

# Des particules au cosmos

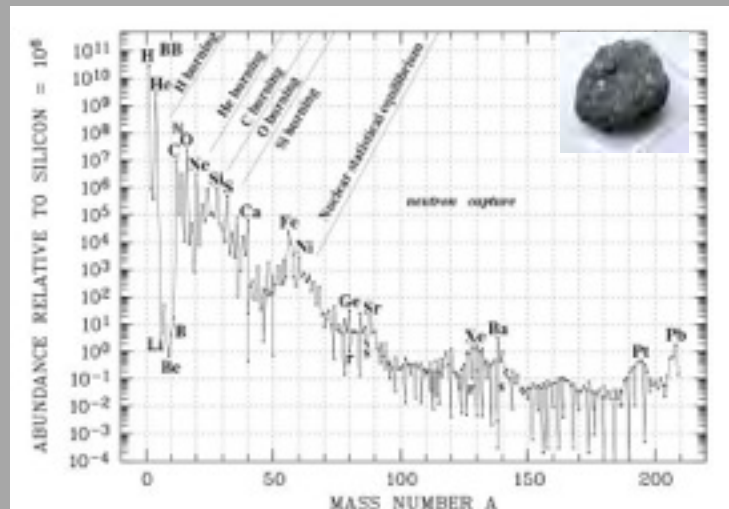
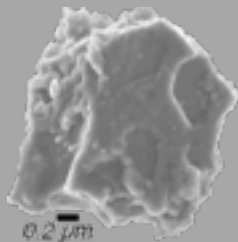


quelques éléments de nucléosynthèse stellaire

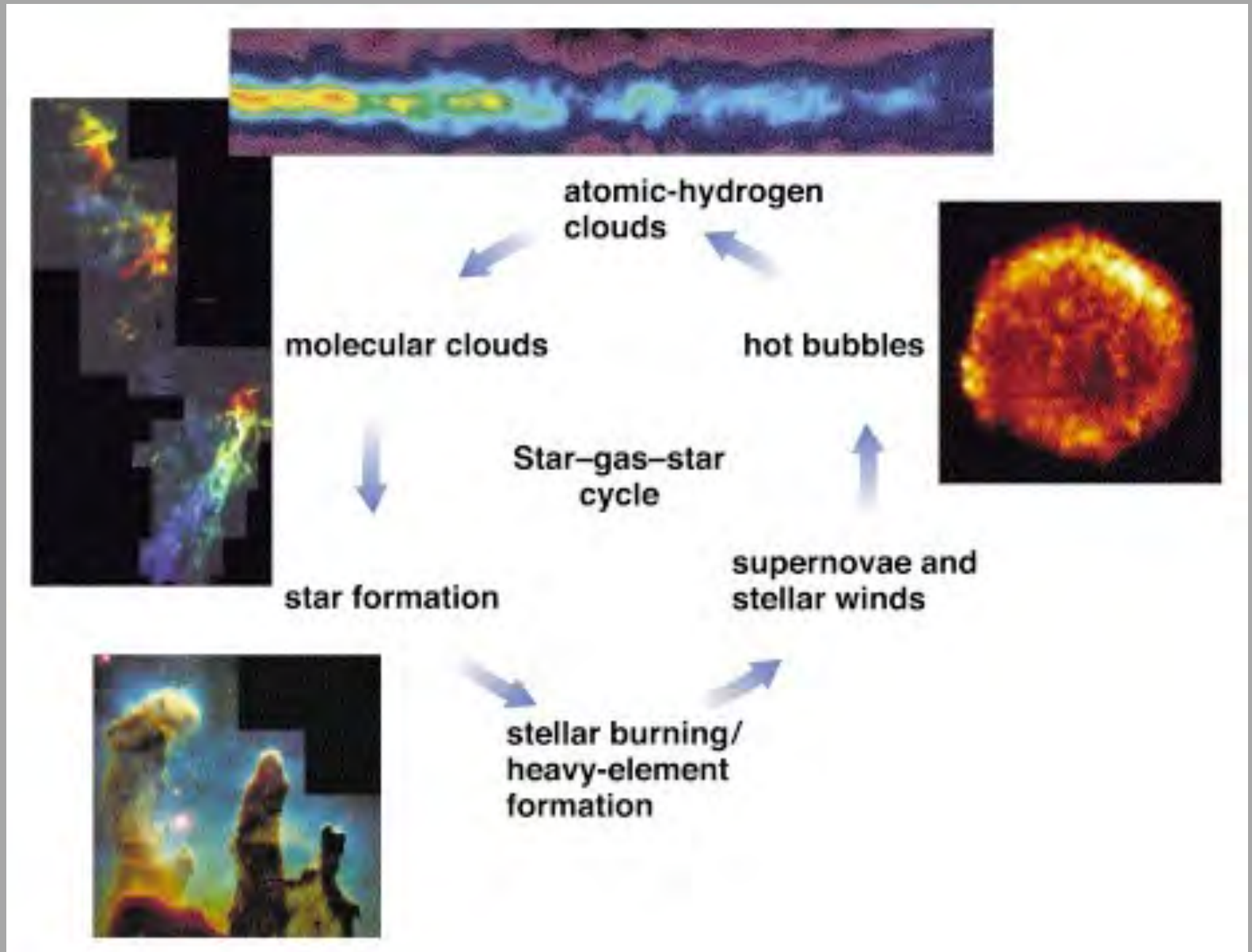
*Ecole des deux Infinis 17 Juillet 2014*

