



Le Soleil notre étoile

Rudiments de physique stellaire

Roland Lehoucq
CEA Saclay, Service d'astrophysique

Qu'est-ce qu'une étoile ?

Une grosse sphère
de gaz chaud !

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\odot} = 6,96 \cdot 10^5 \text{ km} \\ M_{\odot} = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg} \\ L_{\odot} = 3,83 \cdot 10^{26} \text{ W} \\ T_s = 5\,750 \text{ K} \end{array} \right.$$

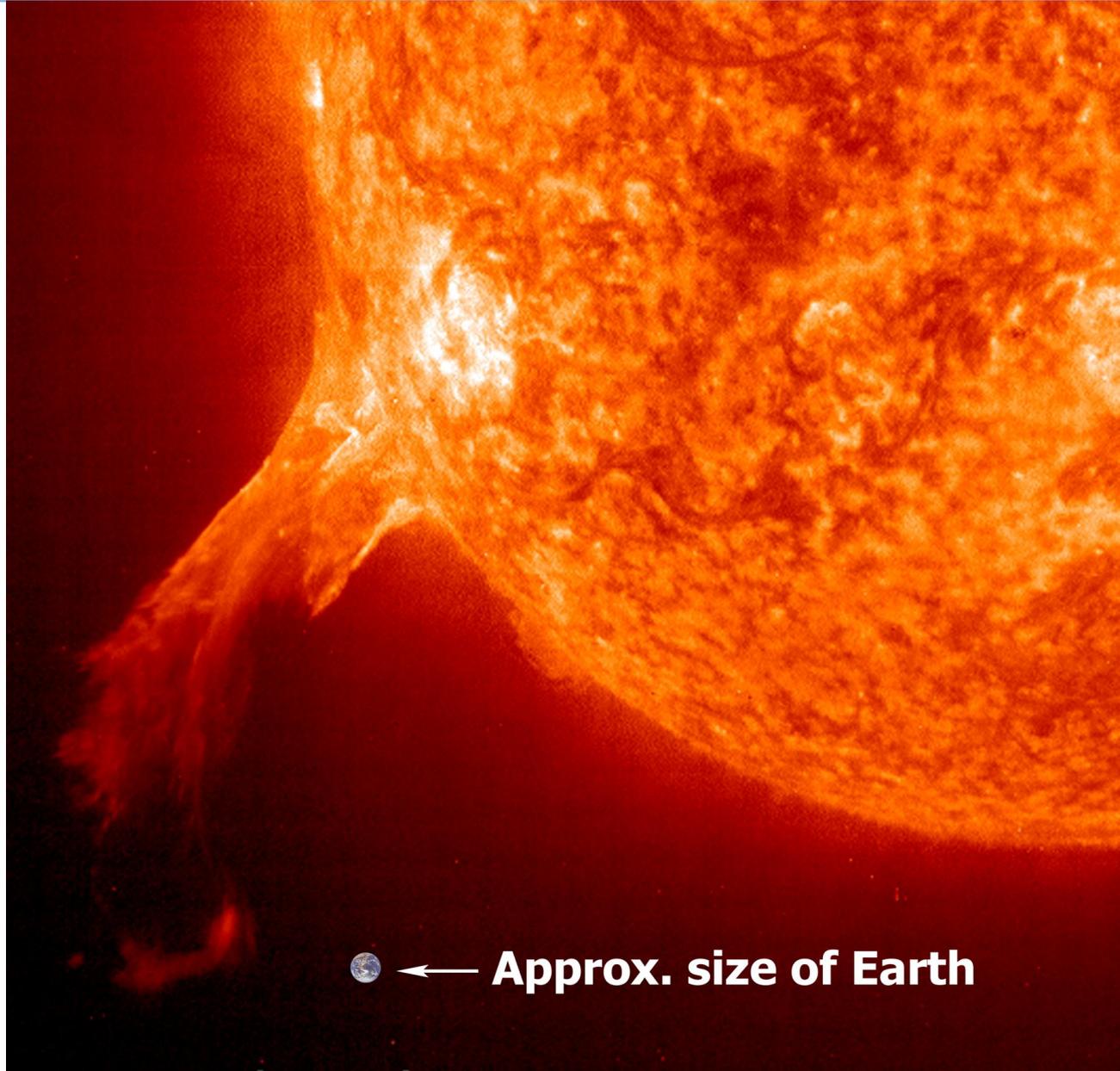
$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\star} = 10^{-2} - 10^3 R_{\odot} \\ M_{\star} = 10^{-1} - 10^2 M_{\odot} \\ L_{\star} = 10^{-3} - 10^6 L_{\odot} \\ T_{\star} = 2\,000 - 50\,000 \text{ K} \end{array} \right.$$

Composition photosphérique
(en masse) :

73,5 % hydrogène

24,9 % hélium

1,6 % autres



 ← **Approx. size of Earth**

Tailles comparées

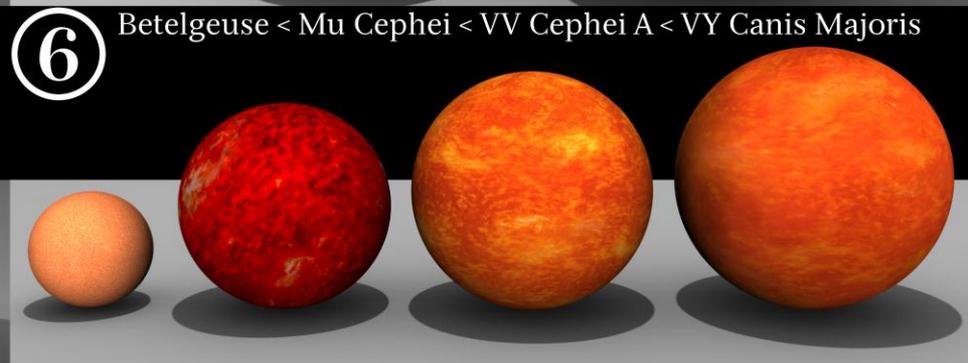
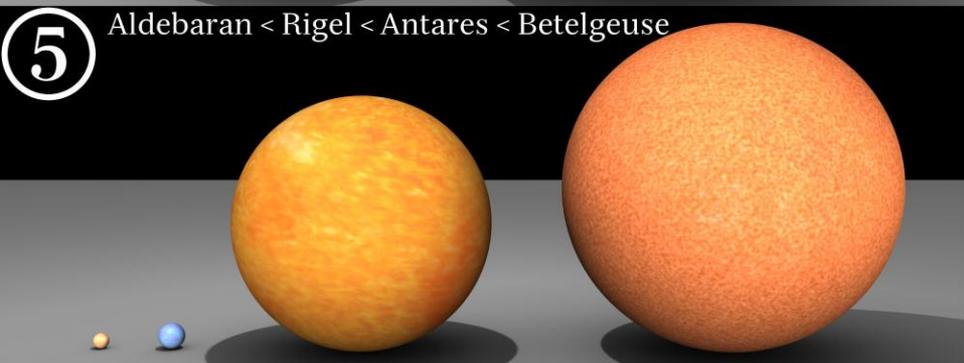
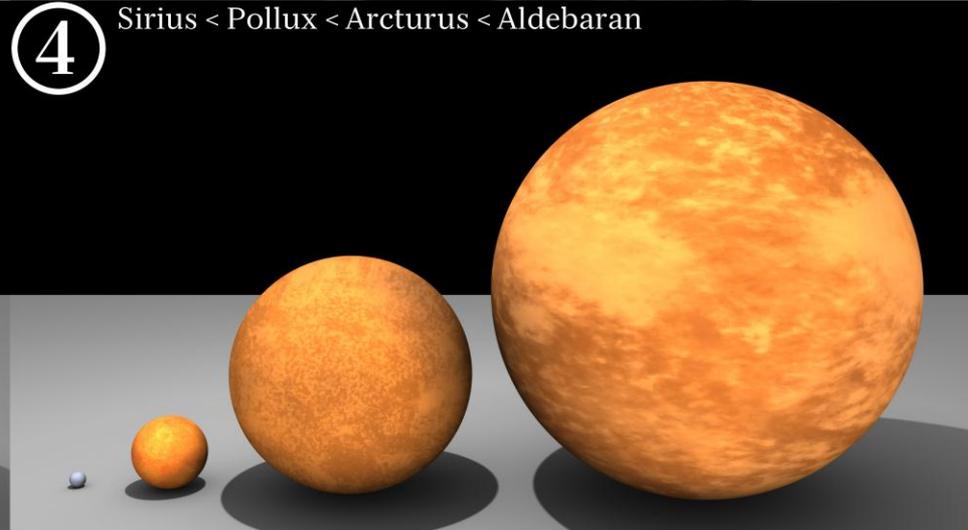
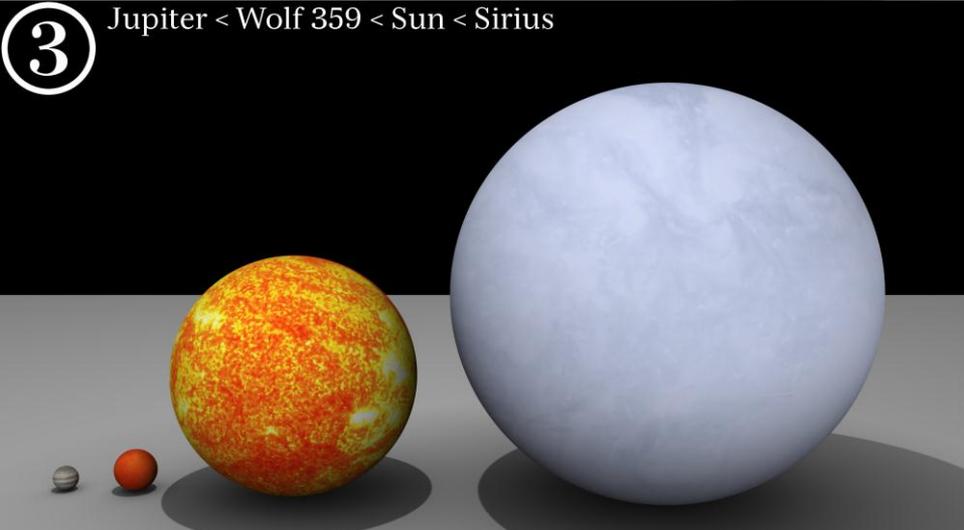
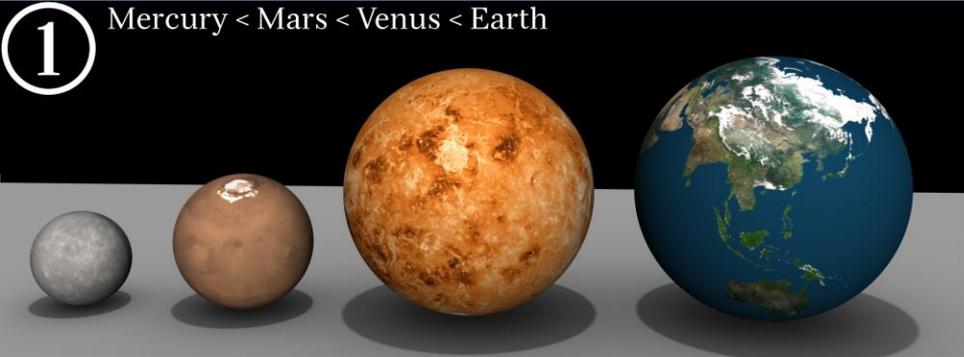


