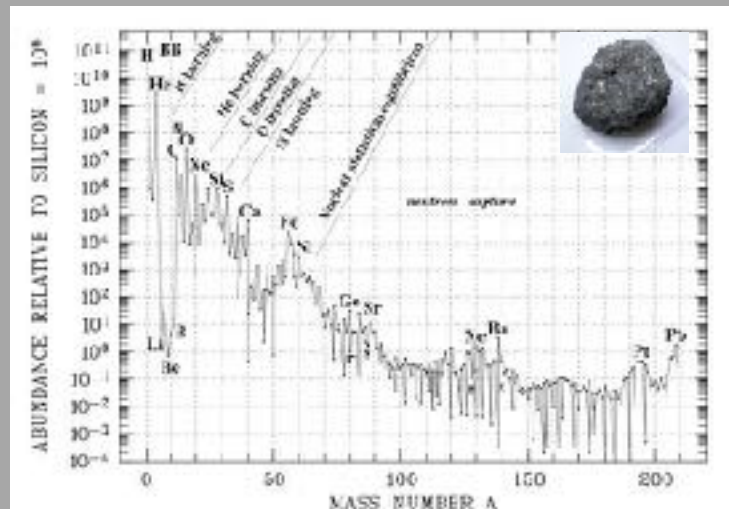
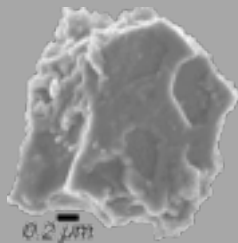