Jean Duprat

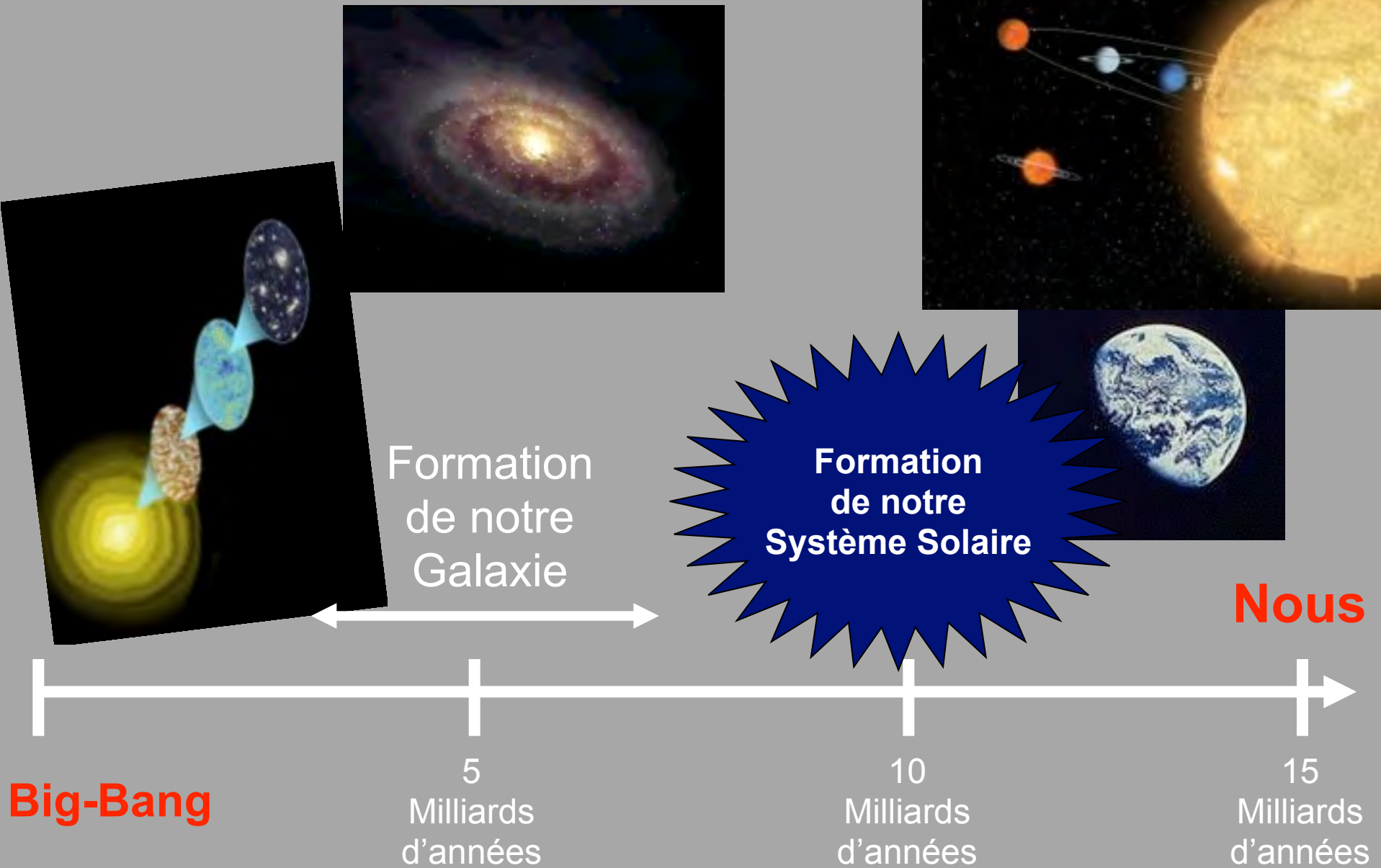
CSNSM-IN2P3-CNRS Orsay



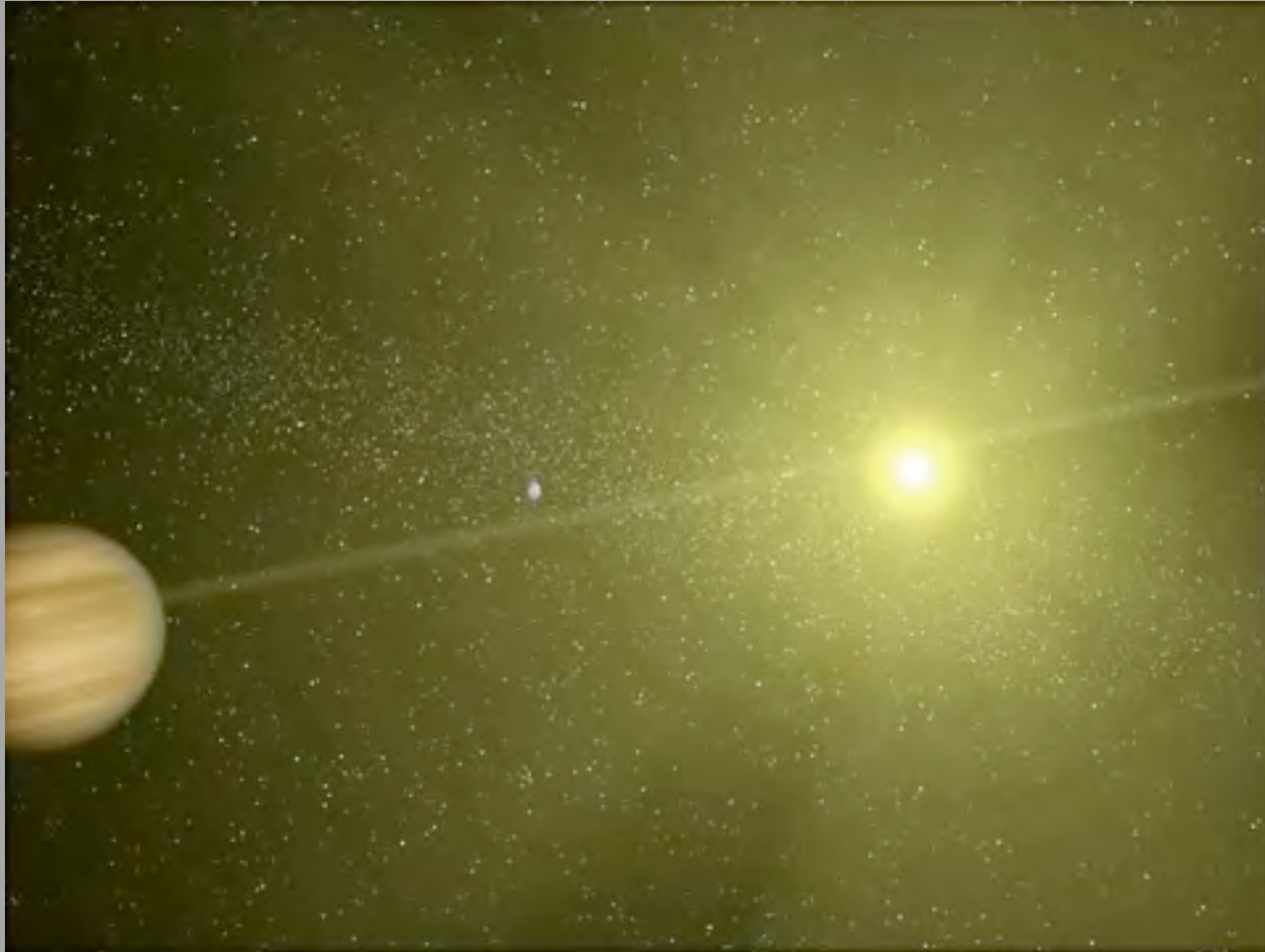
# Le cycle de la matière



# 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 ?

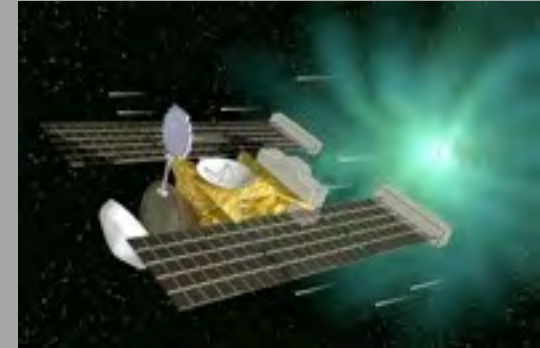
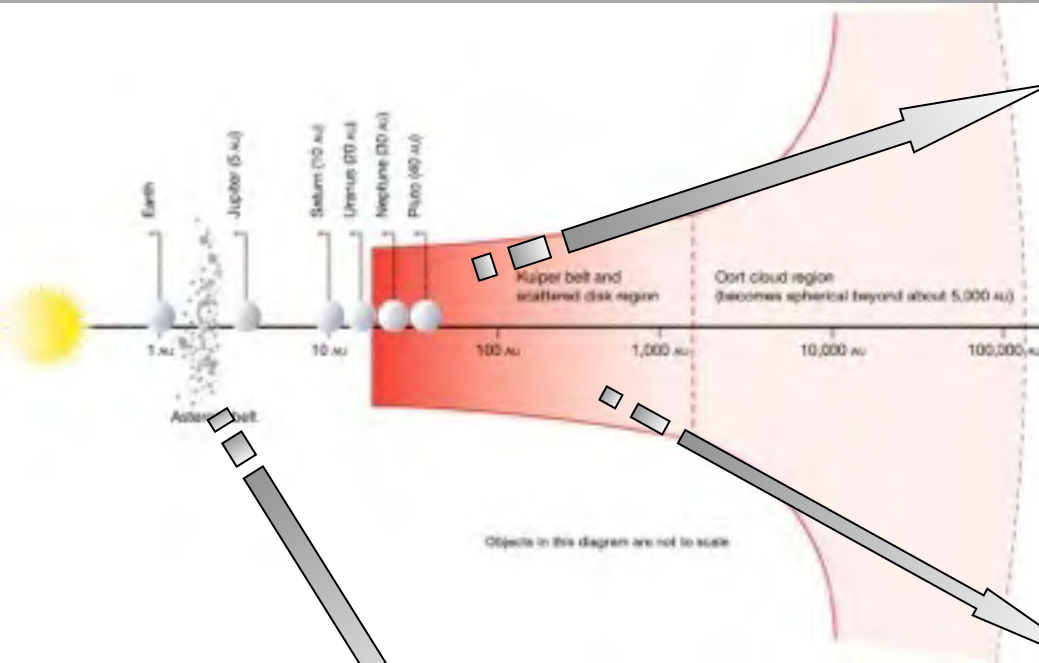
# Le système solaire actuel



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

La ligne des glaces marque la séparation entre le monde

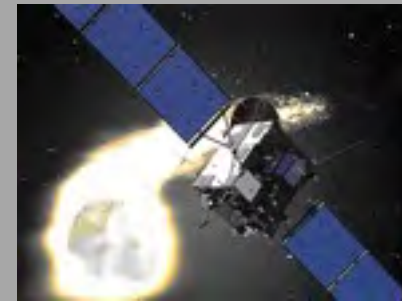
# Les petits corps du système solaire, astéroïdes & comètes