Diagramme de Hertzsprung-Russell (1910)

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

Constante de Stefan

$$\sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{k^4}{h^3 c^2}$$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$$

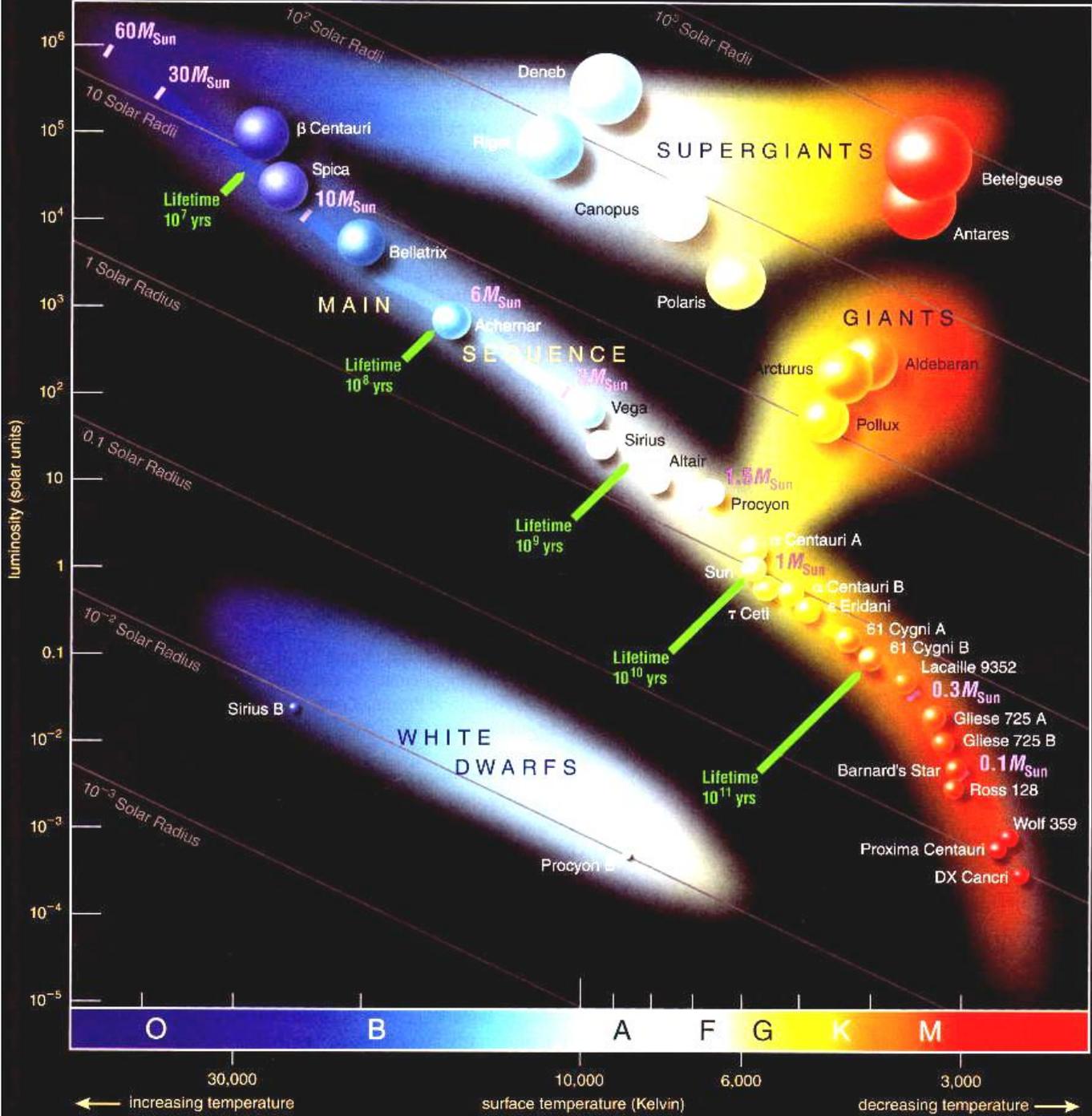
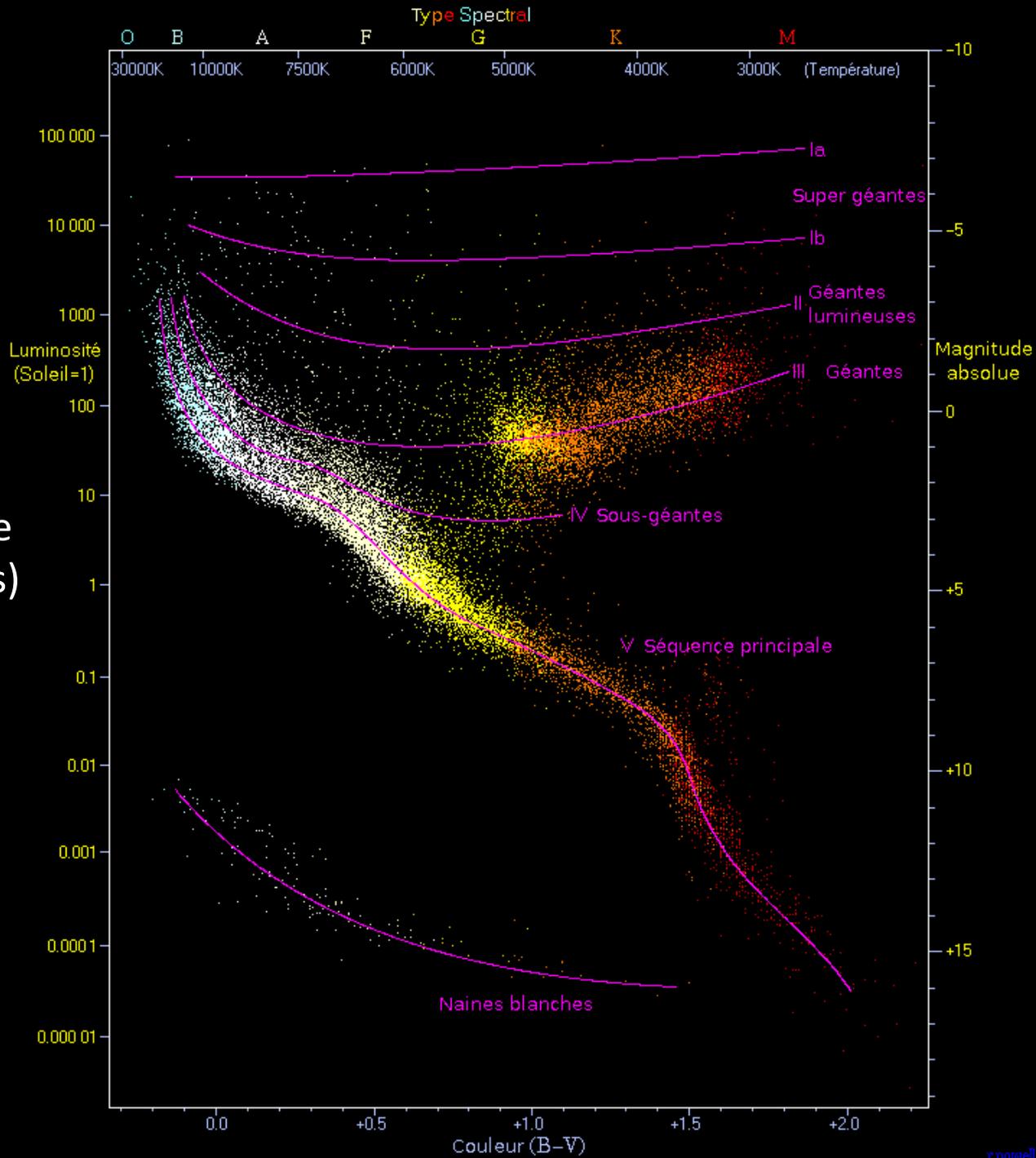


Diagramme HR réalisé grâce à Hipparcos (118 000 étoiles)



1. COHÉSION ET STABILITÉ D'UNE ÉTOILE

Entre l'envol et la chute...