quelques éléments de nucléosynthèse stellaire

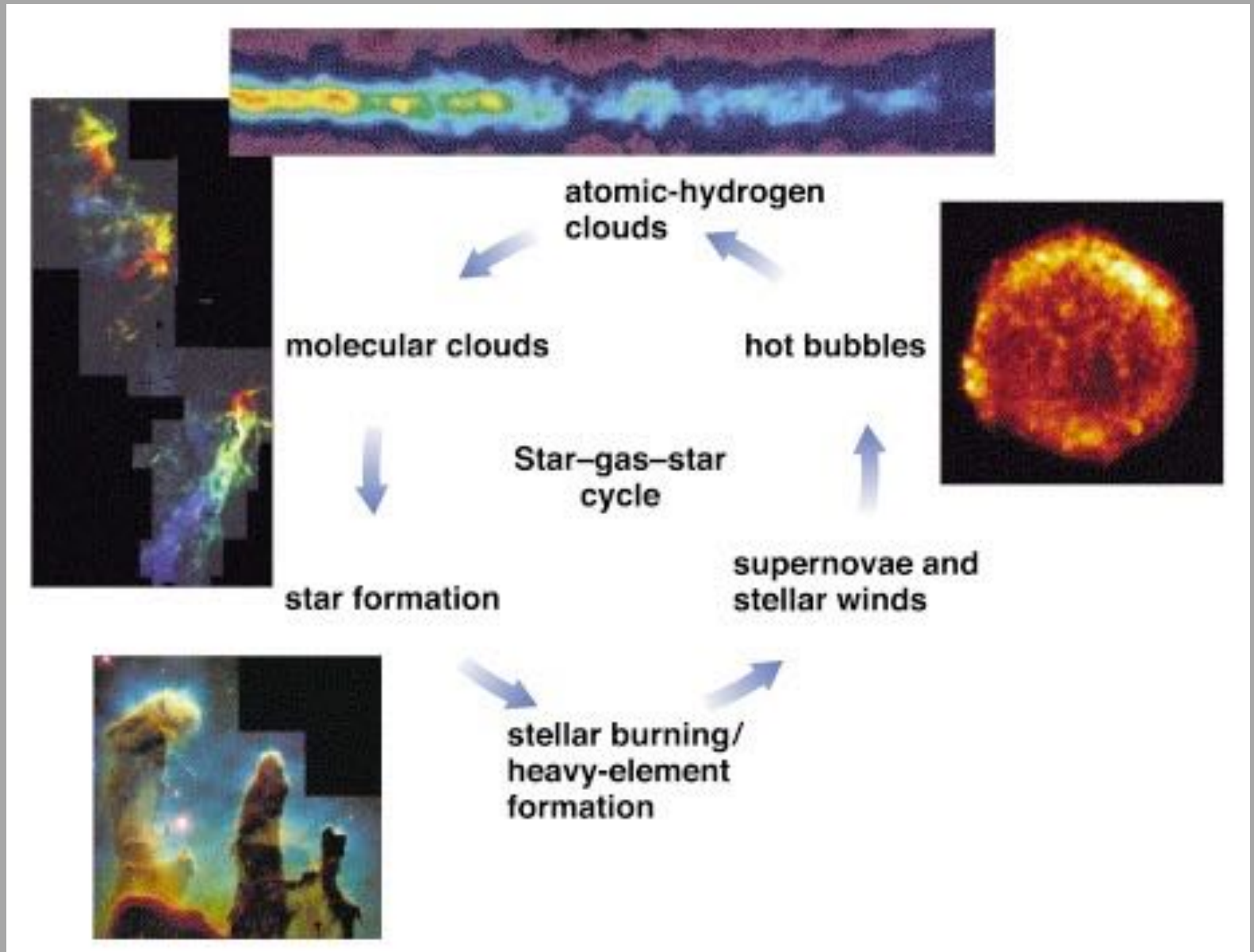
Ecole des deux Infinis 18 Juillet 2018

Jean Duprat

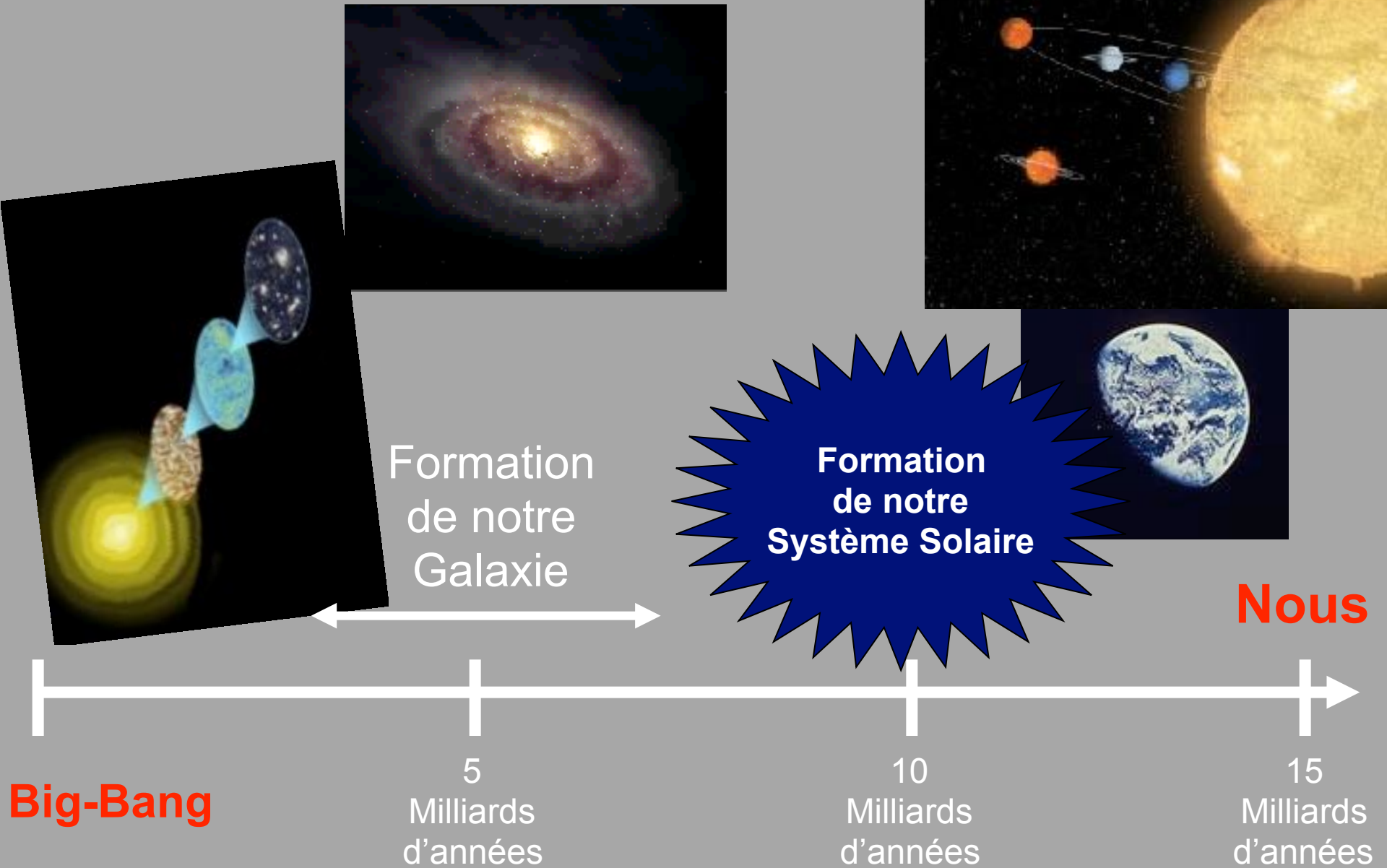
CSNSM-IN2P3-CNRS Orsay



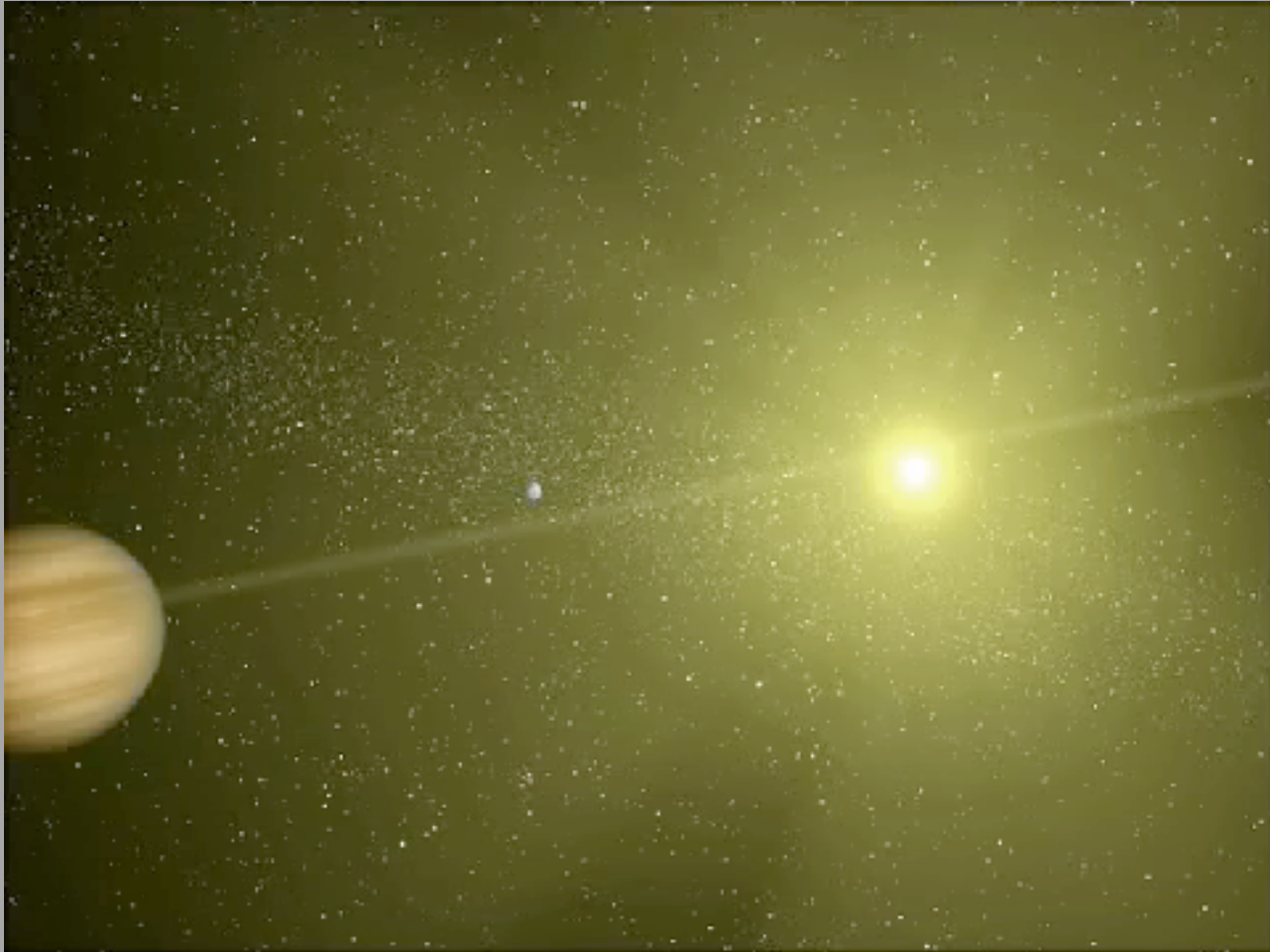
Le cycle de la matière



Du Big-Bang à nous ...

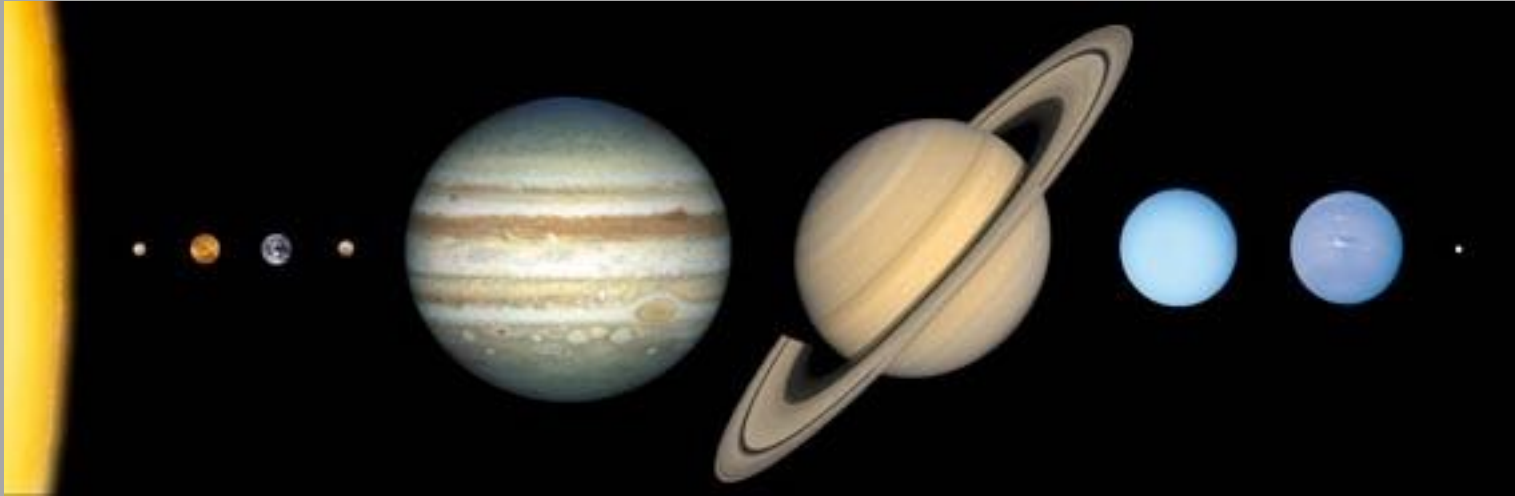


Il y a 4,5 milliards d'années,
le soleil et les planètes se formaient...



Quels témoins pouvons nous retrouver ?

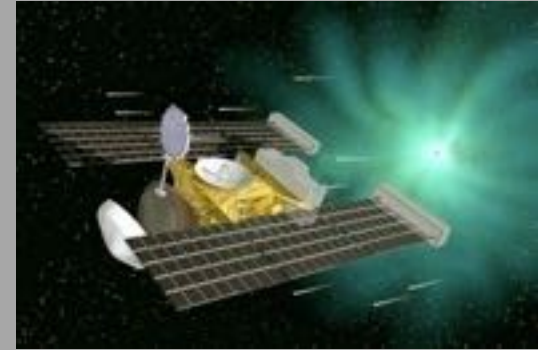
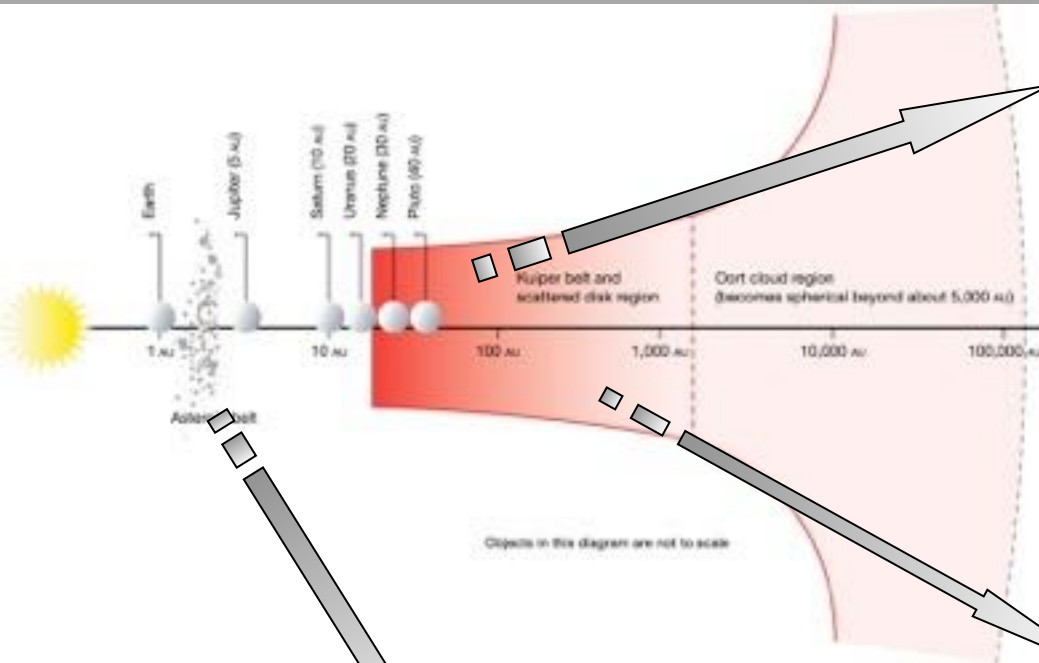
Le système solaire actuel



- M Soleil (M_{\odot}) : $1.99 \cdot 10^{30}$ kg
- M Terre (M_{\oplus}) : $5.97 \cdot 10^{24}$ kg
- M Jupiter (M_{J}) : $1.90 \cdot 10^{27}$ kg ($317 M_{\oplus}$, $0.1\% M_{\odot}$)

La ligne des glaces marque la séparation entre le monde tellurique et les géantes de gaz et de glaces.

Les petits corps du système solaire, astéroïdes & comètes



STARDUST mission
(2006)



Itokawa
Mission Hayabusa
(2010)



ROSETTA mission
(2014)



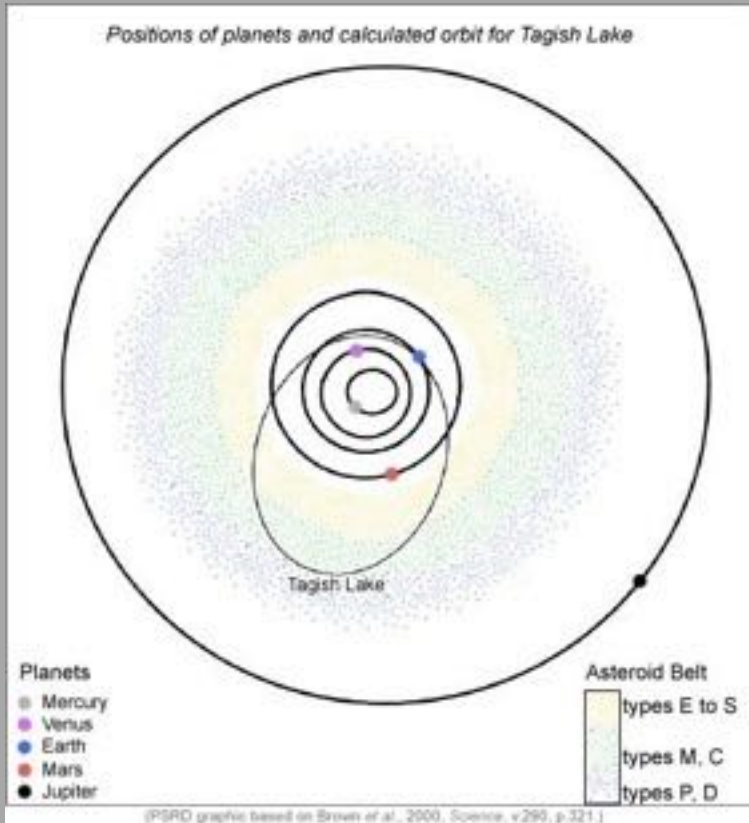
Meteorites & Antartique



Antarctic Meteorite Research
PI : R. Harvey, US



La plupart des météorites proviennent de la ceinture d'astéroïdes, entre Mars et Jupiter