**STARDUST** mission  
(2006)



**Itokawa**  
*Mission Hayabusa*  
(2010)



**ROSETTA** mission  
(2014)

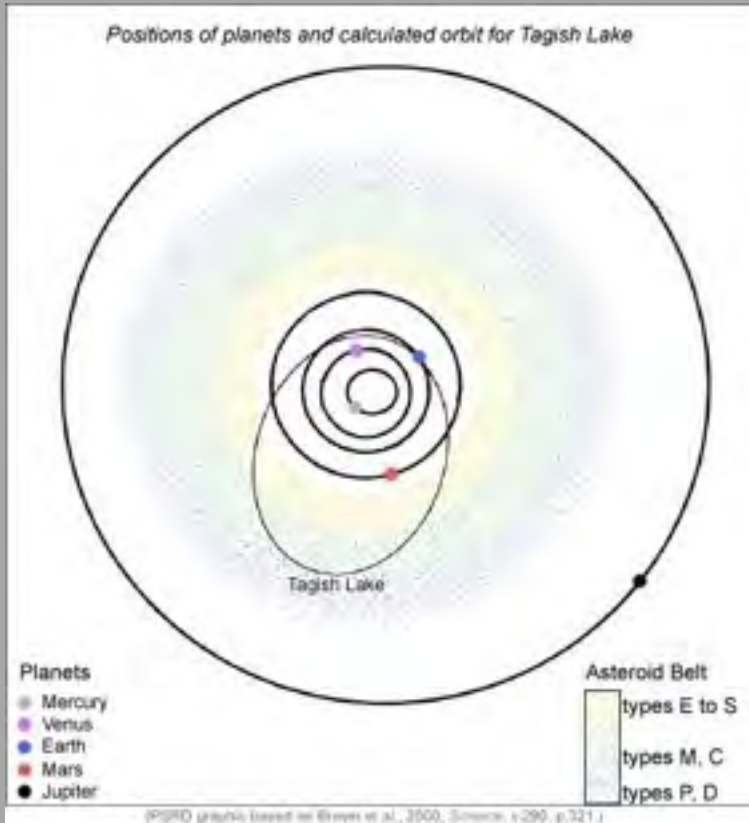


# Meteorites & Antartique



Antarctic Meteorite Research  
PI : R. Harvey, US

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



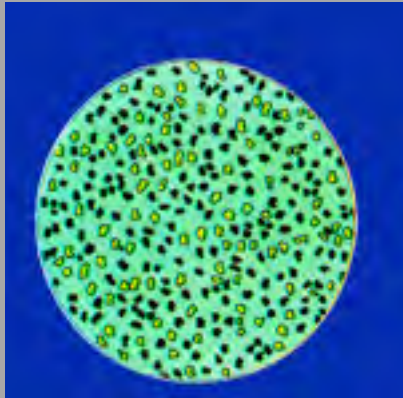
Brown et al. Science 2000



They are sampling a restricted part of the inner solar system

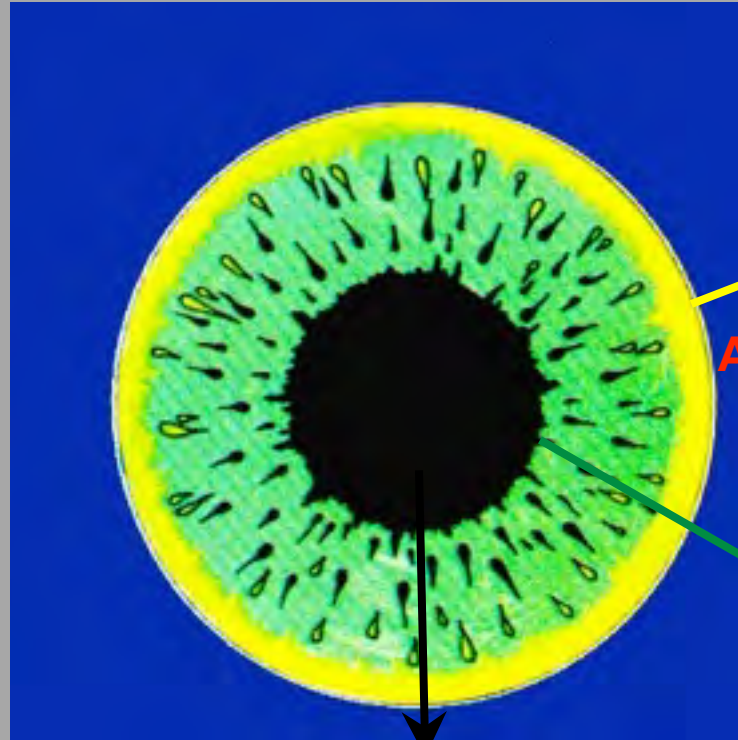


# Les météorites non-différenciées



les chondrites

# Les météorites différenciées



Achondrites



Mix

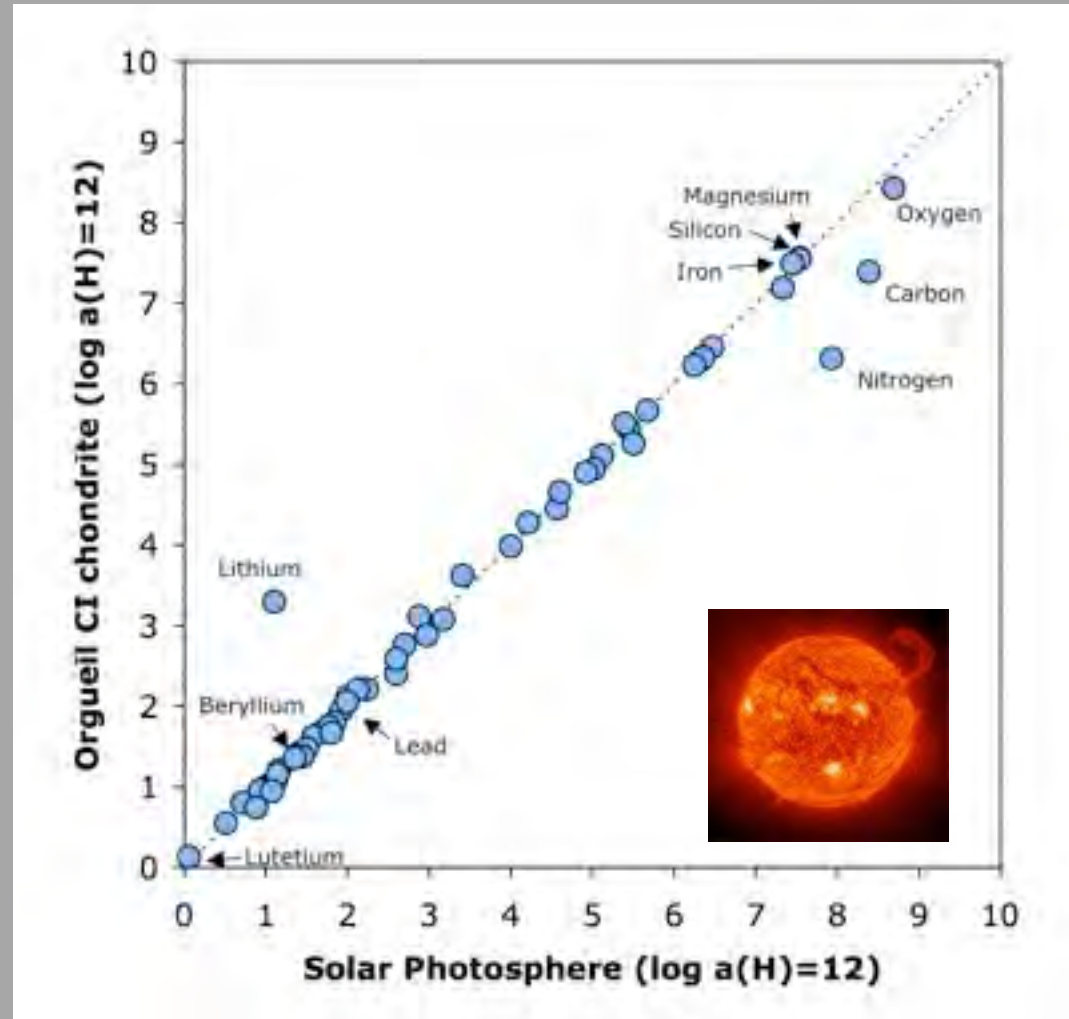


Iron

## La composition Soleil/ Chondrites



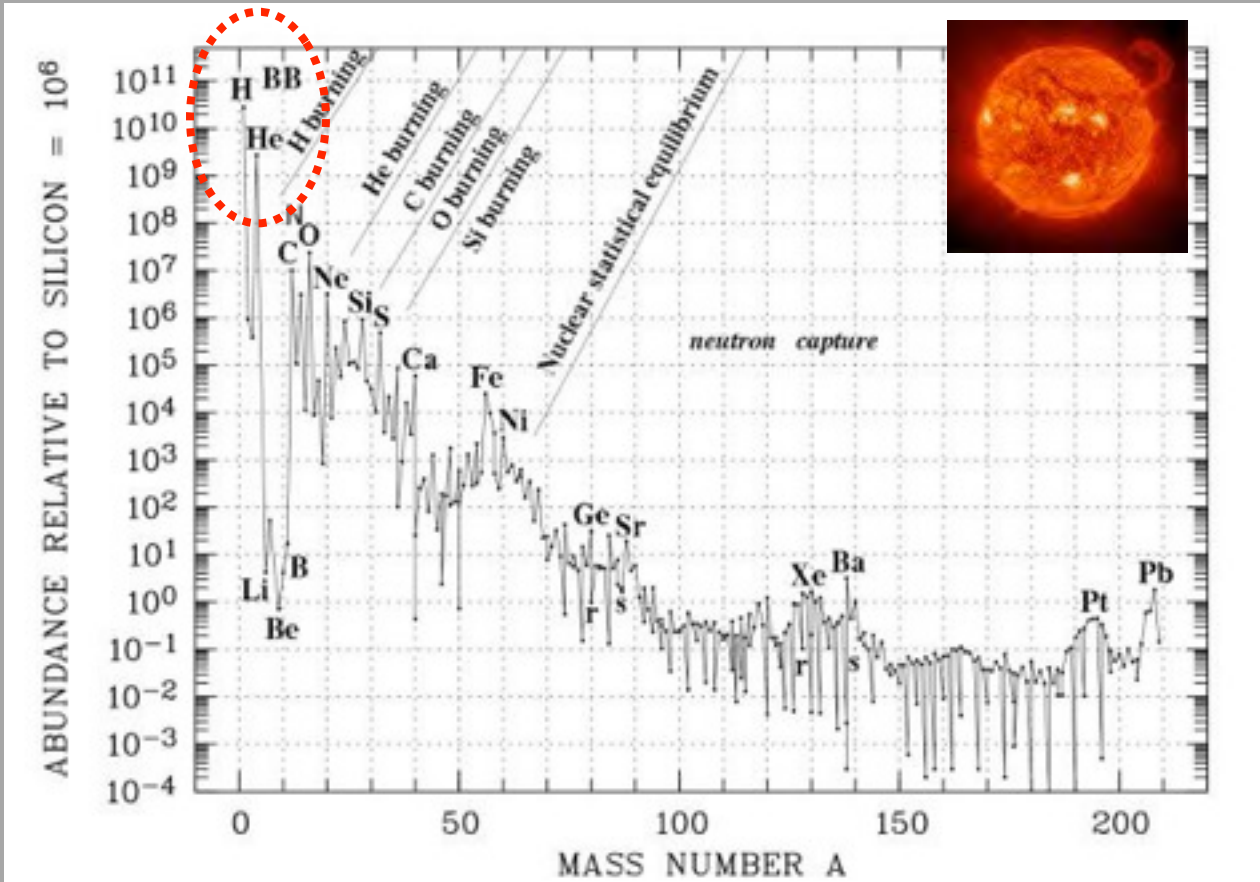
Orgueil (CI)