Les « cailloux »



Dactyl
[[243] Ida I]
1.6 × 1.2 km
Galileo, 1993

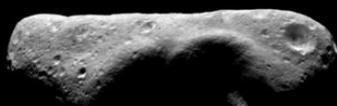
243 Ida - 58.8 × 25.4 × 18.6 km
Galileo, 1993



9969 Braille
2.1 × 1 × 1 km
Deep Space 1, 1999

5535 Annefrank
6.6 × 5.0 × 3.4 km
Stardust, 2002

2867 Steins
5.9 × 4.0 km
Rosetta, 2008

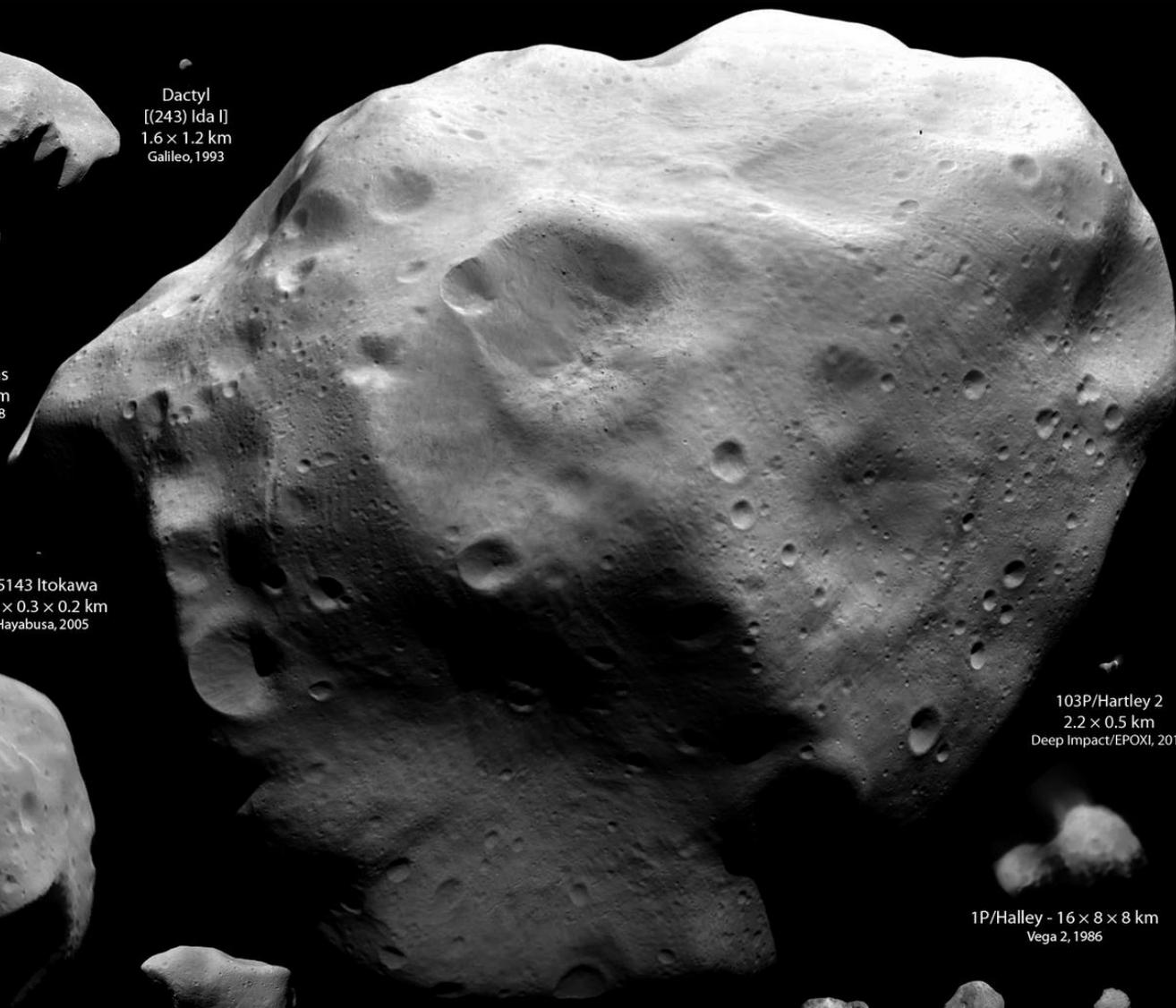


433 Eros - 33 × 13 km
NEAR, 2000

25143 Itokawa
0.5 × 0.3 × 0.2 km
Hayabusa, 2005



253 Mathilde - 66 × 48 × 44 km
NEAR, 1997



951 Gaspra - 18.2 × 10.5 × 8.9 km
Galileo, 1991

103P/Hartley 2
2.2 × 0.5 km
Deep Impact/EPOXI, 2010

1P/Halley - 16 × 8 × 8 km
Vega 2, 1986

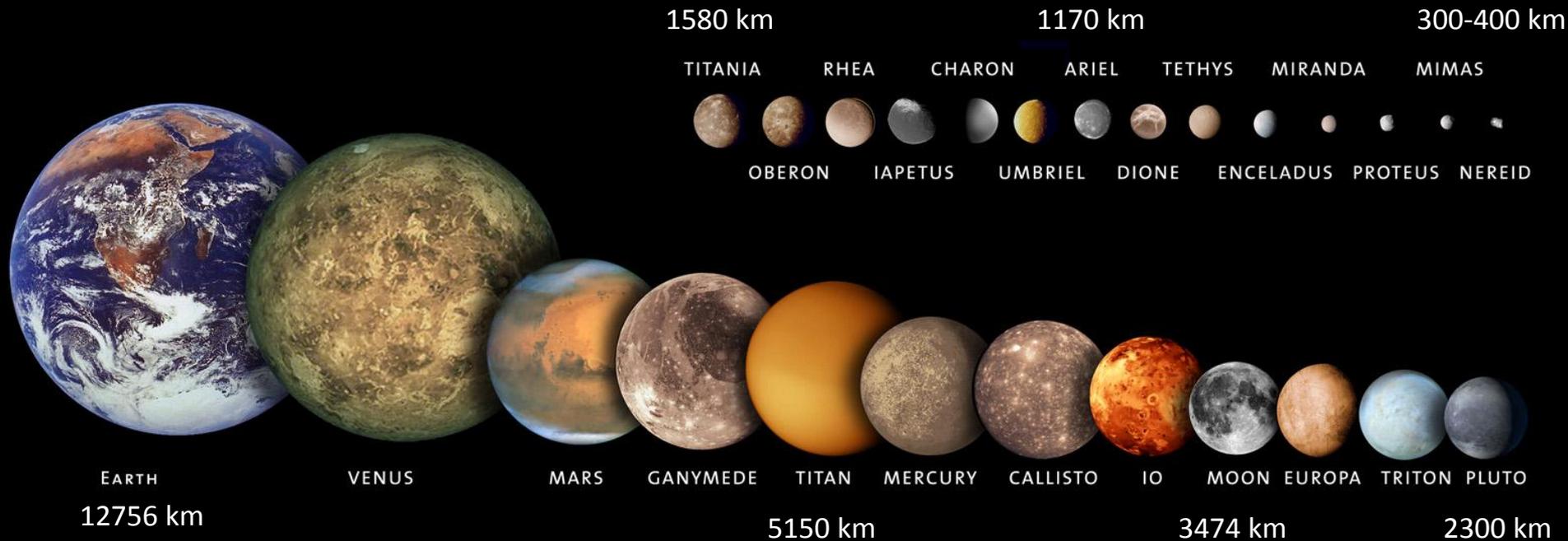
21 Lutetia - 132 × 101 × 76 km
Rosetta, 2010