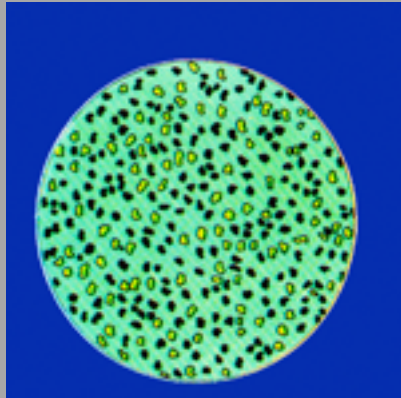


Brown et al. Science 2000



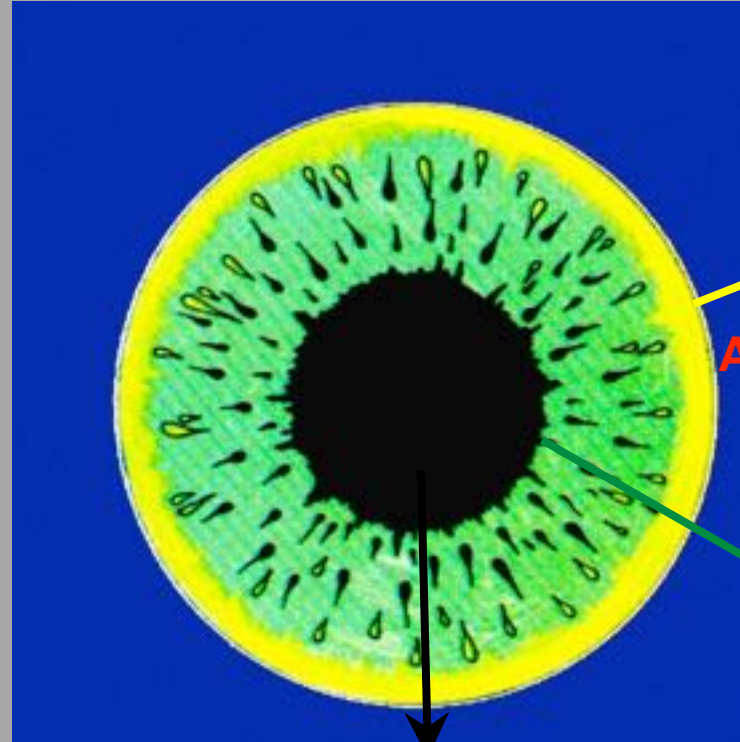
They are sampling a restricted part of the inner solar system

Les météorites non-différenciées



les chondrites

Les météorites différenciées



Achondrites



Mix

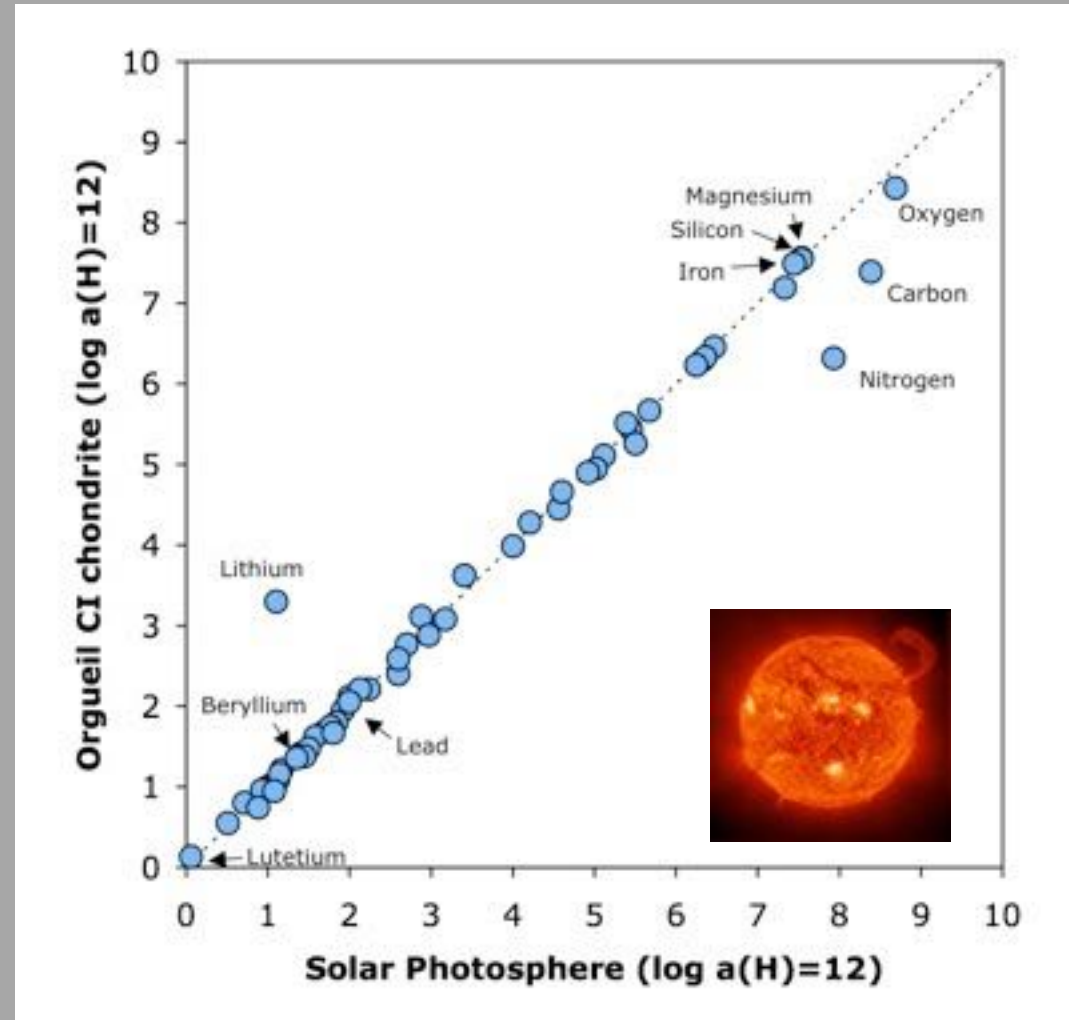


Iron

La composition Soleil/ Chondrites



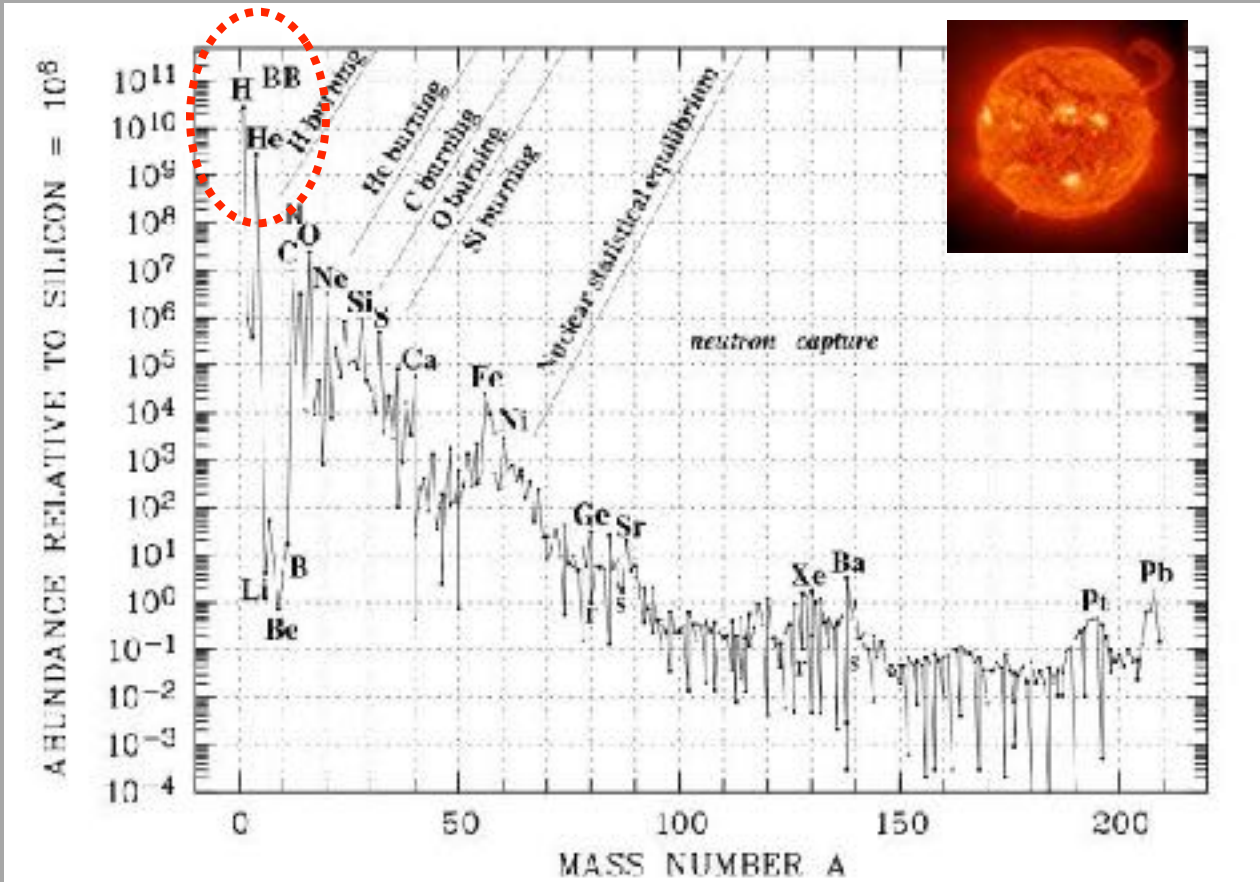
Orgueil (CI)



La composition de la météorite d'Orgueil (CI) est semblable à celle du Soleil sur plus de 8 ordre de grandeurs!