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**

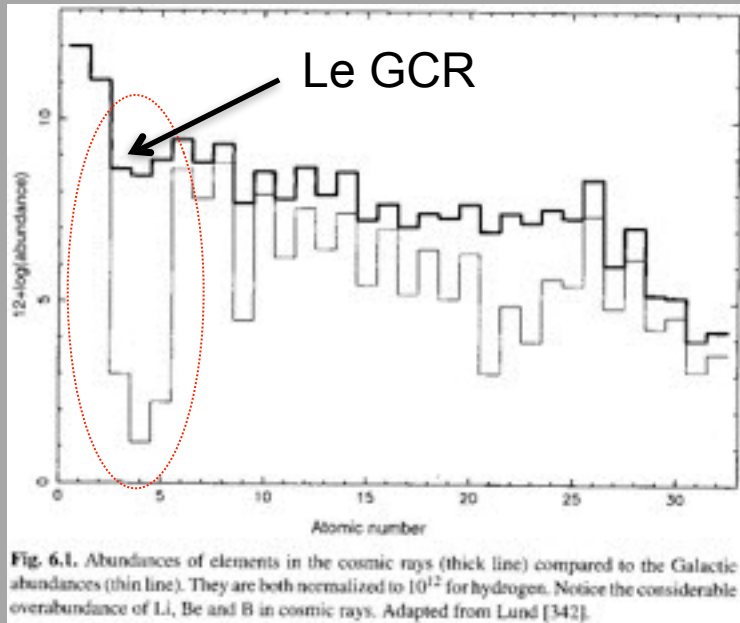
# La courbe d'abondance des éléments



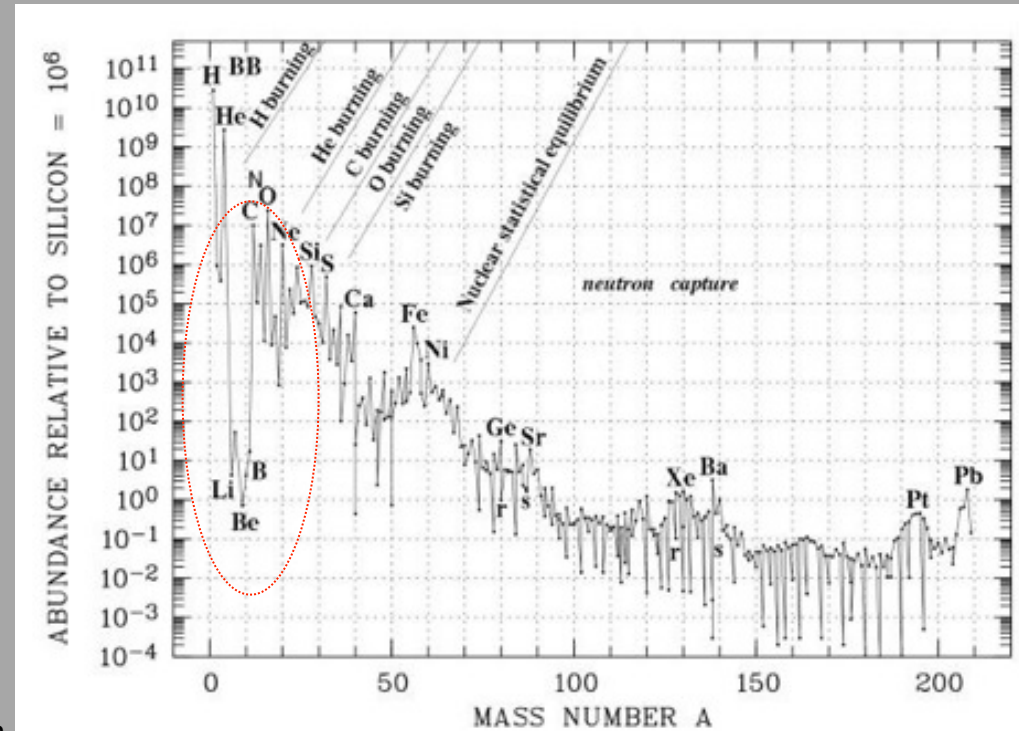
**Orgueil (CI)**

C'est notre Pierre de Rosette !

# Le rayonnement cosmique galactique et les éléments Li Be B

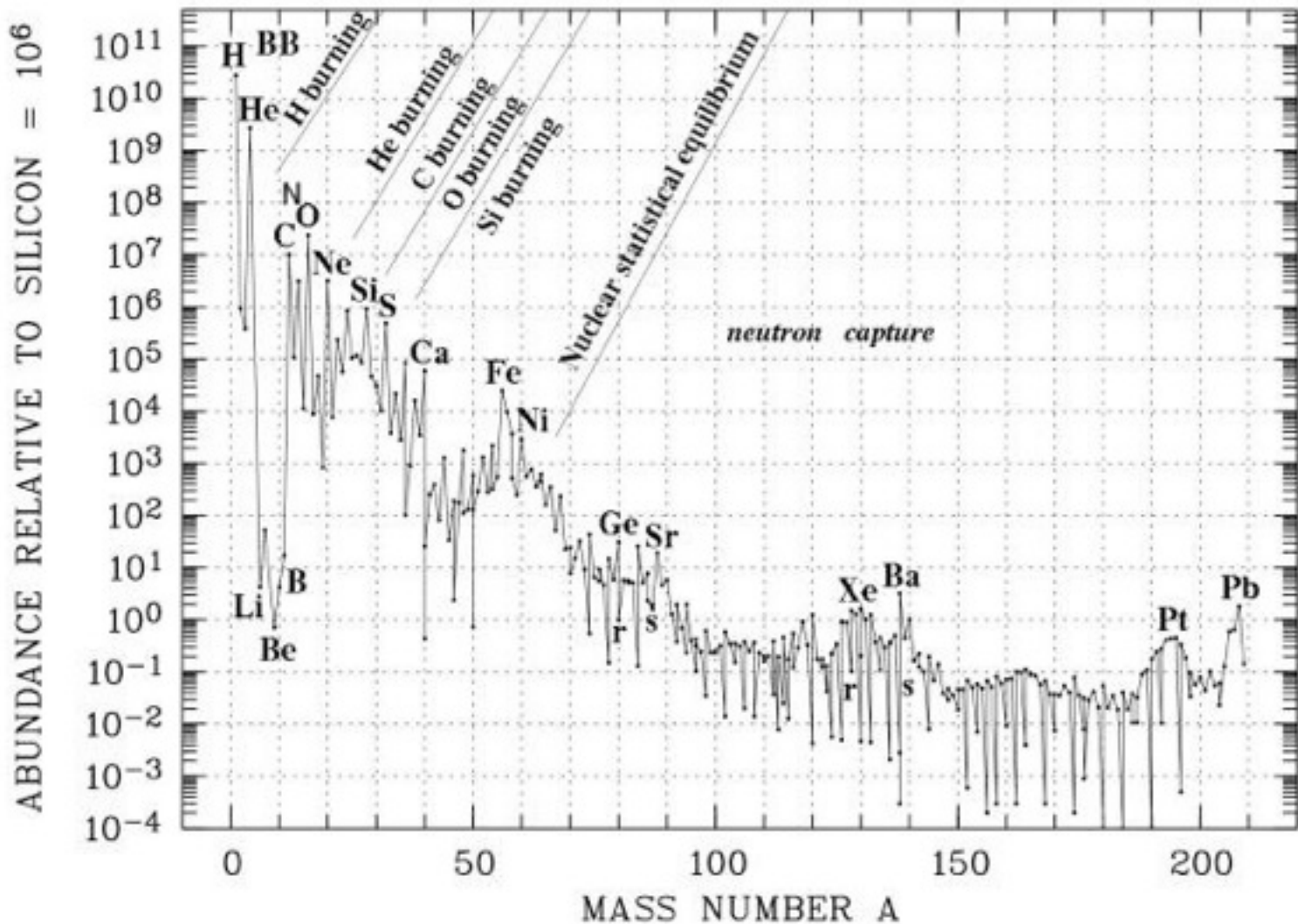


J. Lequeux The interstellar medium

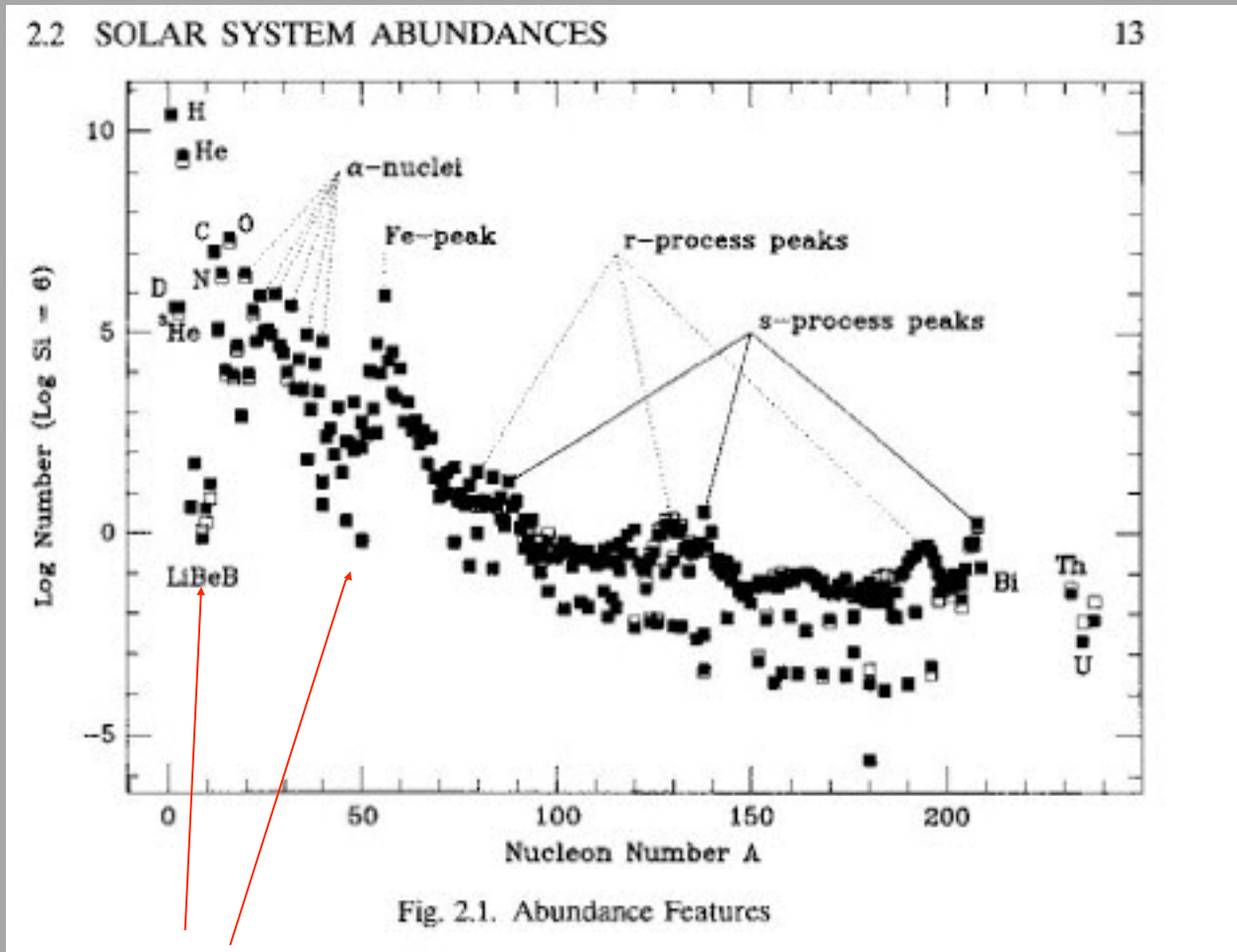


- Les éléments Li Be B sont détruits dans les étoiles
- Ils sont produits par réactions non-thermiques dans le milieu interstellaire