19P/Borrelly
8 × 4 km
Deep Space 1, 2001

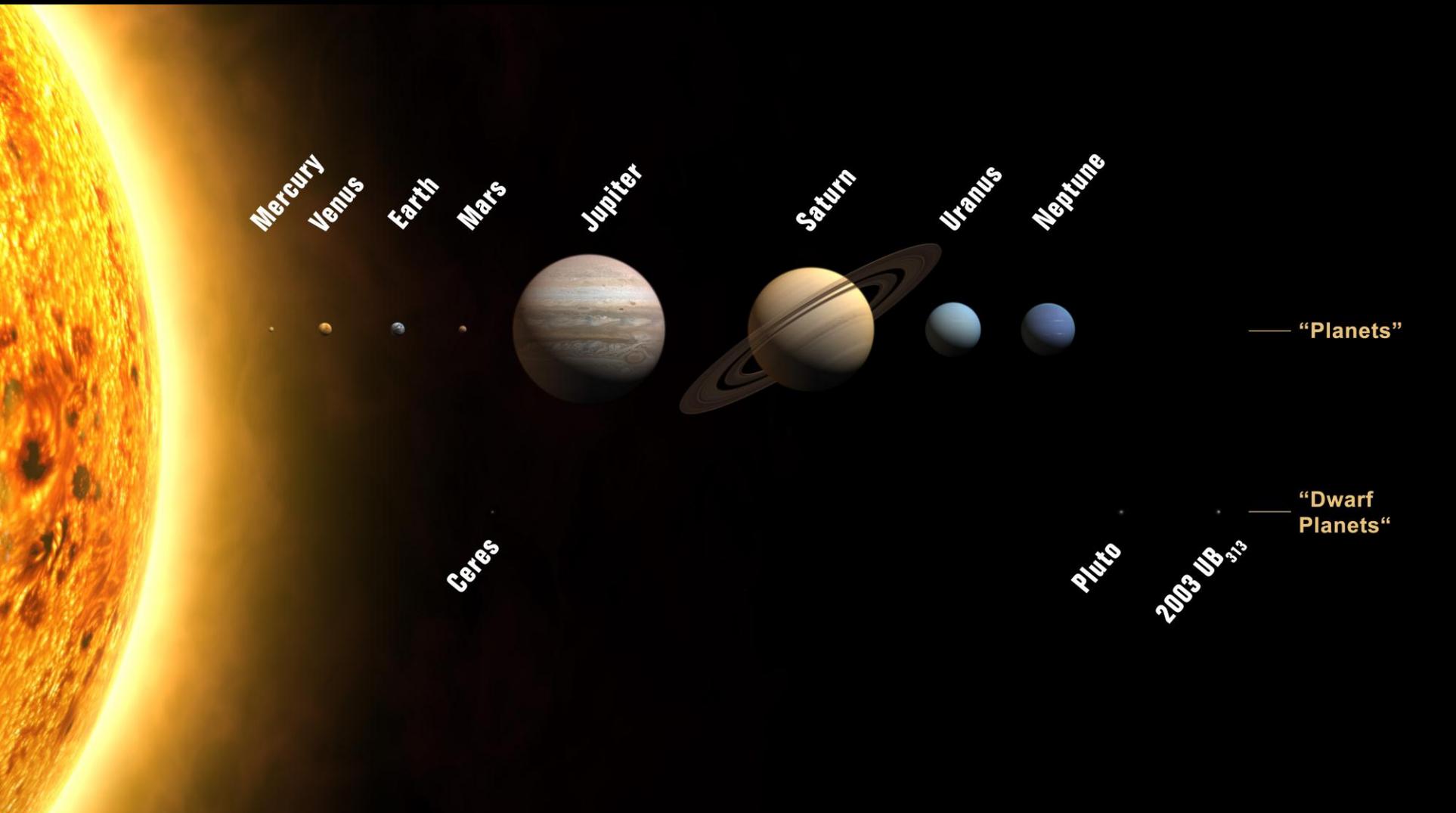
9P/Tempel 1
7.6 × 4.9 km
Deep Impact, 2005

81P/Wild 2
5.5 × 4.0 × 3.3 km
Stardust, 2004

Du petits corps à la planète



De la planète à l'étoile

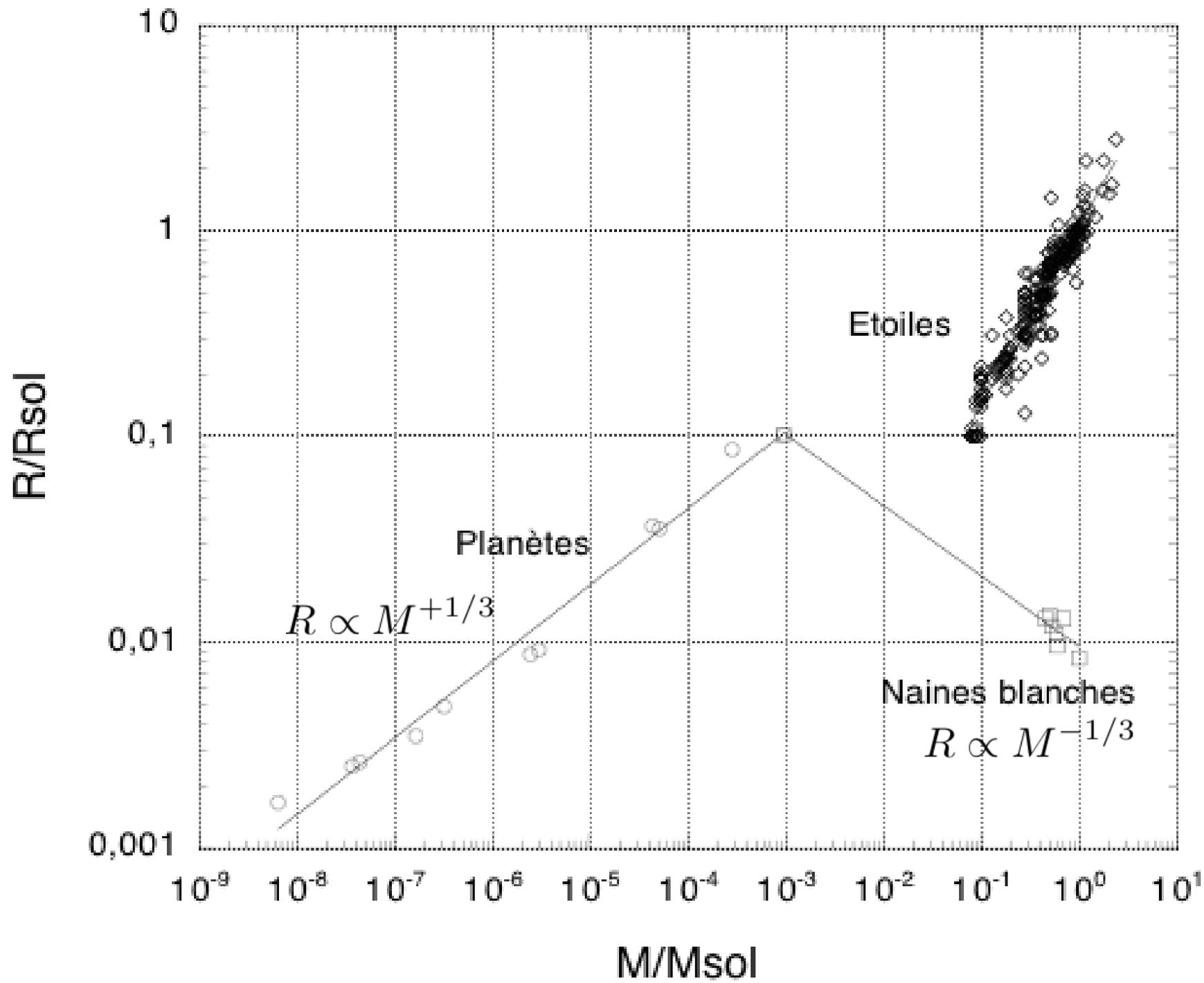


D'où vient la cohésion d'une étoile ?

- Les forces nucléaires sont disqualifiées par leur portée (10^{-15} m).
- La force électrostatique est disqualifiée parce qu'elle est saturée
- Ne reste que la force de gravité, bien qu'elle soit faible...

La gravité domine l'électrostatique dès que le nombre de particules dépasse « le nombre planétaire »

$$N_p = \left(\frac{e^2}{Gm_p^2} \right)^{3/2} = \left(\frac{\alpha}{\alpha_G} \right)^{3/2} \approx 10^{54}$$



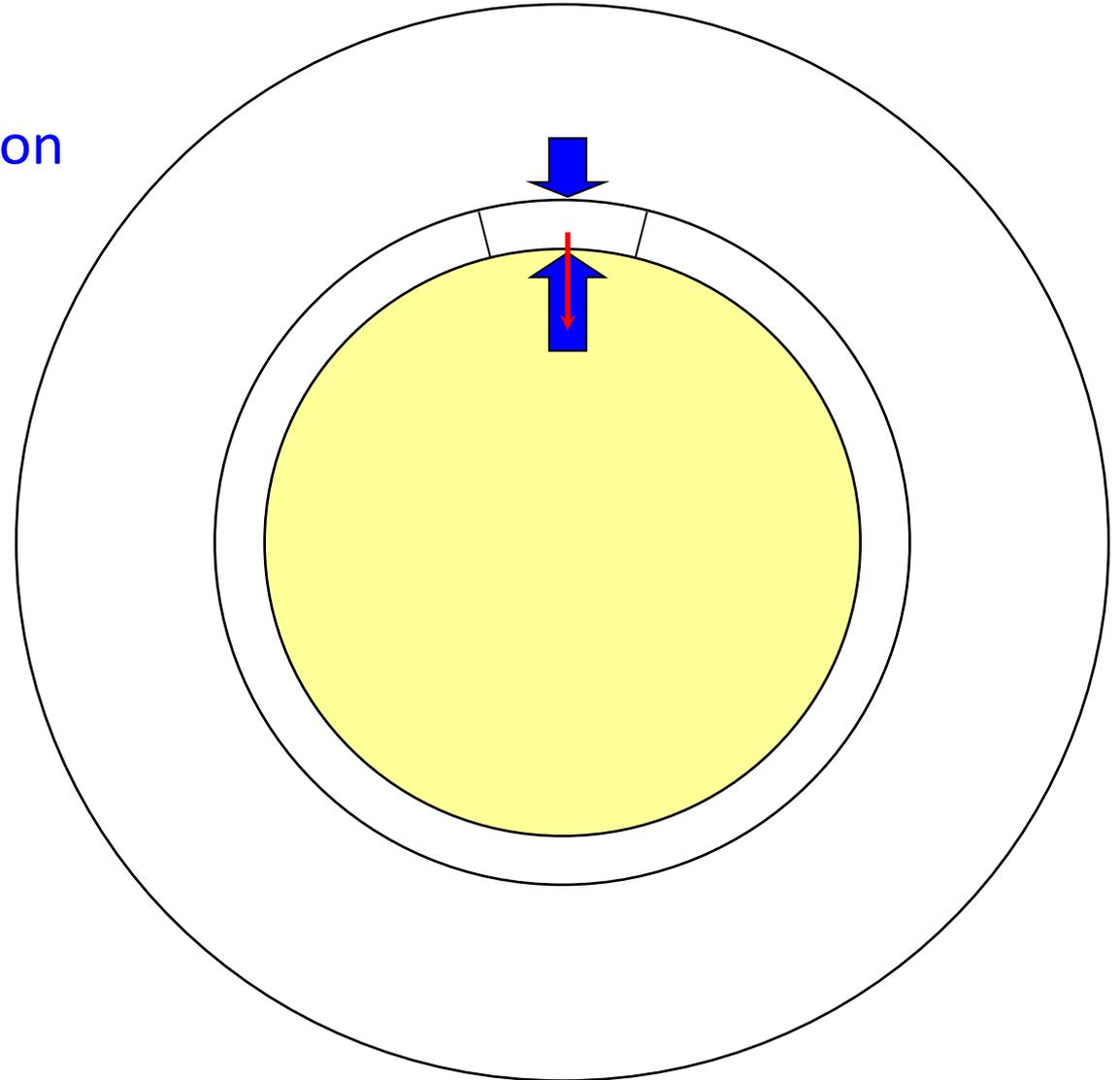
Quelle est la condition d'équilibre ?