Il s'agit de la composition de la nébuleuse protosolaire

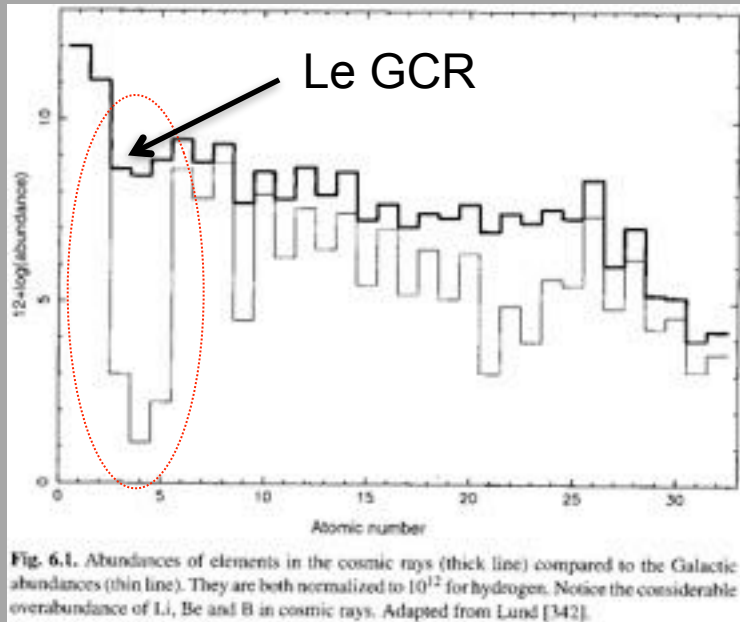
La courbe d'abondance des éléments



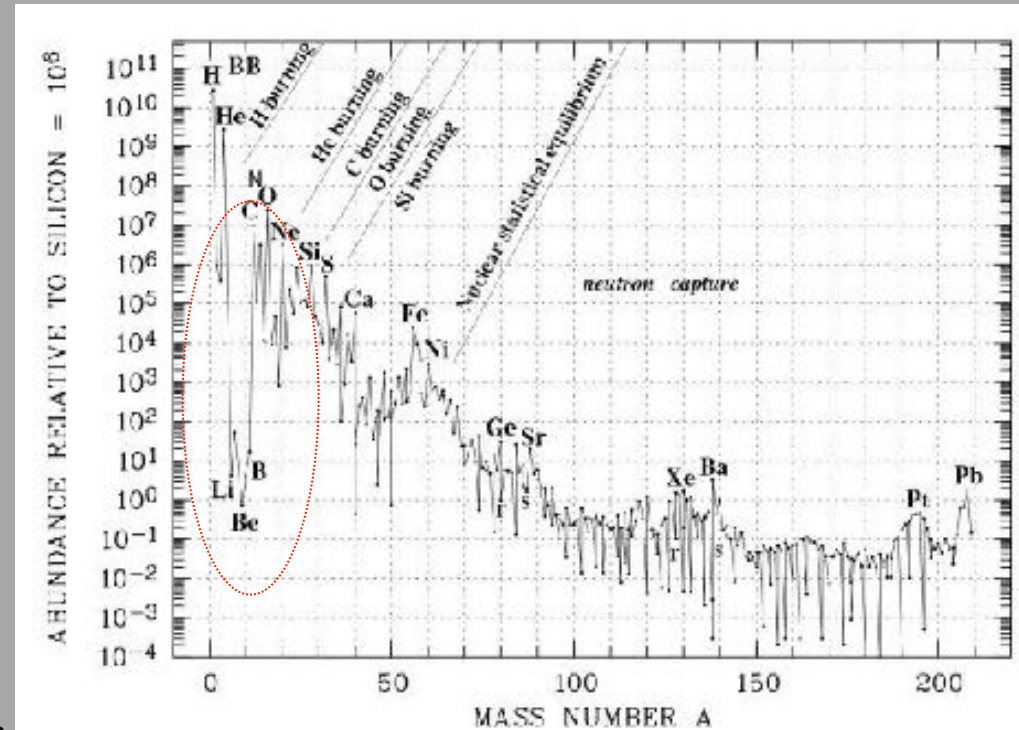
Orgueil (CI)

C'est notre Pierre de Rosette !

Le rayonnement cosmique galactique et les éléments Li Be B

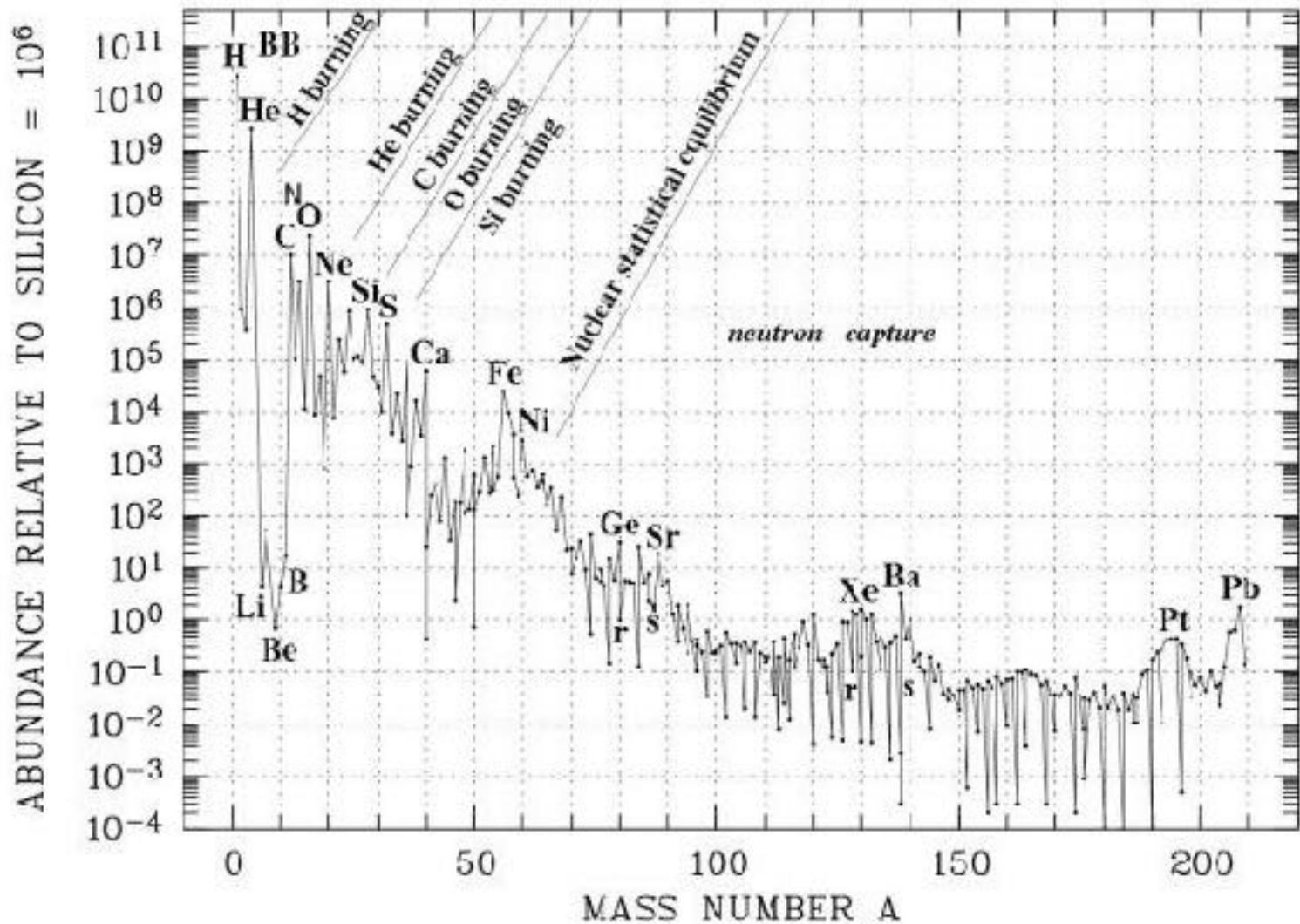


J. Lequeux The interstellar medium

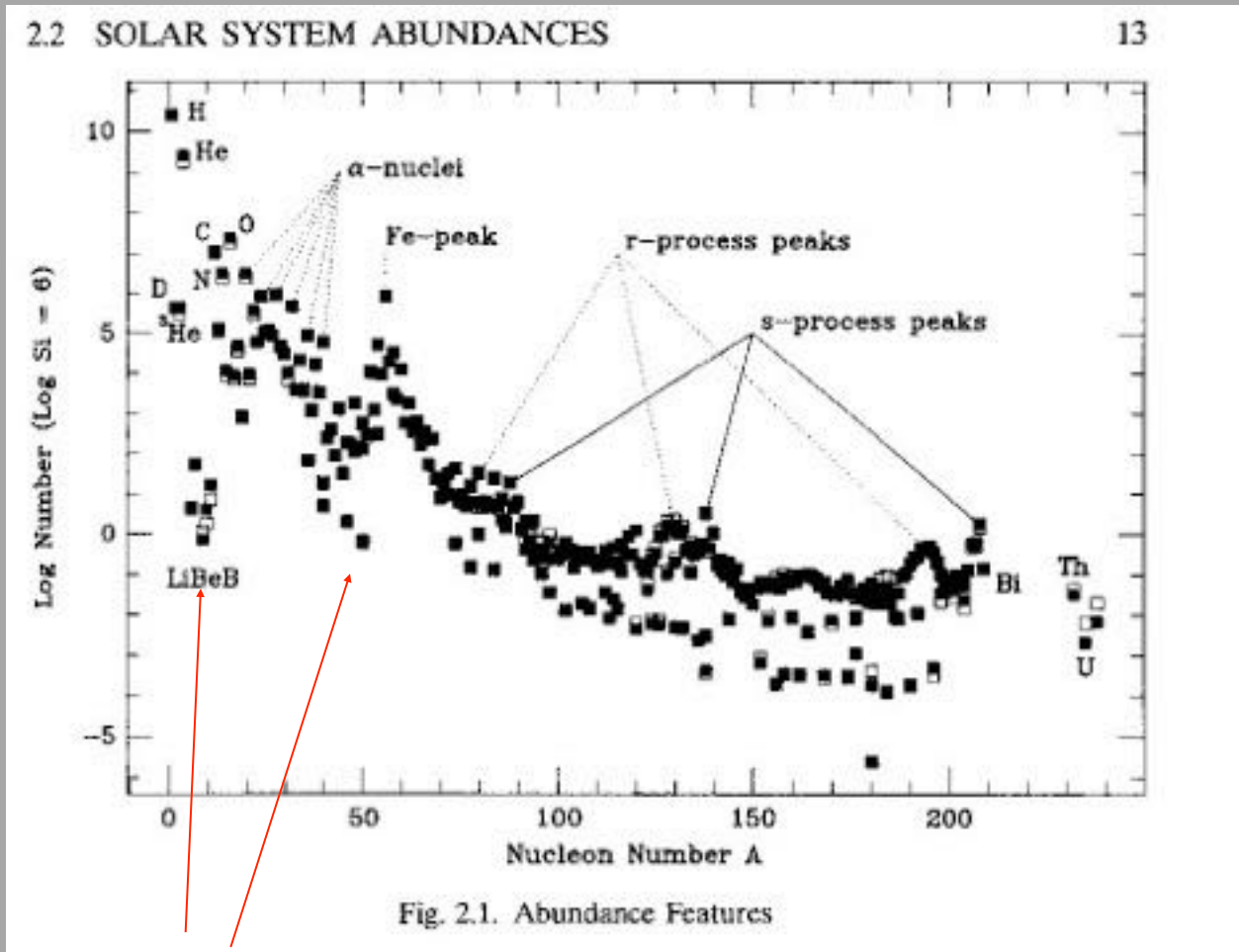


- Les éléments Li Be B sont détruits dans les étoiles
- Ils sont produits par réactions non-thermiques dans le milieu interstellaire

Au delà du carbone ($Z \geq 6$), la nucléosynthèse thermique prend le relais...