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

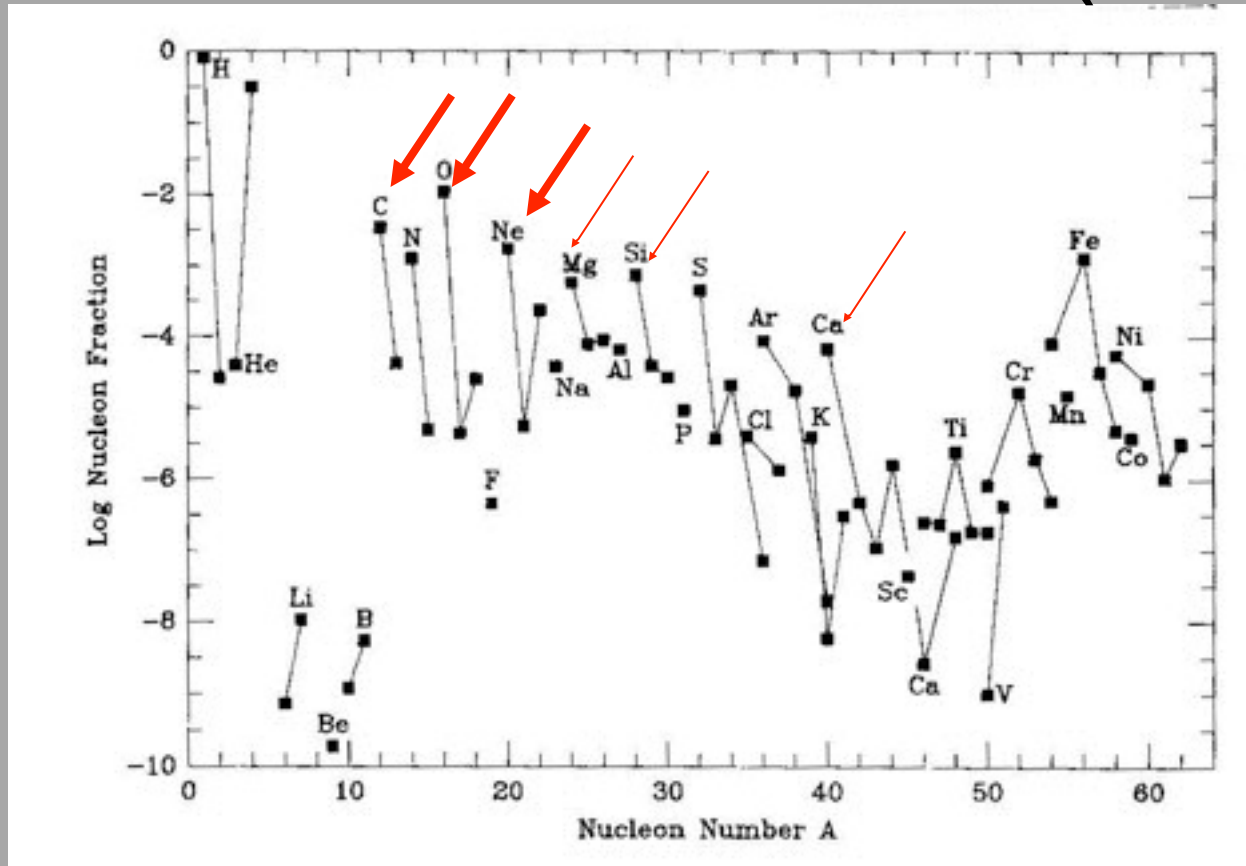


# Des vallées se dessinent...



De faibles énergies de liaisons (LiBeB et Sc)

# En dessous du Calcium ( $Z < 20$ )



## Les noyaux alpha :

$^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$  (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)

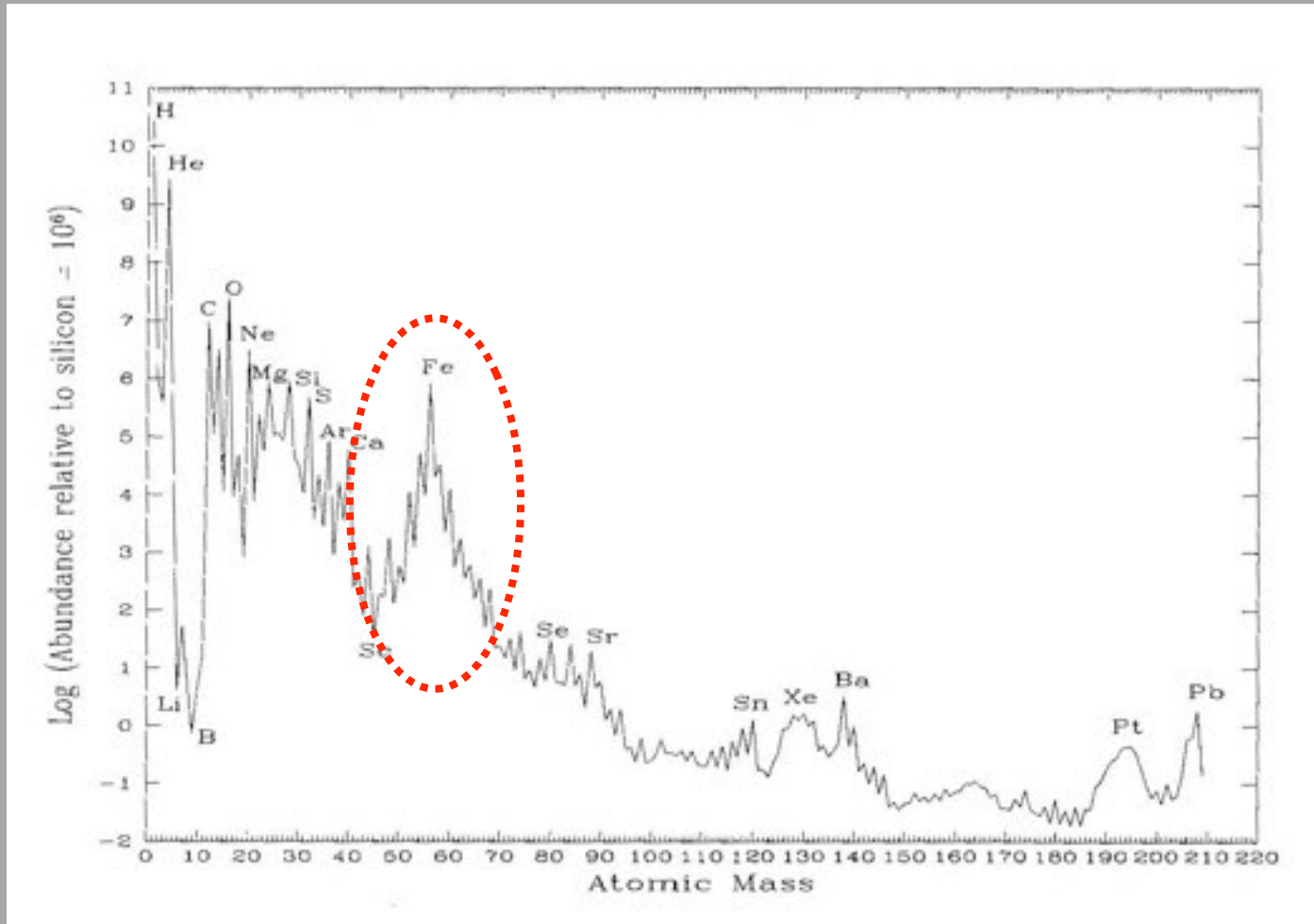
Les noyaux  $N=Z$  sont les plus  
abondants

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

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

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

# Un accident notable : le pic du Fer



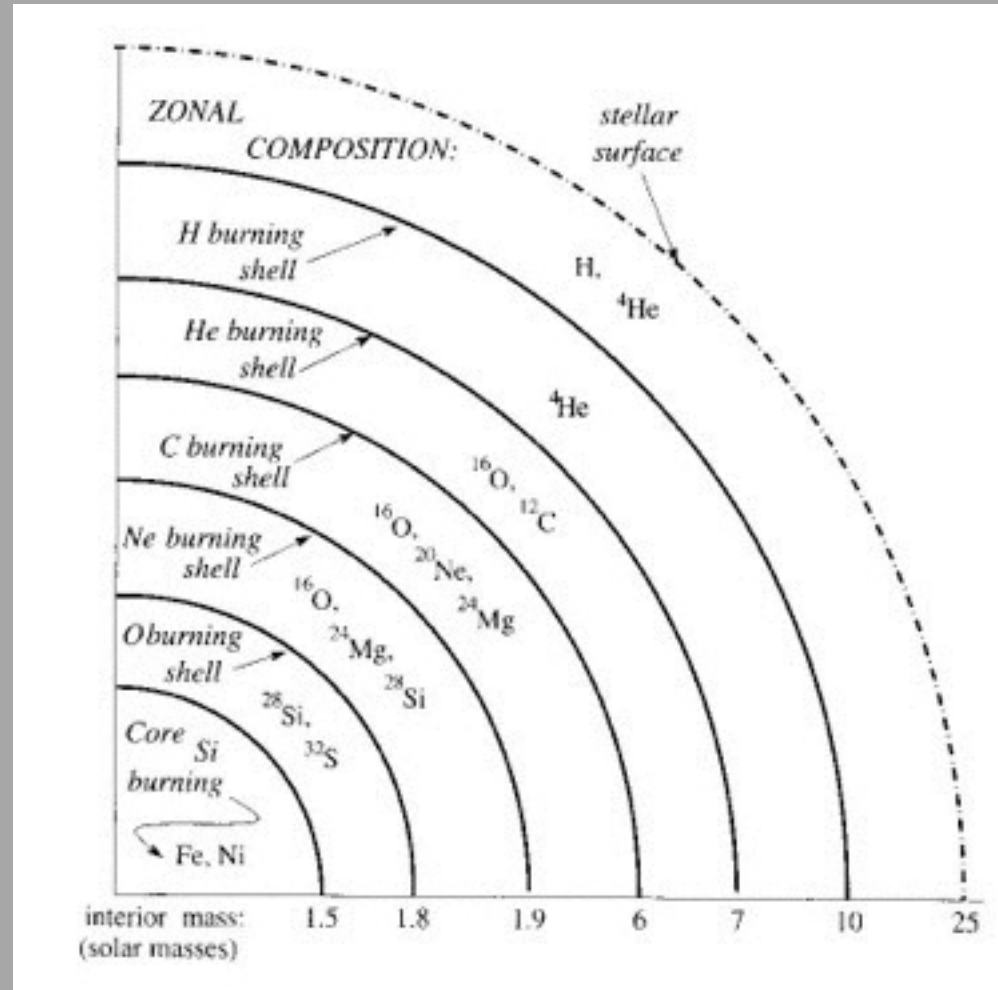
Les noyaux autour de  $A=50-60$  (Cr, Fe, Ni, Co ...) sont sur-abondants par rapport à leur voisins