$$-P(r + dr)dS + P(r)dS - \rho(r)dSdr g(r) = 0$$

Les variations de la **pression**
équilibrent le **poids**.

Equilibre hydrostatique

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r)$$



Et si la pression disparaissait ?

L'étoile s'effondrerait sur elle-même !

$$\frac{d^2r}{dt^2} = -\frac{GM}{r^2}$$

$$M = \frac{4}{3}\pi r_0^3 \bar{\rho}$$

Temps de chute libre

$$\tau_{\text{ff}} = \sqrt{\frac{3}{8\pi G \bar{\rho}}}$$

Application numérique :

La densité moyenne du Soleil est de 1.4 g/cm^3 .

Le temps de chute libre τ est de l'ordre de 1100 s !

Le théorème du viriel

$$\frac{dP}{dr} = -\rho(r) g(r) \quad \Rightarrow \quad 3\bar{P}V = -U_G$$

Pour un gaz parfait $P = \frac{2}{3} \frac{U}{V}$ et donc $2U + U_G = 0$

L'énergie totale vaut donc $E = U + U_G = \begin{cases} -U \\ \frac{1}{2} U_G \end{cases}$

Pour une sphère $U_G = -\beta \frac{GM^2}{R}$ ($\beta = 3/5$ si la sphère est homogène).

Etoile à l'équilibre = système à capacité calorifique négative !

Durée de vie d'une étoile

Si l'étoile rayonne en prenant sur son énergie potentielle gravitationnelle alors

$$\tau = \frac{U_G}{L_\star}$$

Dans le cas du Soleil, cela donne

$$\left\{ \begin{array}{l} R_\odot = 6.96 \cdot 10^5 \text{ km} \\ M_\odot = 1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg} \\ L_\odot = 3.83 \cdot 10^{26} \text{ W} \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} U_G \approx 2.3 \cdot 10^{41} \text{ J} \\ \tau \approx 31 \cdot 10^6 \text{ ans} \end{array} \right.$$

Age du système solaire $\approx 4.56 \cdot 10^9$ ans !

Comment le Soleil a-t-il réussi à briller si longtemps ?

Quelle source interne d'énergie ?

Le Soleil a rayonné $3.83 \cdot 10^{26}$ W pendant $4.56 \cdot 10^9$ ans.

Il contient environ 10^{57} protons.

Il a donc disposé d'une énergie de 0.38 MeV/proton !

Chimie ≈ 1 eV/proton

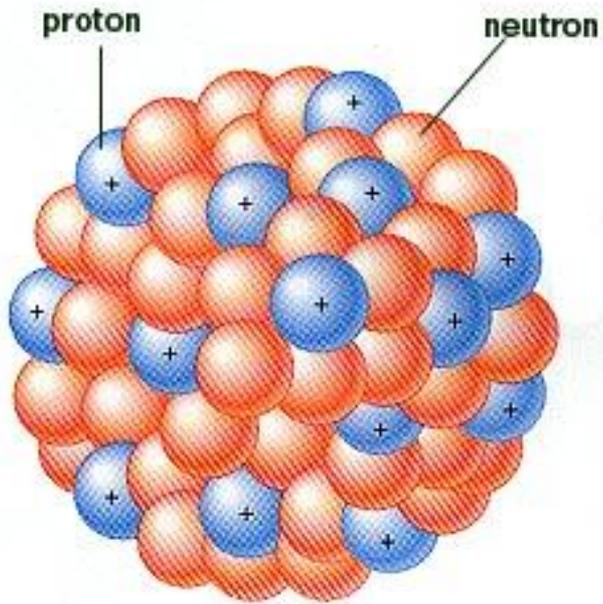
Gravité ≈ 2 keV/proton

Nucléaire ≈ 1 MeV/proton

2. L'ÉNERGIE D'UNE ÉTOILE

La physique nucléaire entre en jeu...

Structure de la matière



Z protons
N neutrons
 $A = Z + N$ nucléons

Comment lier les nucléons ?

FORCE NUCLÉAIRE FORTE

attractive

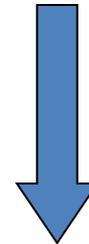
100 fois plus que
la répulsion électrique



$E_{\text{liaison}} < 0$

courte portée

1 fermi = 10^{-15} m



Les gros noyaux
sont instables

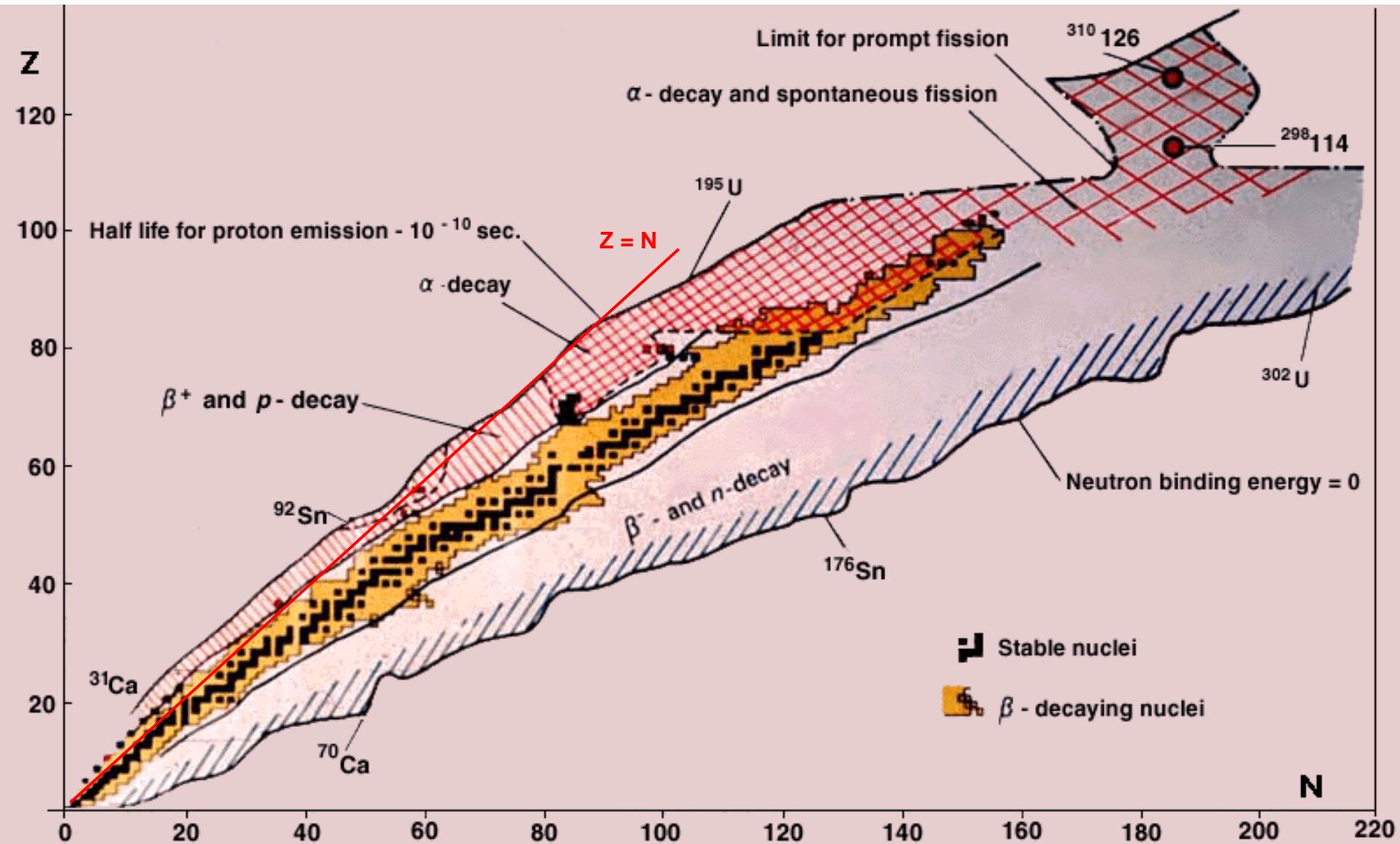
Symétrie p-p, n-n, p-n

Isotopes : noyaux de même Z.