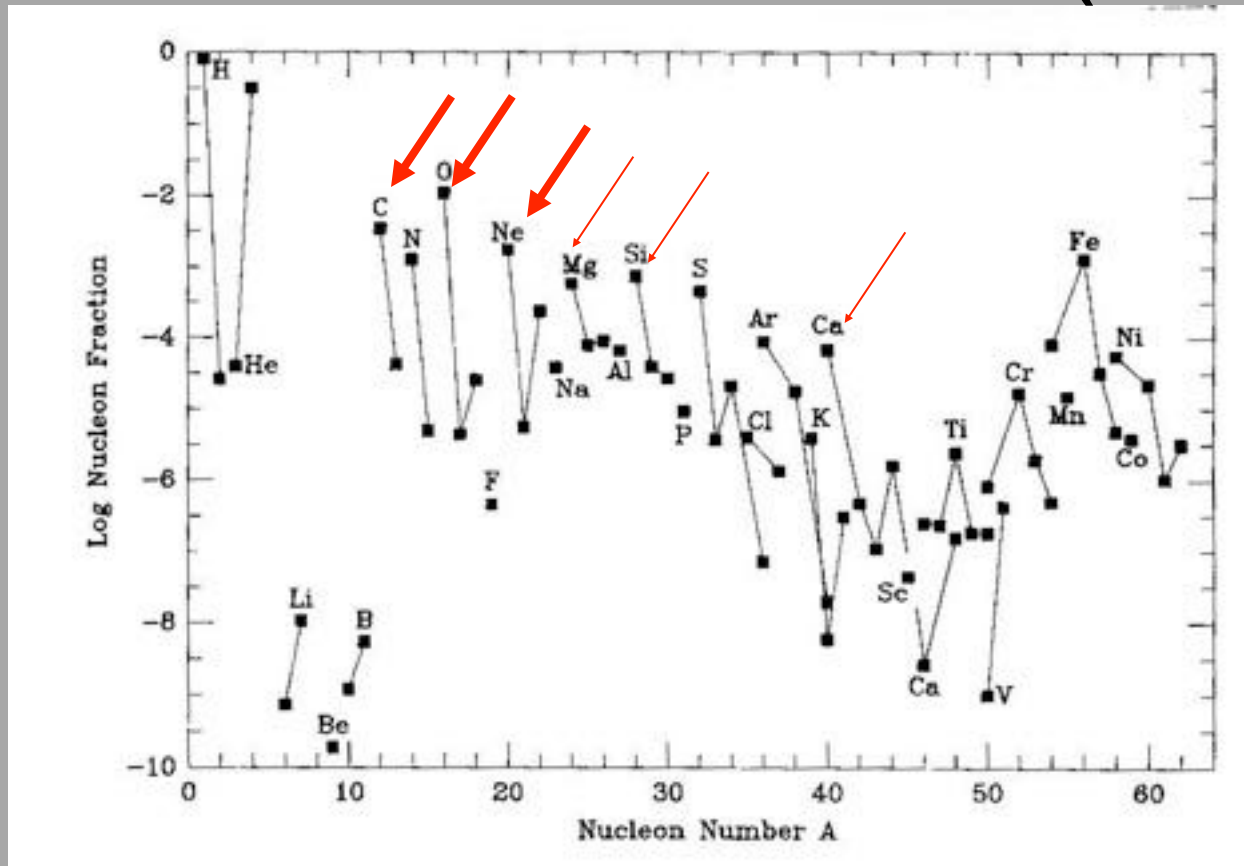


Des vallées se dessinent...



De faibles énergies de liaisons (LiBeB et Sc)

En dessous du Calcium ($Z < 20$)



Les noyaux alpha :

^{12}C , ^{16}O (He burning)

$^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \alpha$ (C burning)

$^{20}\text{Ne}(\gamma, \alpha)^{16}\text{O}$

$^{20}\text{Ne}(\alpha, \gamma)^{24}\text{Mg}$

$^{16}\text{O} + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{28}\text{Si} + \alpha$ (O burning)

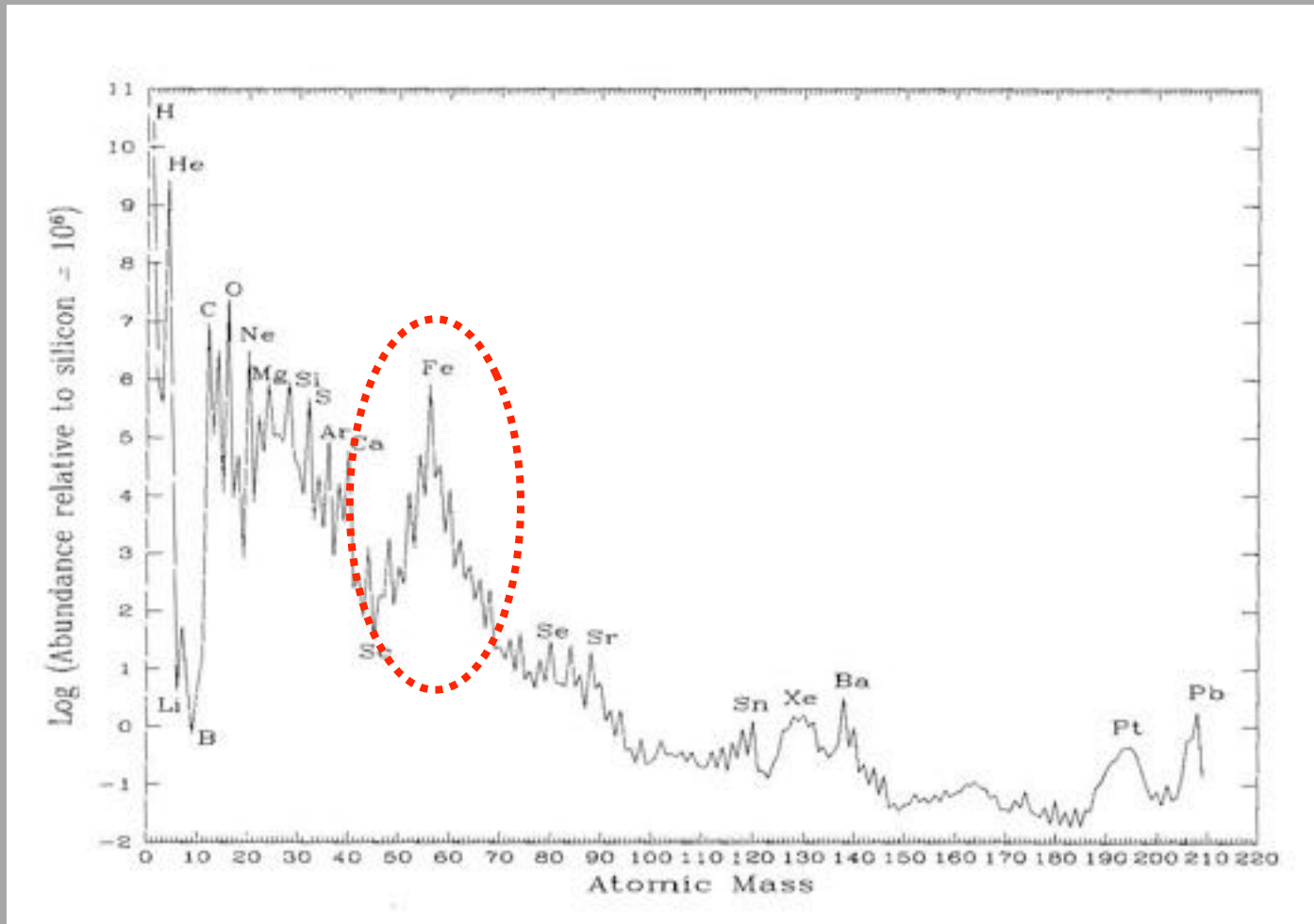
Les noyaux $N=Z$ sont les plus
abondants

$^{24}\text{Mg}(12,12) \gg ^{26}\text{Mg}(12,14)$

$^{28}\text{Si}(14,14) \gg ^{30}\text{Si}(14,16)$

$^{40}\text{Ca}(20,20) \gg ^{42}\text{Ca}$

Le pic du Fer

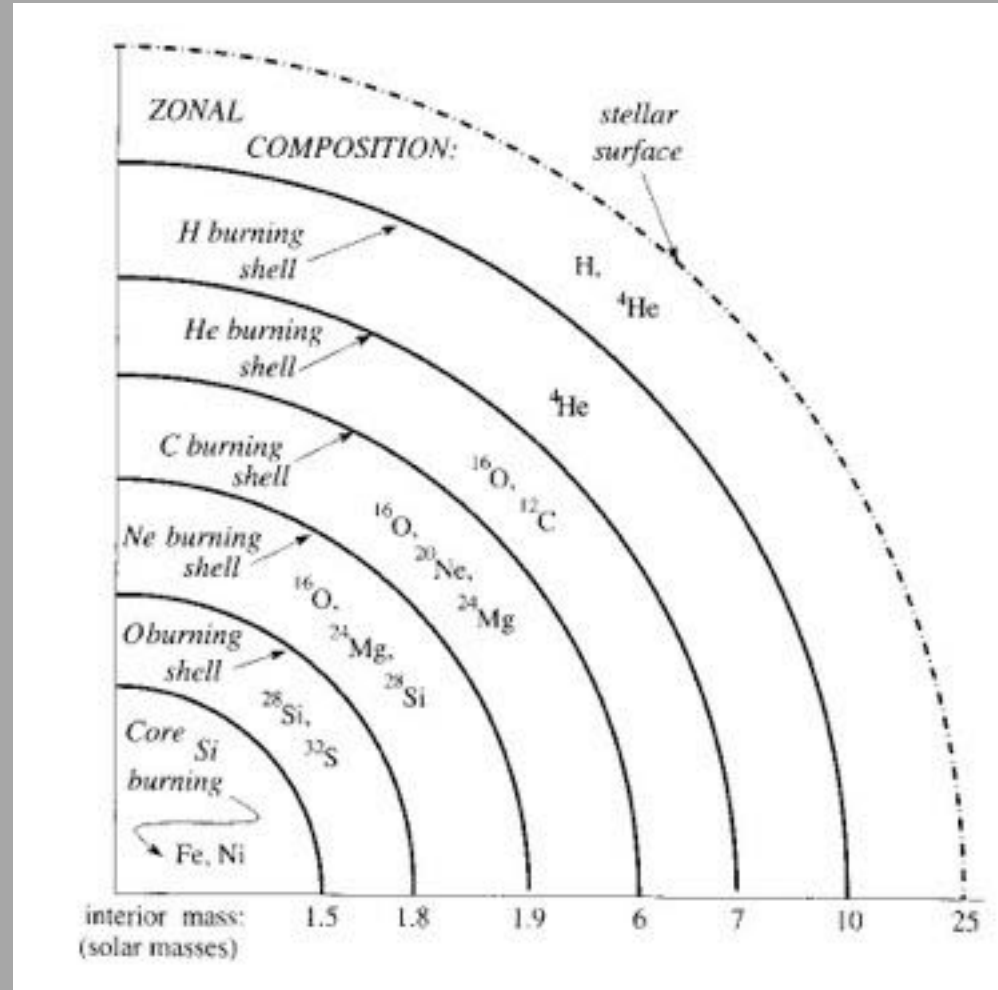


Les noyaux autour de $A=50-60$ (Cr, Fe, Ni, Co ...) sont sur-abondants par rapport à leur voisins