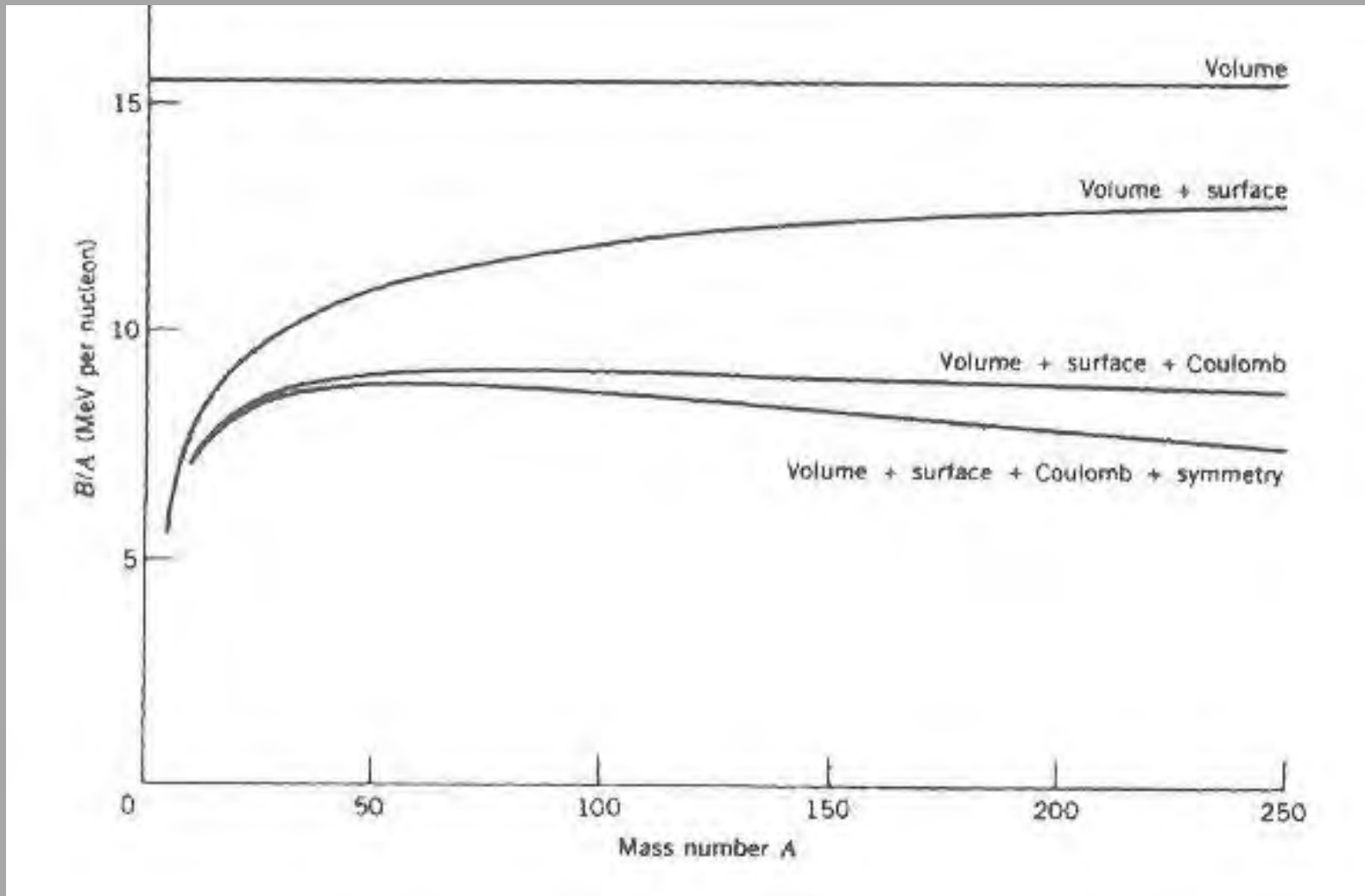
# La structure d'une étoile, vision schématique