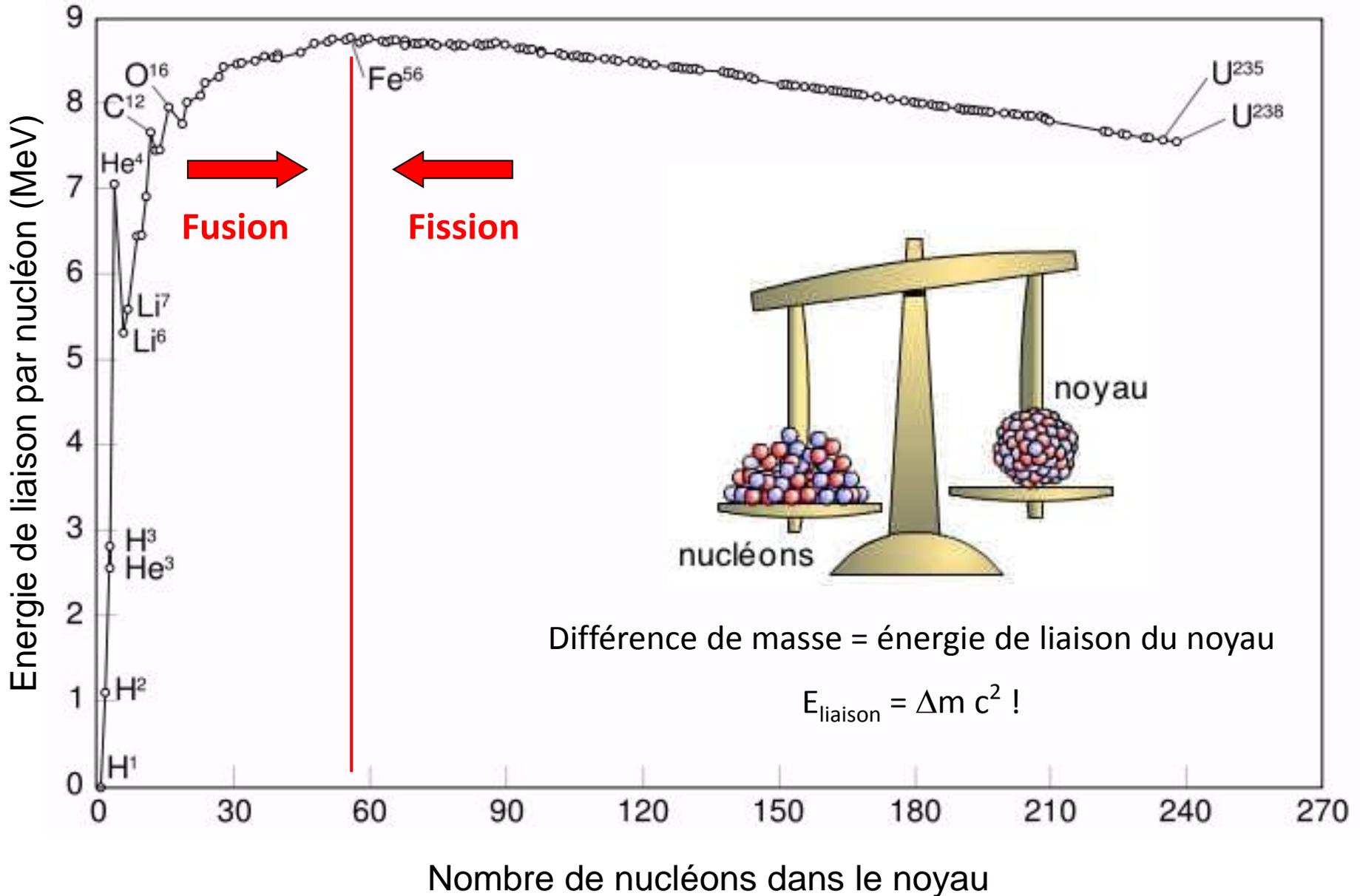
Tous les couples (Z, N) ne sont pas autorisés !