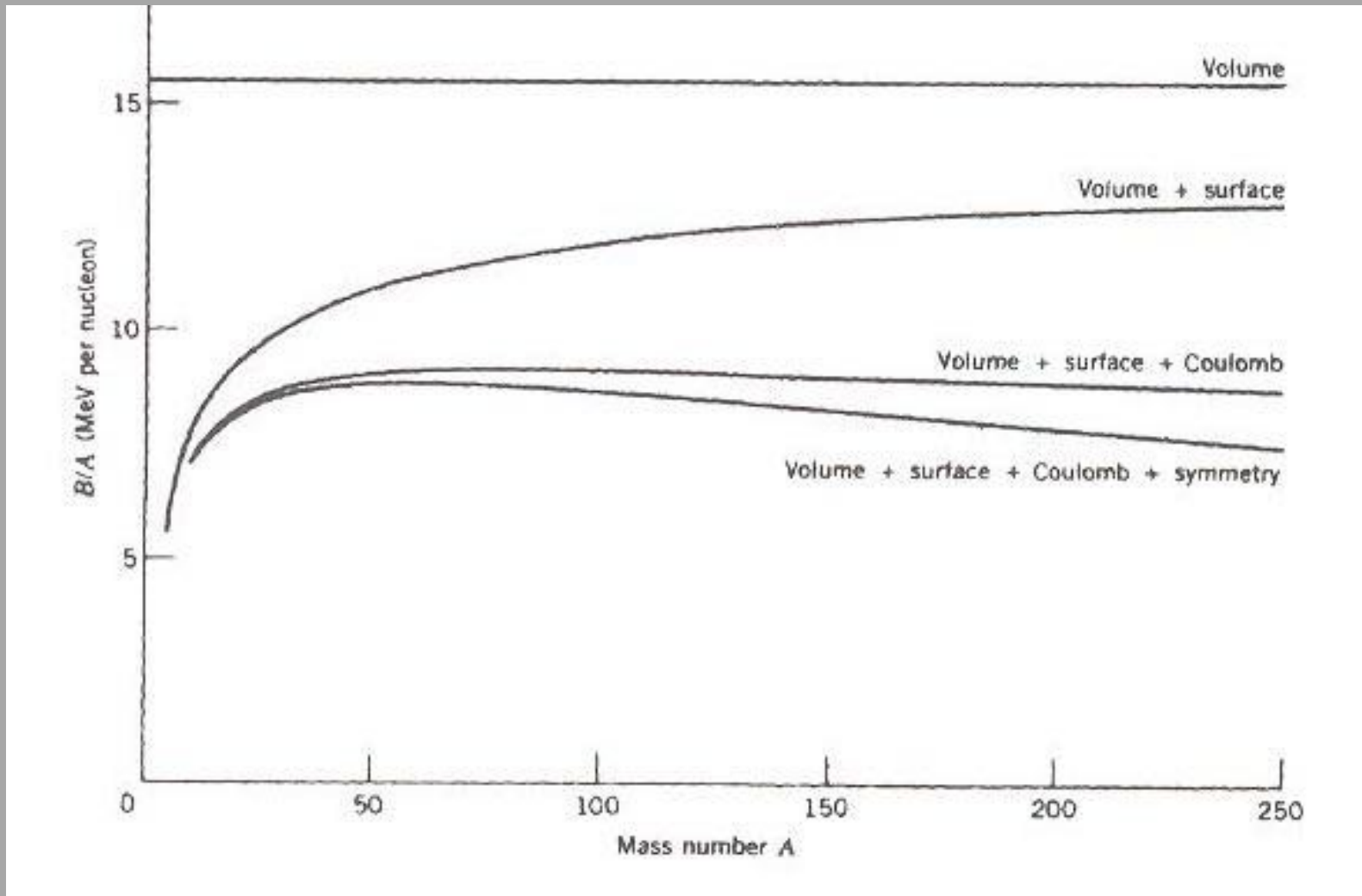
La structure d'une étoile, vision schématique

Pour $T > 3 \cdot 10^9$ K, on commence à brûler le Silicium, il apparaît un équilibre entre la production et la destruction par photodissociation

(p,γ) or $(\alpha,\gamma) \leftrightarrow$ photodissociation

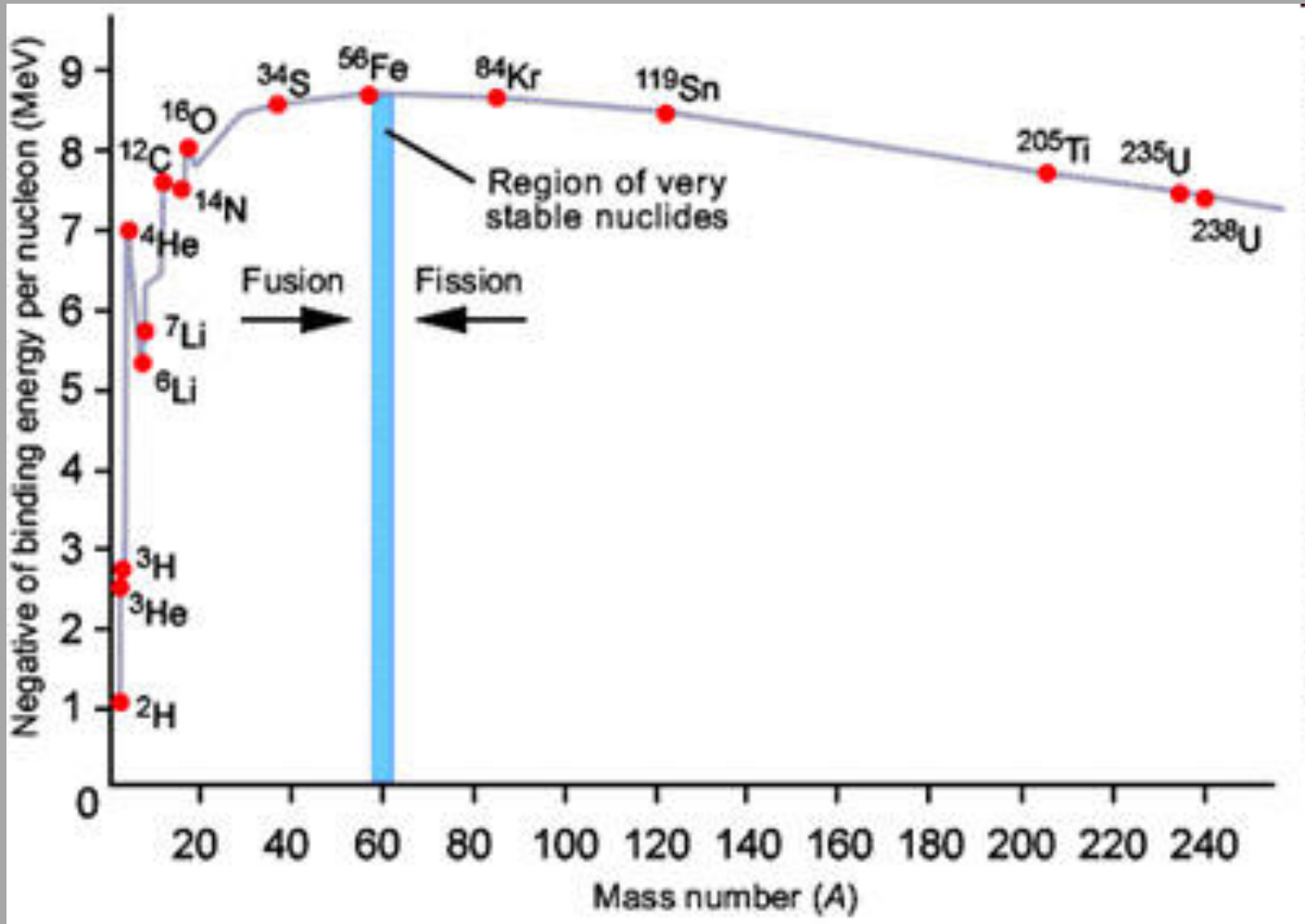


Eléments de physique nucléaire



- L'interaction forte a une **courte portée**
- L'énergie de liaison par nucléon est presque une constante
- **$B(A) \approx \text{cst} + \text{corrections}$** , le **modèle de la goutte liquide**

Un maximum à $A \sim 60$.