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

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

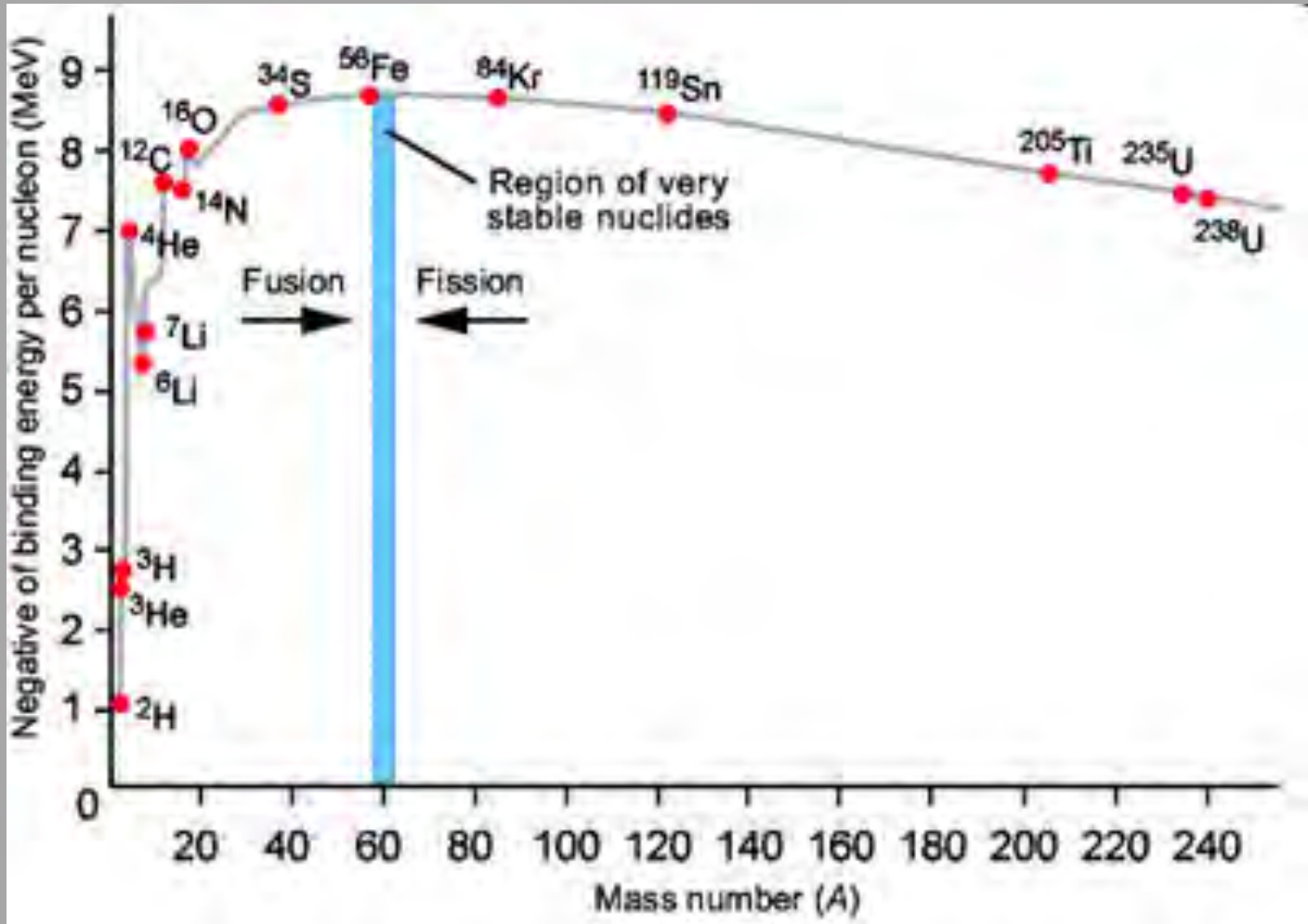


# Eléments de physique nucléaire



- 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

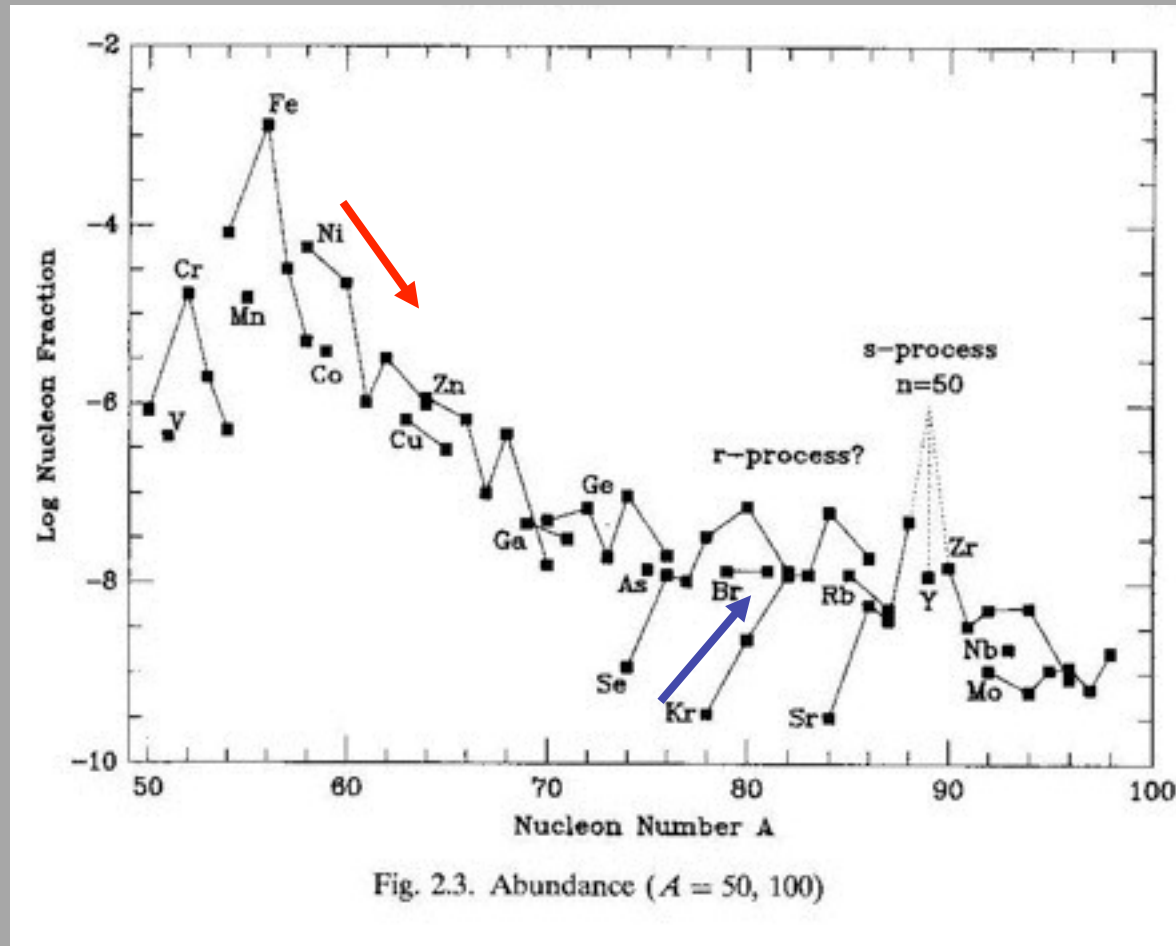


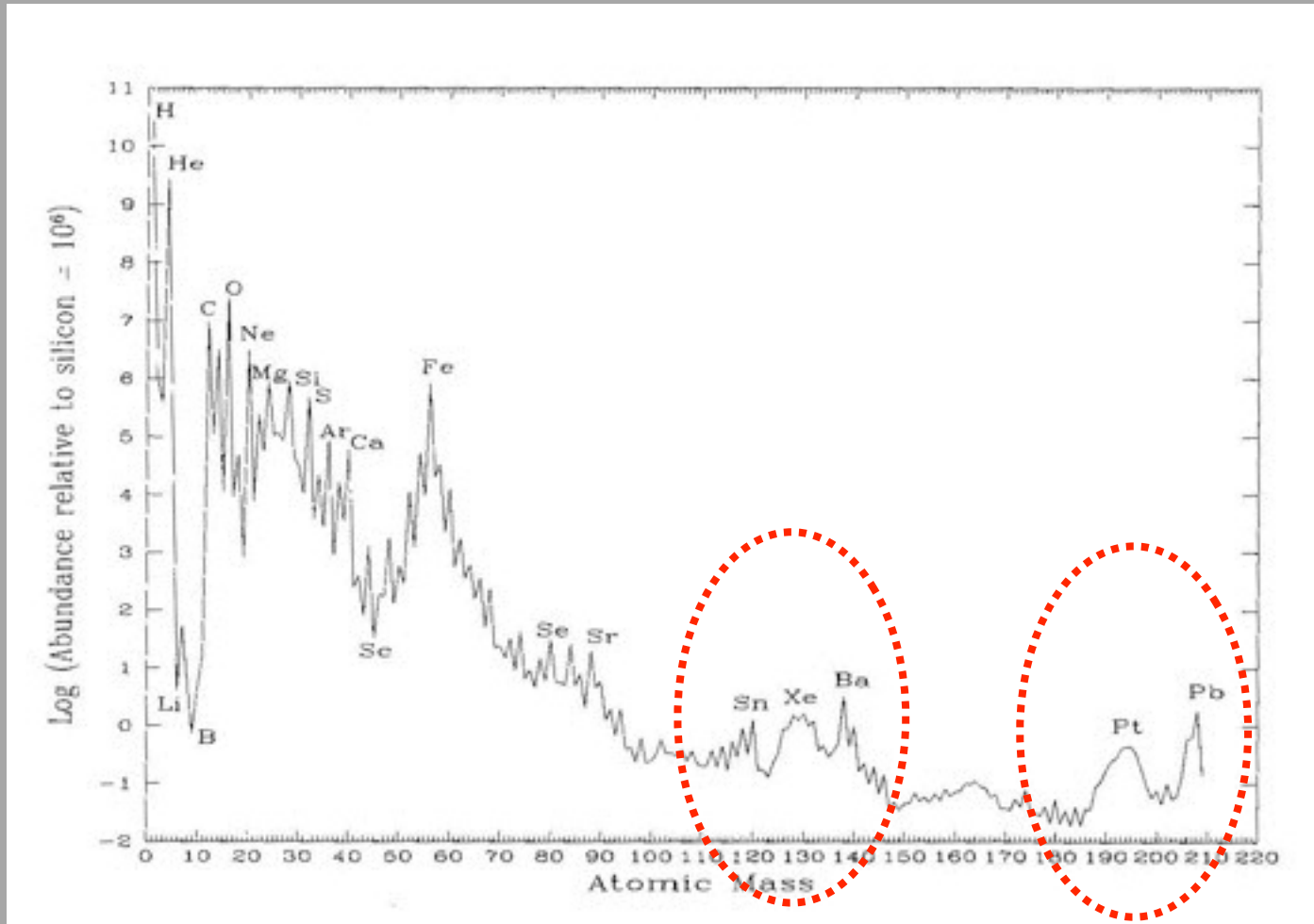
Fig. 2.3. Abundance ( $A = 50, 100$ )

**Avant le Ge : les isotopes pauvres en neutron sont majoritaires**

**Après de Ge : les isotopes riches en neutron sont majoritaires**

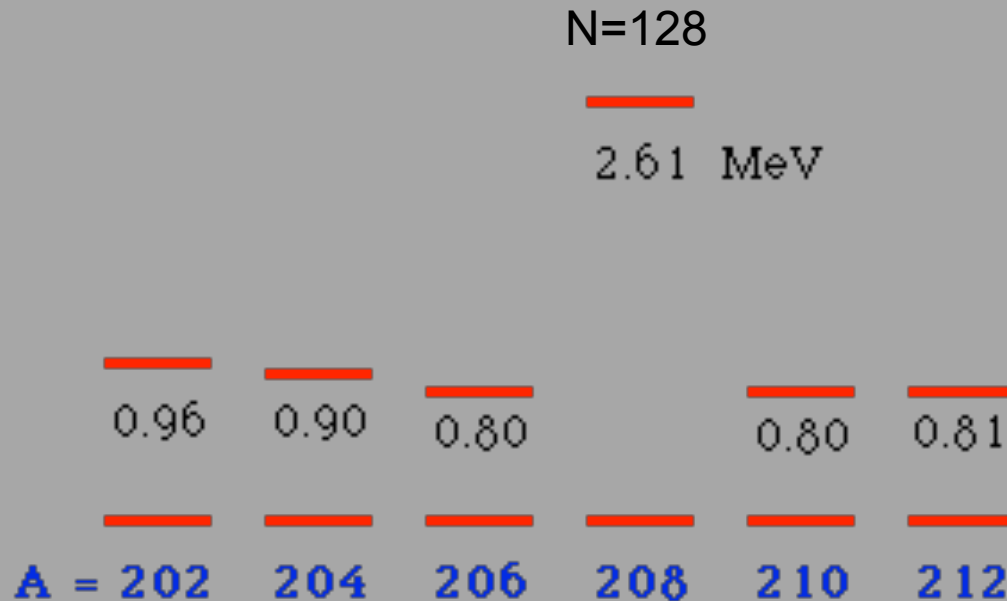
Lorsque la barrière coulombienne devient importante, la capture de neutrons prend le dessus