Stabilité dans la région $Z < 83$ et $N < 126$

Noyaux « pair-pair » favorisés

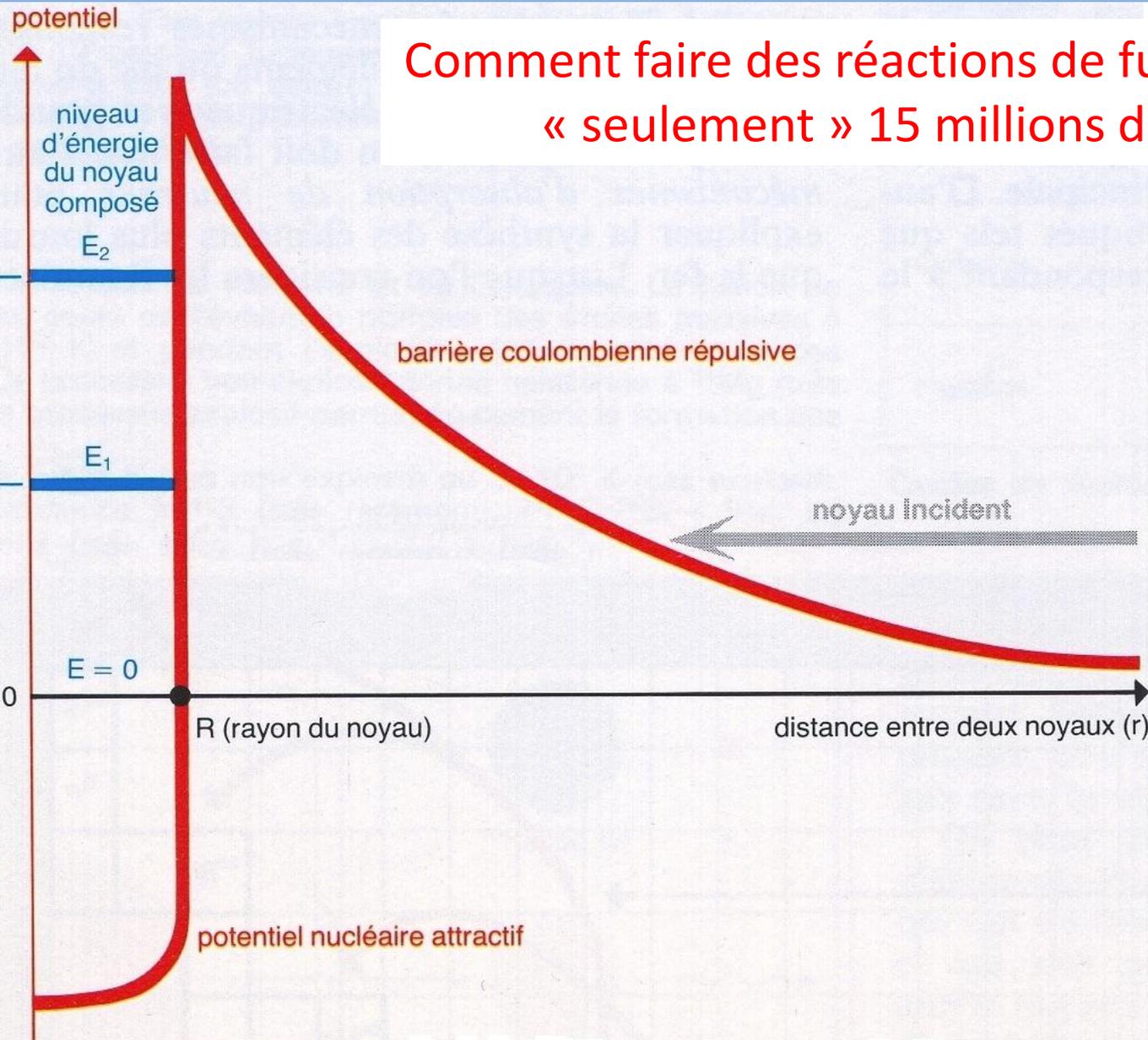


Liaison nucléaire



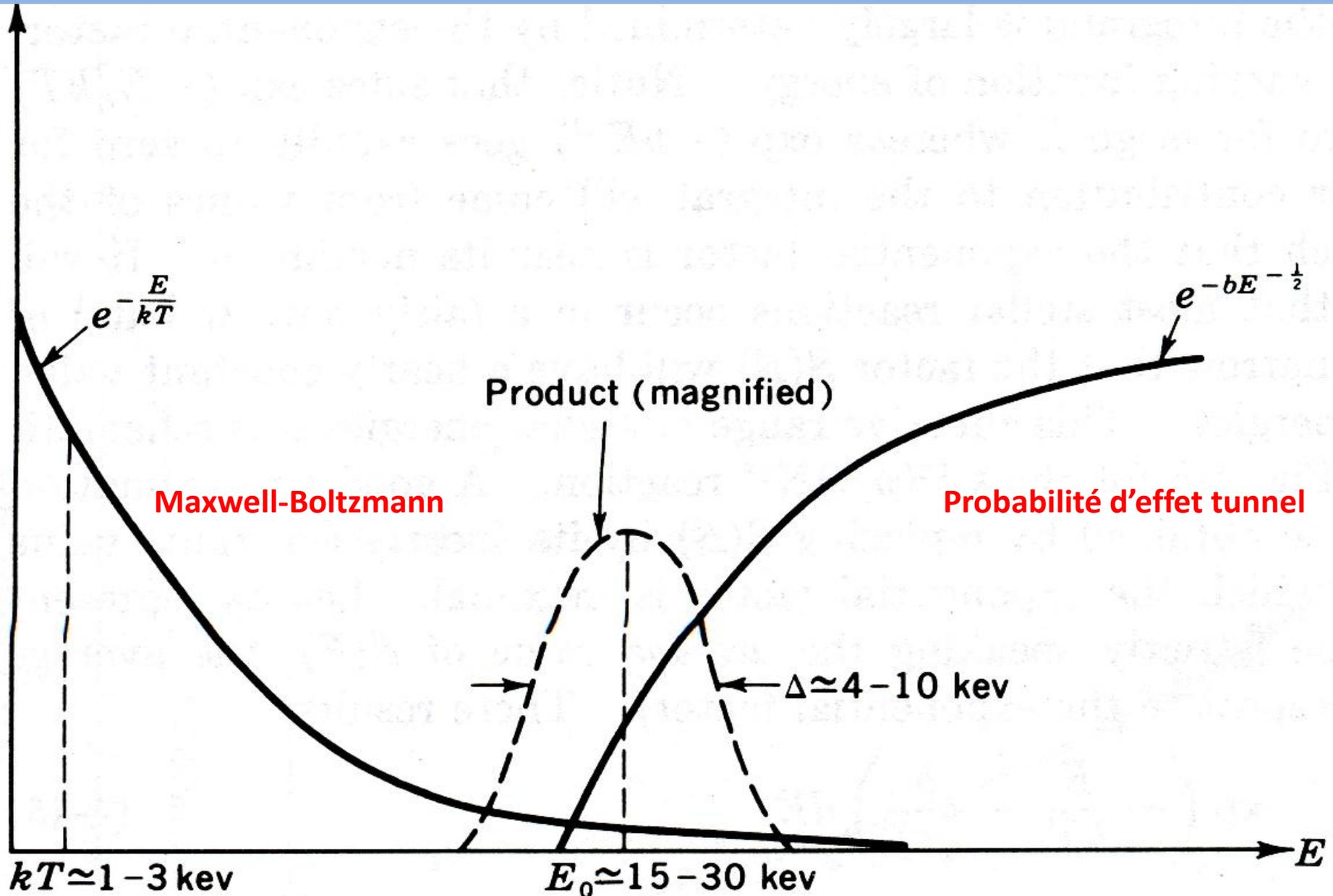
Fusion nucléaire

Comment faire des réactions de fusion nucléaire à « seulement » 15 millions de degrés ?

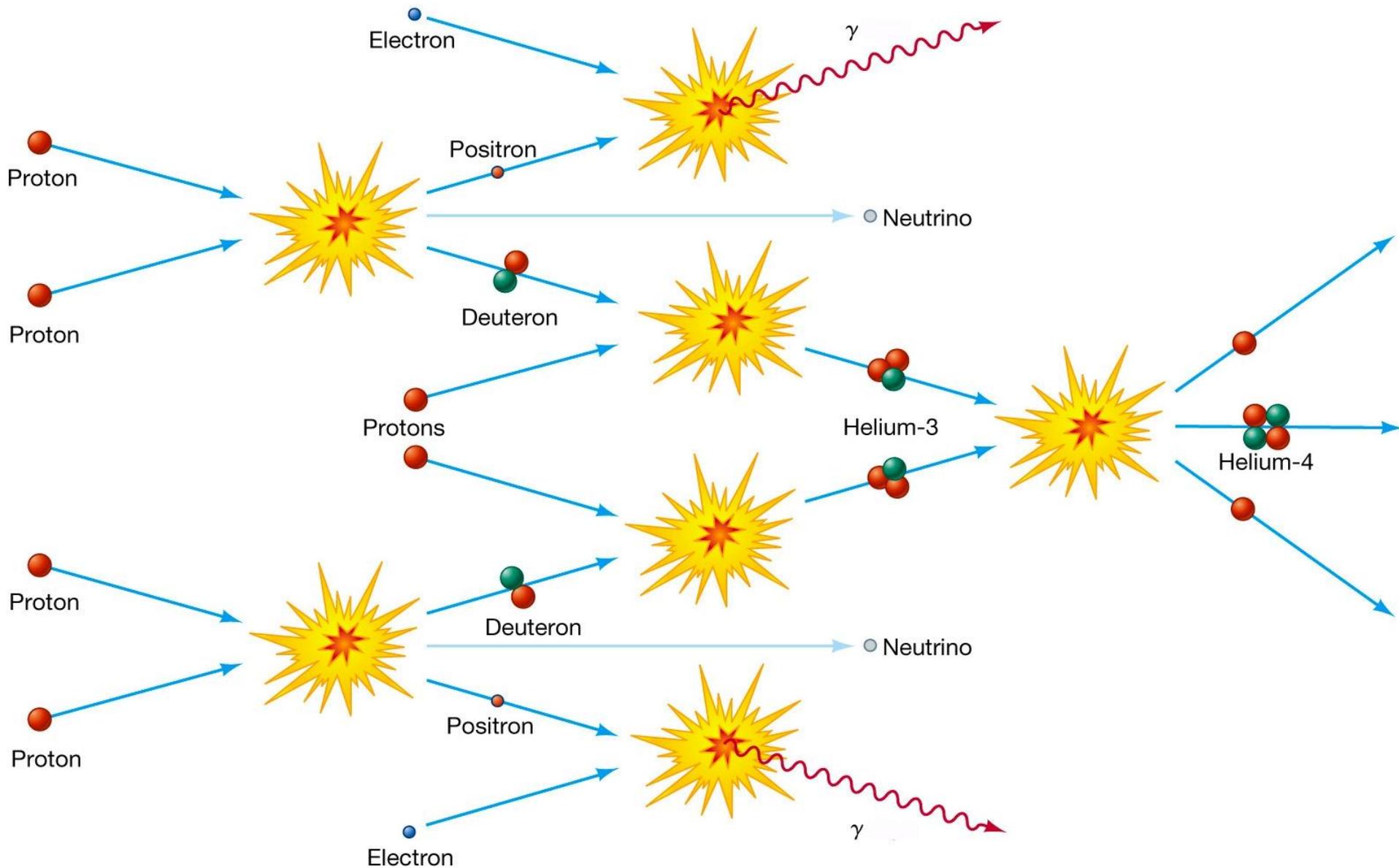


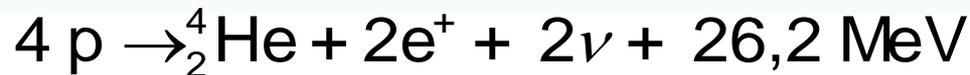
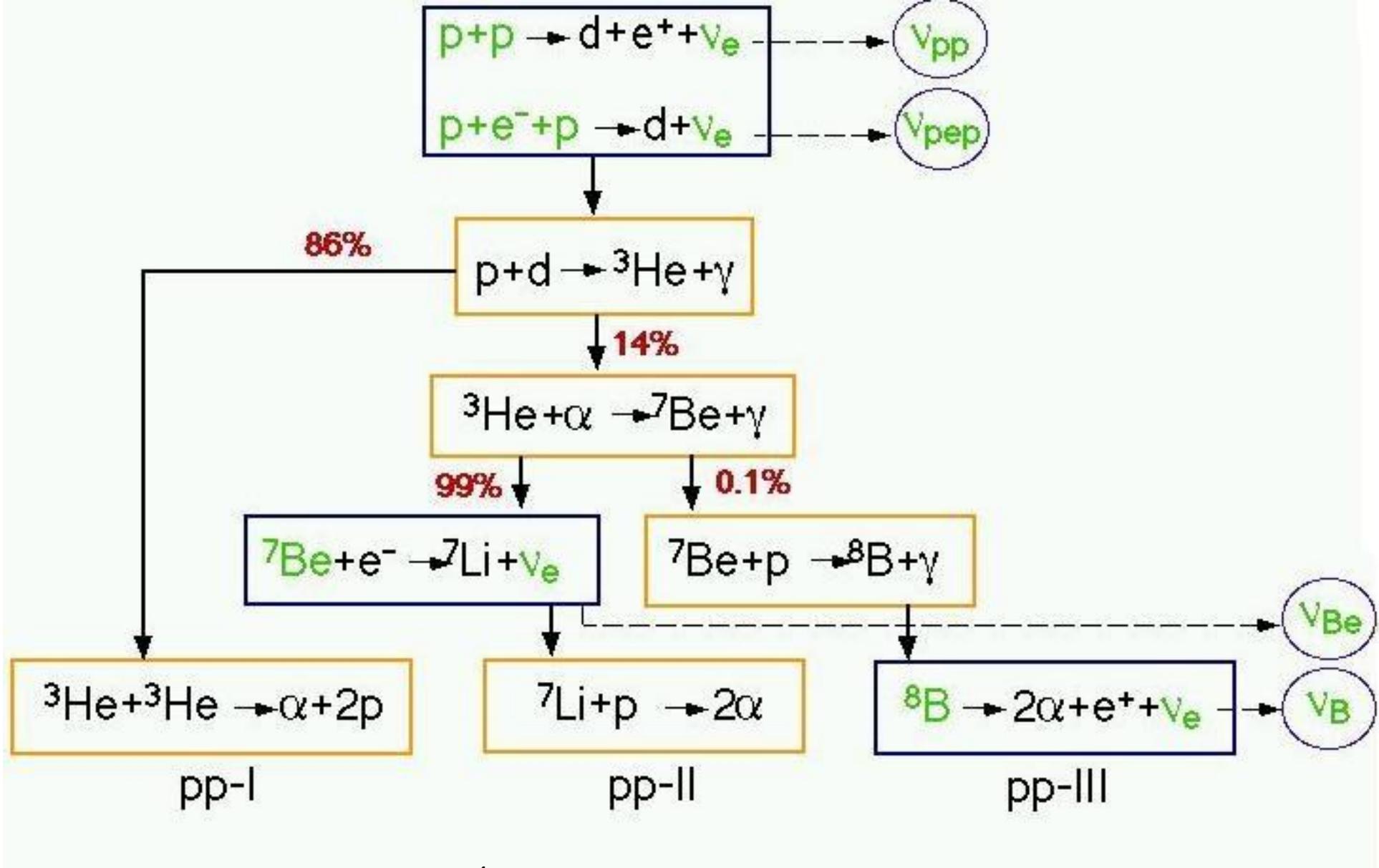
À $kT \approx 1,3$ keV il n'y a que 10^{-400} des particules dont l'énergie est supérieure au seuil coulombien de 1,44 MeV...