Le Fer est l'élément le plus stable

Au delà du pic du Fer

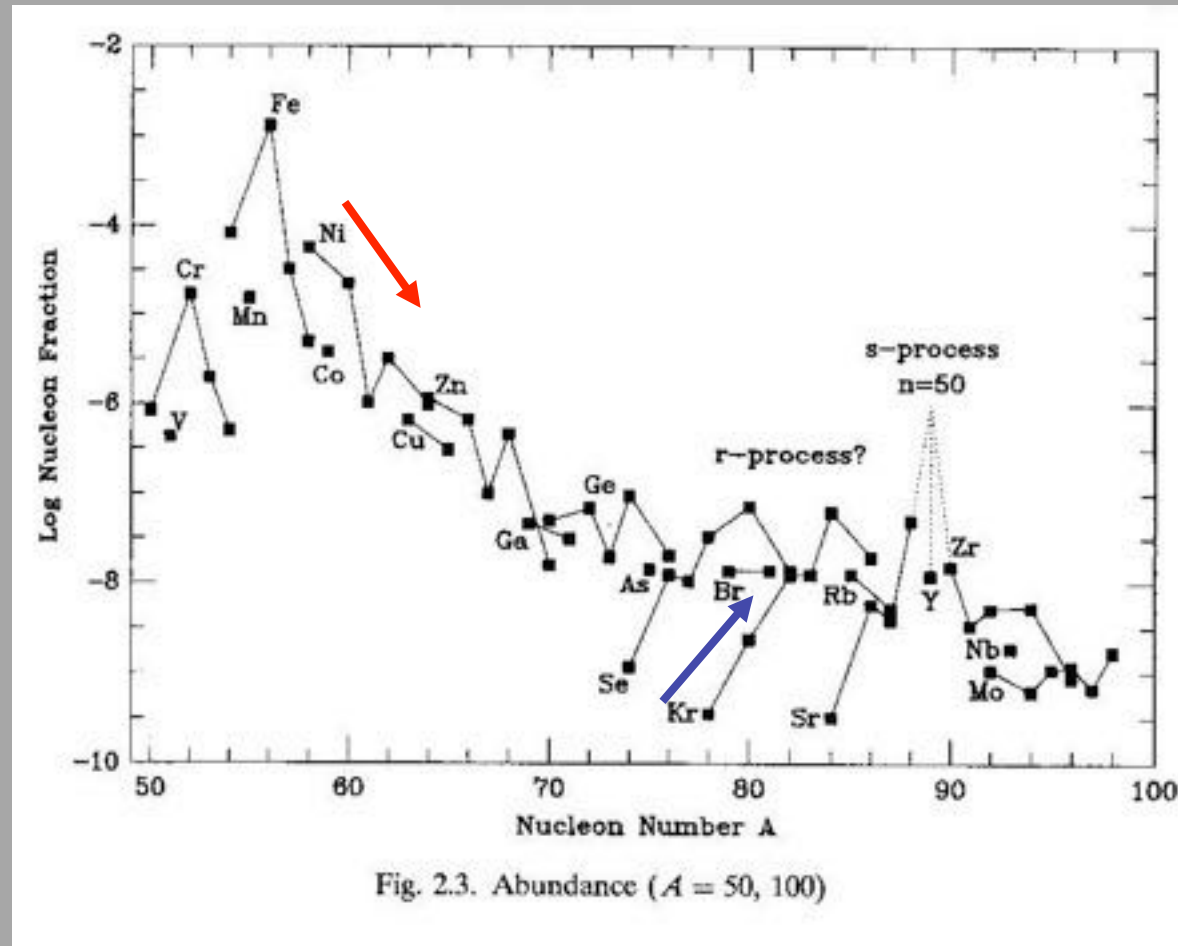


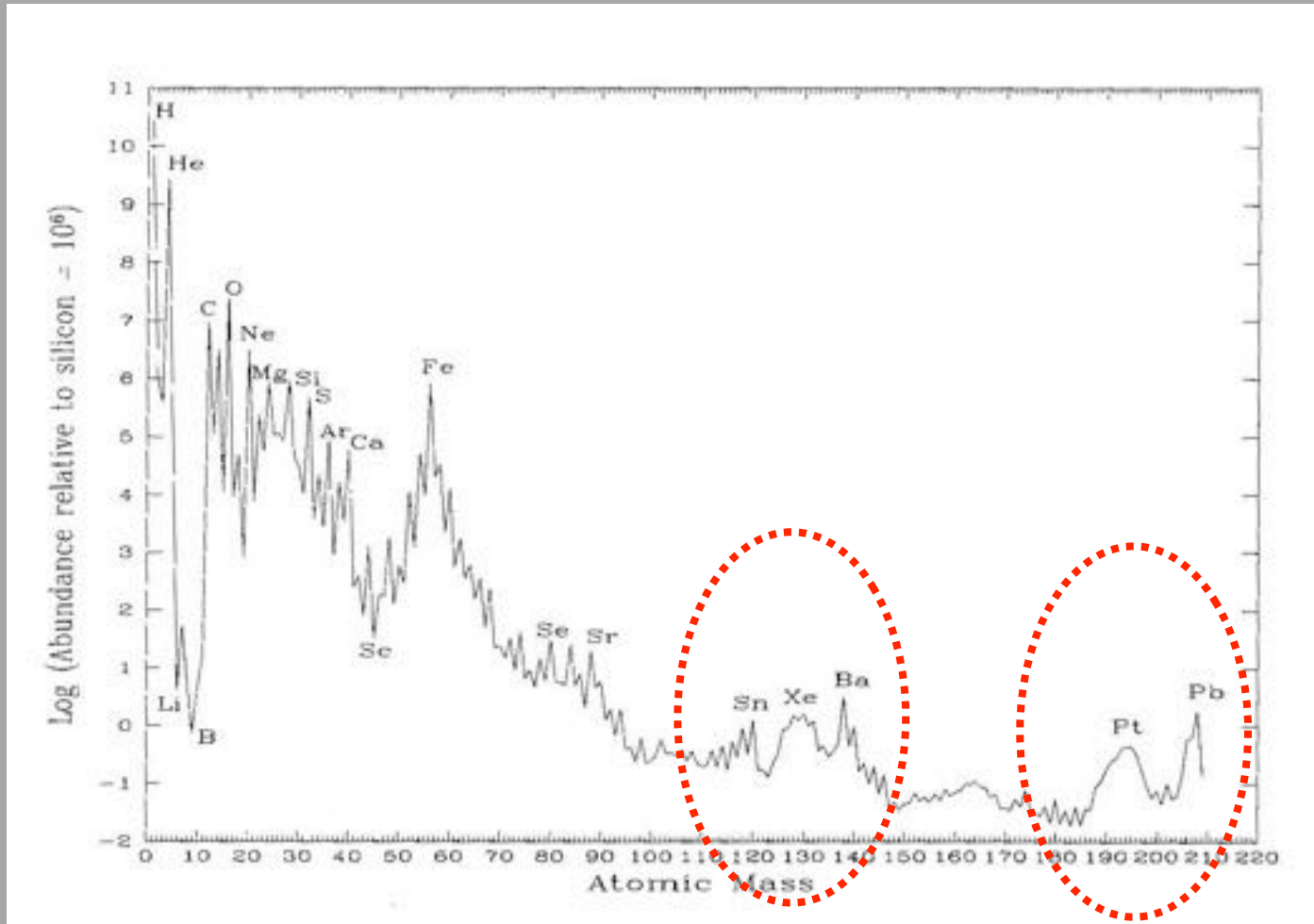
Fig. 2.3. Abundance ($A = 50, 100$)

Avant le Ge : les isotopes pauvres en neutron sont majoritaires

Après de Ge : les isotopes riches en neutron sont majoritaires

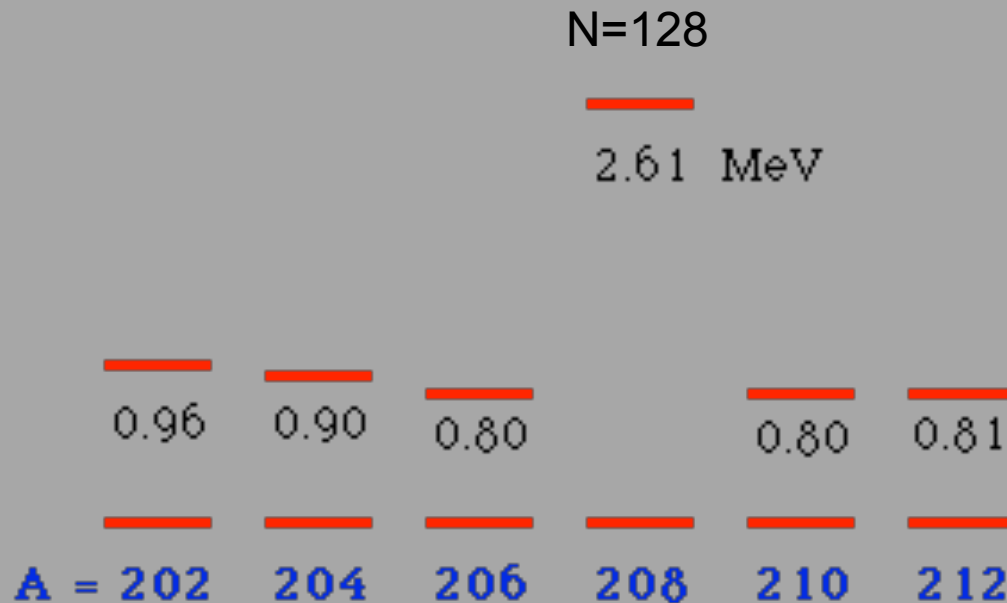
Lorsque la barrière coulombienne devient importante, la capture de neutrons prend le dessus

Au delà du fer, une décroissance régulière et ...



... des accidents, les noyaux autour de A=140 et 200 sont surabondants

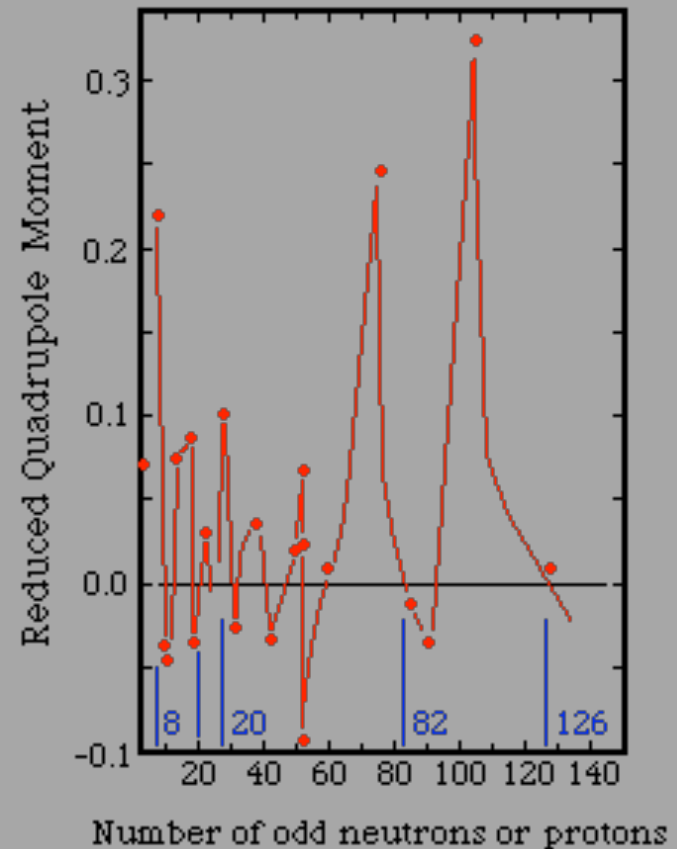
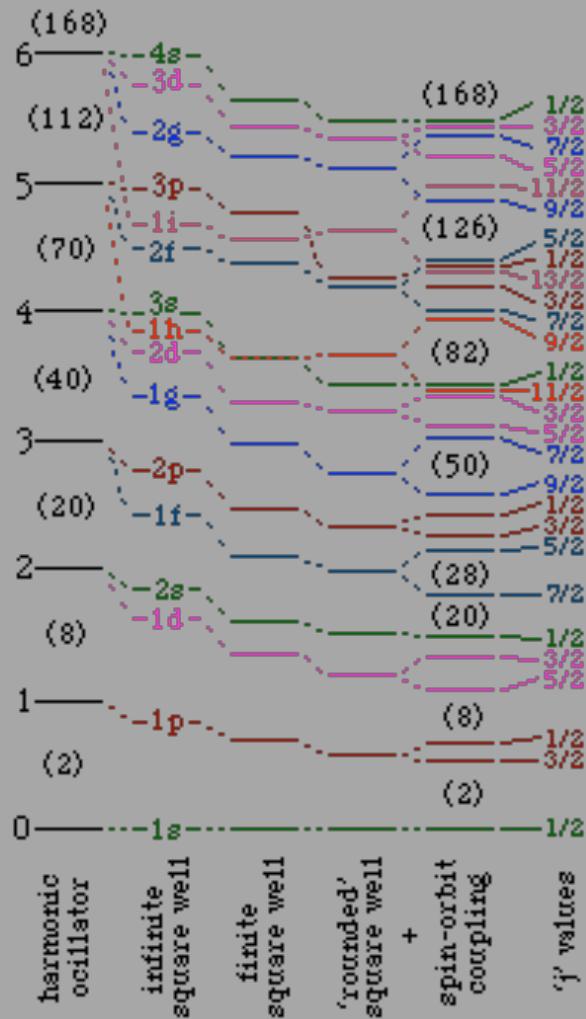
Les noyaux magiques