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



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

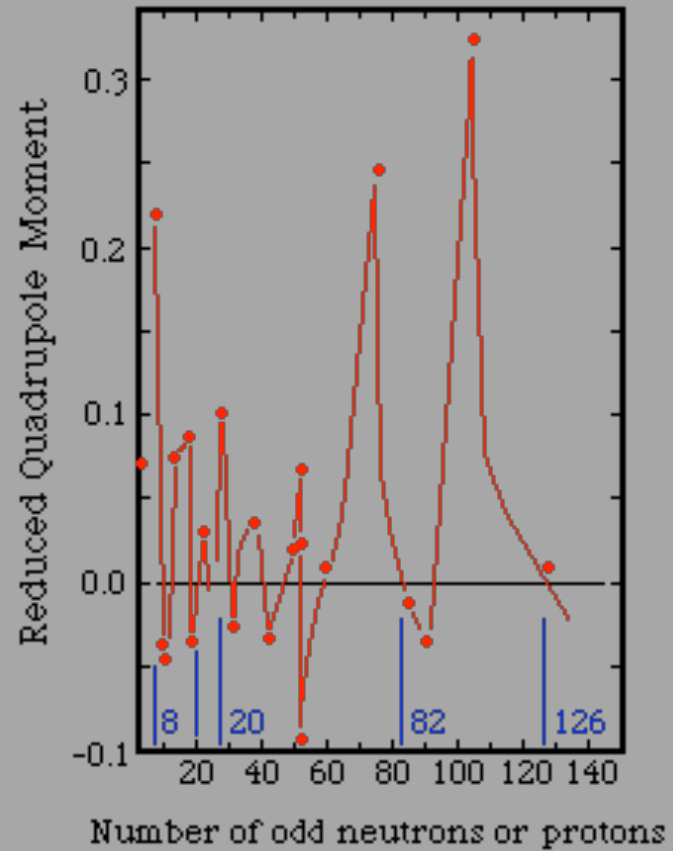
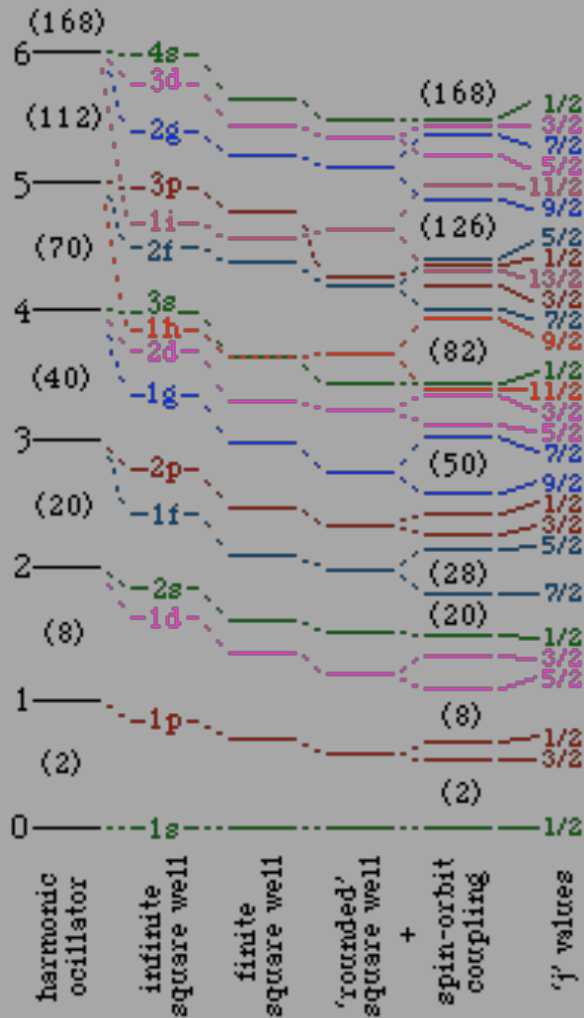
# Les noyaux magiques



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

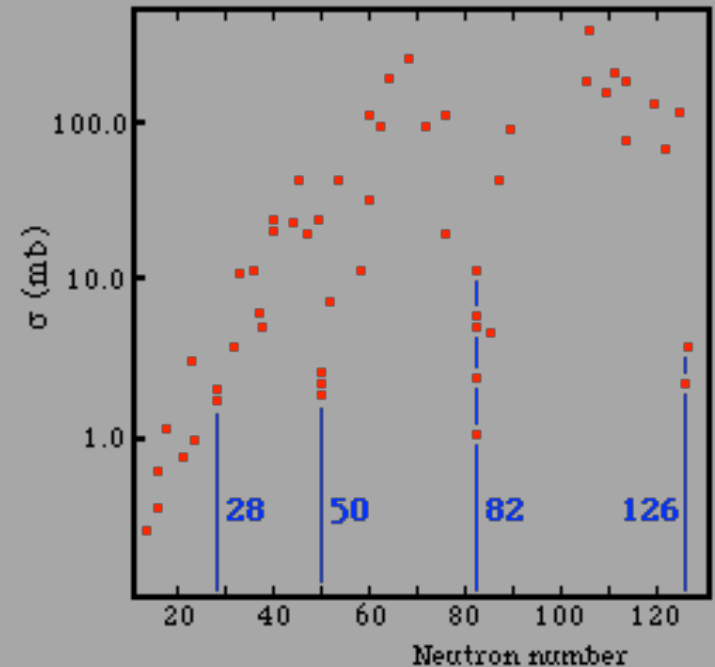
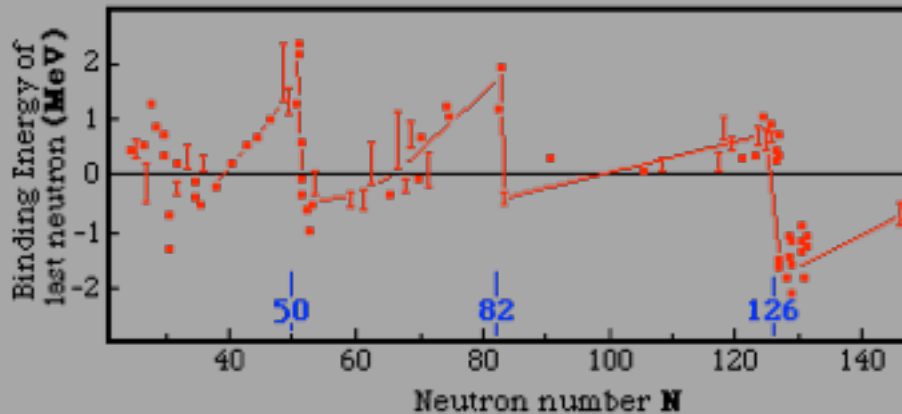
Le long d'une chaîne isotopique certains noyaux sont plus stables que d'autres, ce sont les noyaux magiques, Ils sont l'équivalent des « ***gaz rares nucléaires*** »

# 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)

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



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

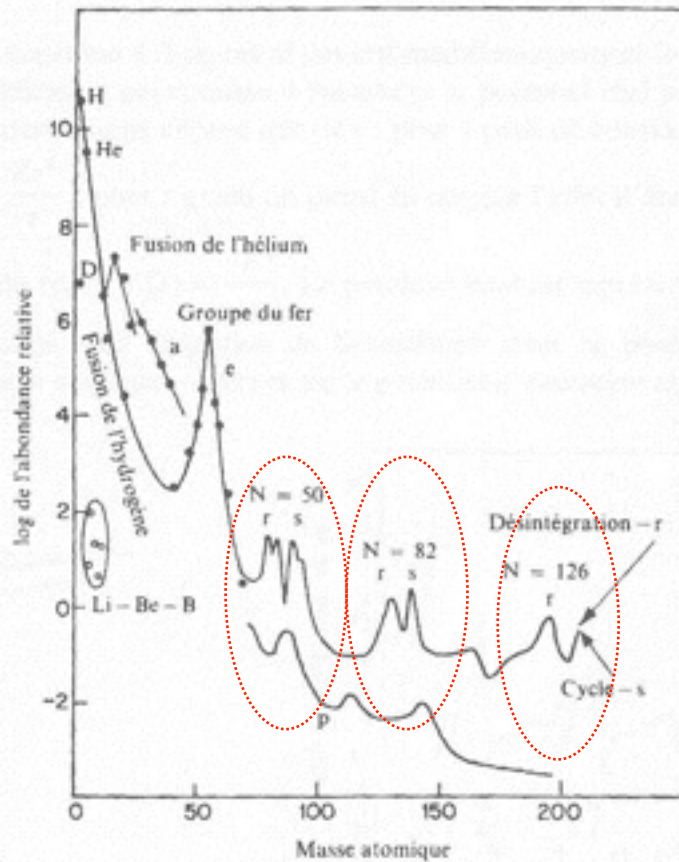
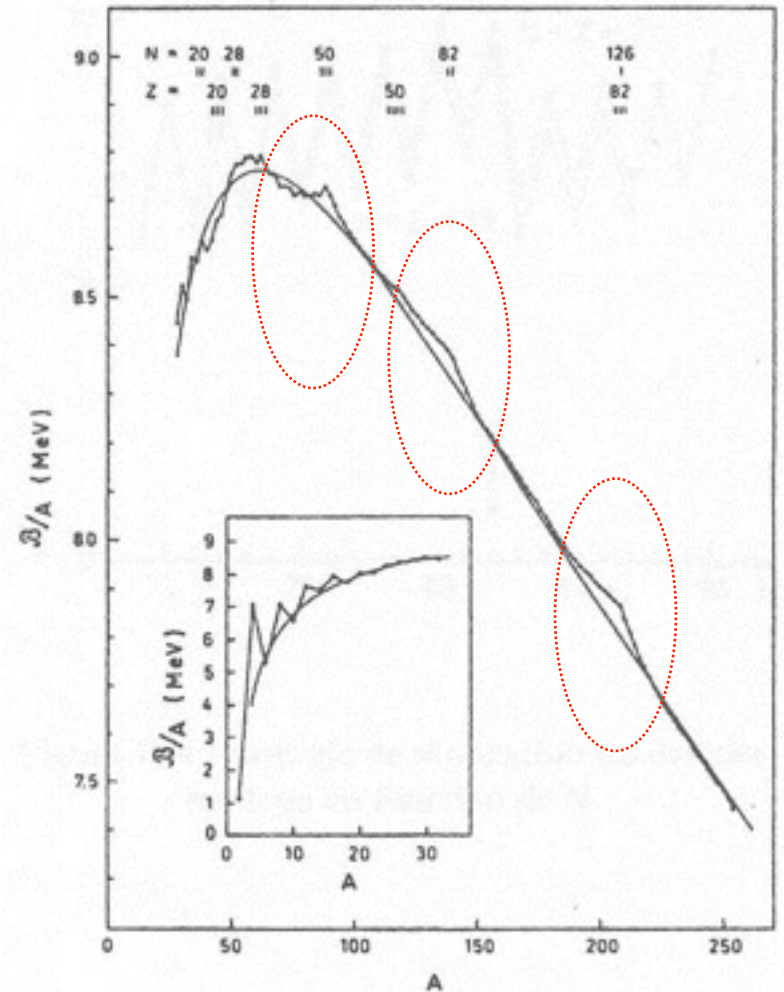
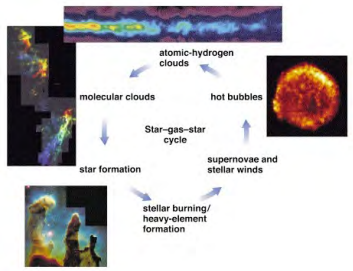


Figure III-2 : Abondance des éléments dans l'univers (vue générale) [Val85].



# 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**.