Les premiers états excités dans la chaîne du Pb (Z=82)

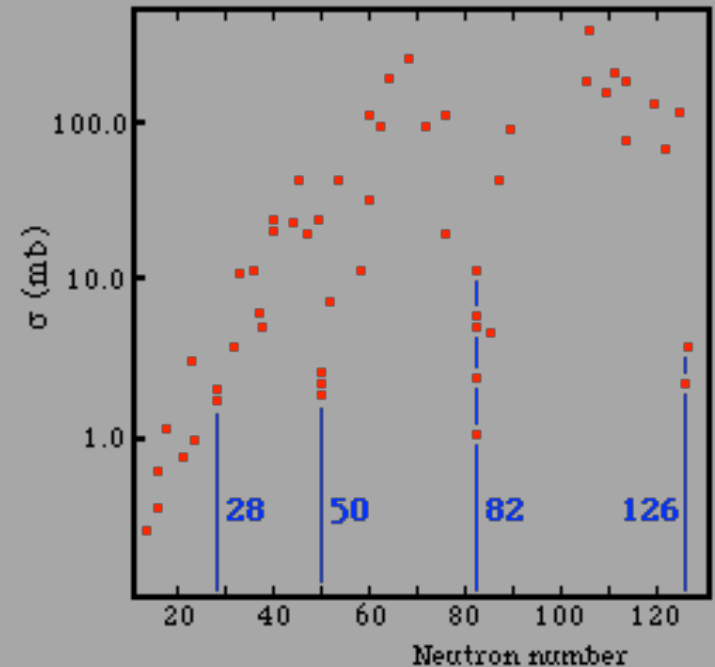
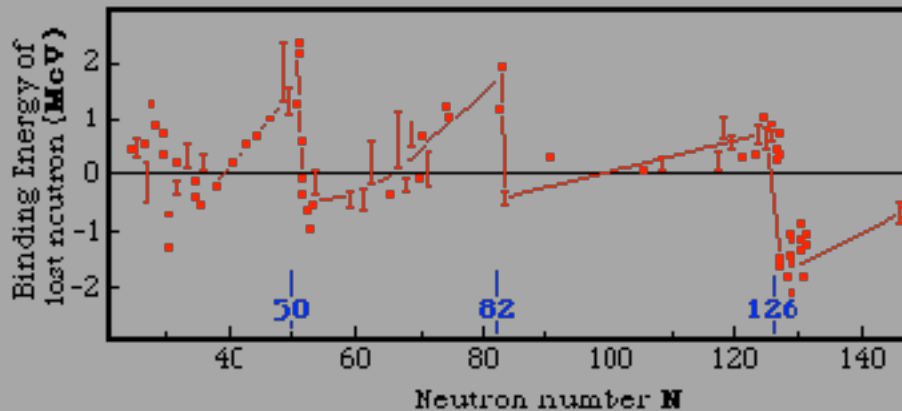
Le long d'une chaîne isotopique certains noyaux sont plus stables que d'autres, ce sont les noyaux magiques, Ils sont l'équivalent des « ***gaz rares nucléaires*** »

Le modèle en couches nucléaire



Les nombres magiques du modèle en couche sphérique
2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, 168

Les probabilités de capture neutrons



L'énergie de liaison du neutron est maximale lors du passage sur l'effet de couches (pour les noyaux magiques)

^{88}Sr ($Z=38$, $N=50$), ^{138}Ba ($Z=56$, $N=82$), ^{208}Pb ($Z=82$, $N=126$)

Les pics autour de $A = 60$, 140 et 200 proviennent des effets de couches nucléaires

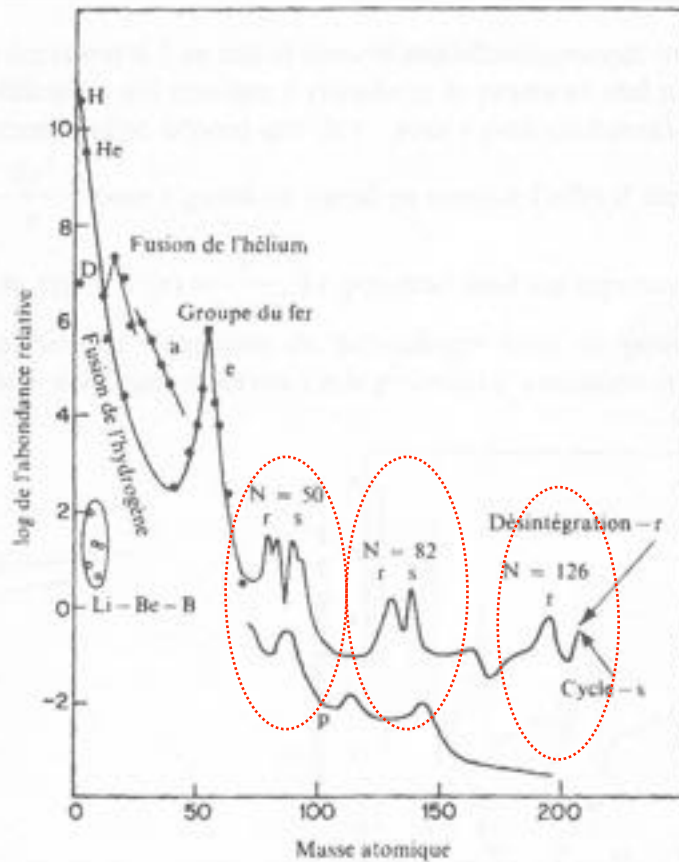
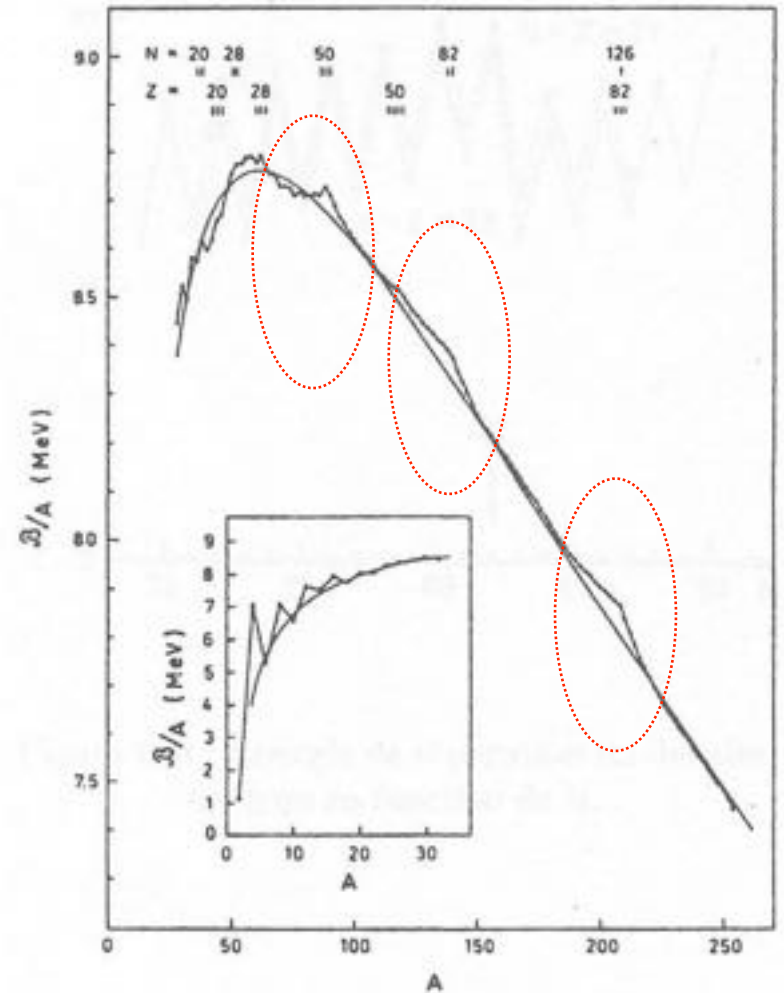
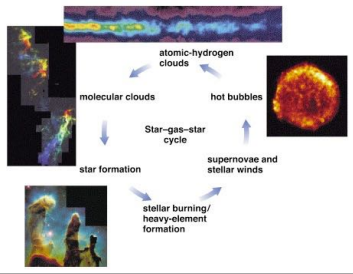


Figure III-2 : Abondance des éléments dans l'univers (vue générale) [Val85].



Conclusion



- Le cycle de la matière dans l'espace, **le milieu interstellaire s'enrichi progressivement en éléments lourds**
- Au delà du Carbone, **les noyaux sont produits dans les étoiles**
- Il existe différents processus de **nucléosynthèse stellaire** : combustion de H, He, ...Si
- Au delà du Fer, les noyaux sont produits par **capture de neutrons** (processus s et r)
- Certaines météorites (les chondrites) ont une composition globale similaire à celle du **nuage parent du système solaire**
- Il est possible de trouver dans les météorites des grains qui ont condensé dans des enveloppes d'étoiles précédant la formation de la notre, ce sont les **grains pré-solaires**.