Le pic de Gamow



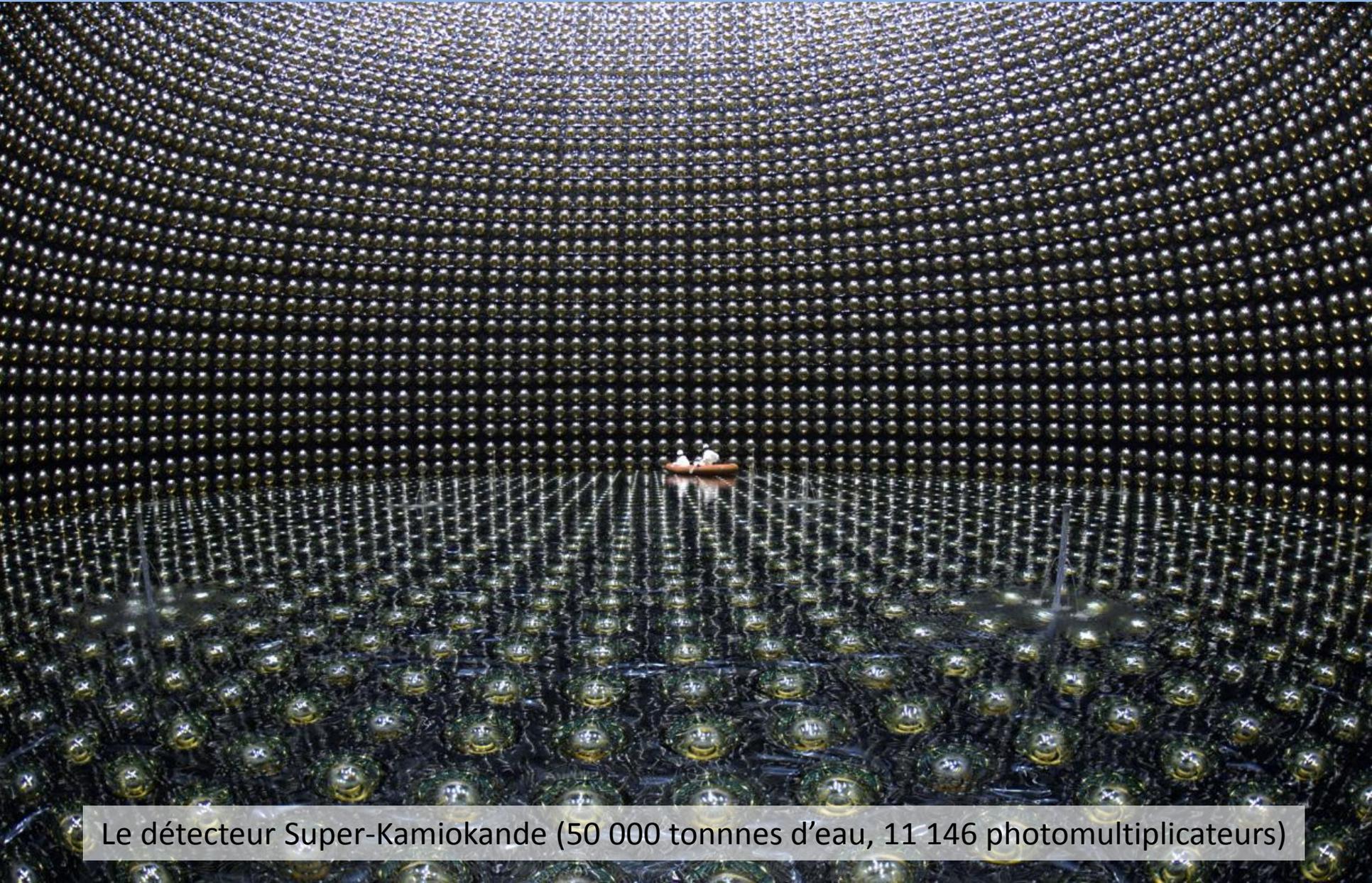
La chaîne proton-proton I





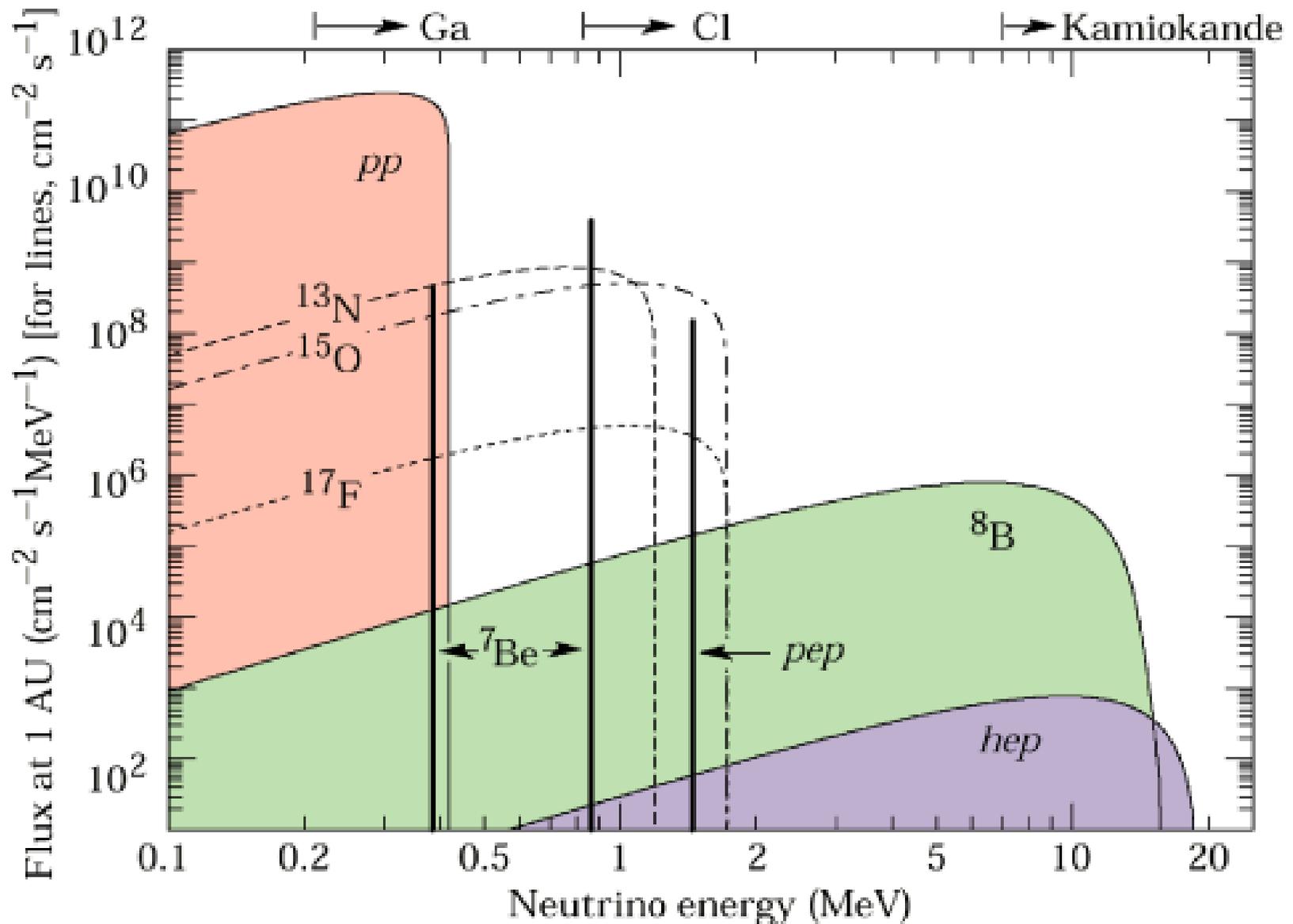
Chaque seconde le Soleil transforme 600 Mt d'hydrogène en 595 Mt d'hélium, la différence est convertie en énergie.

La preuve par les neutrinos



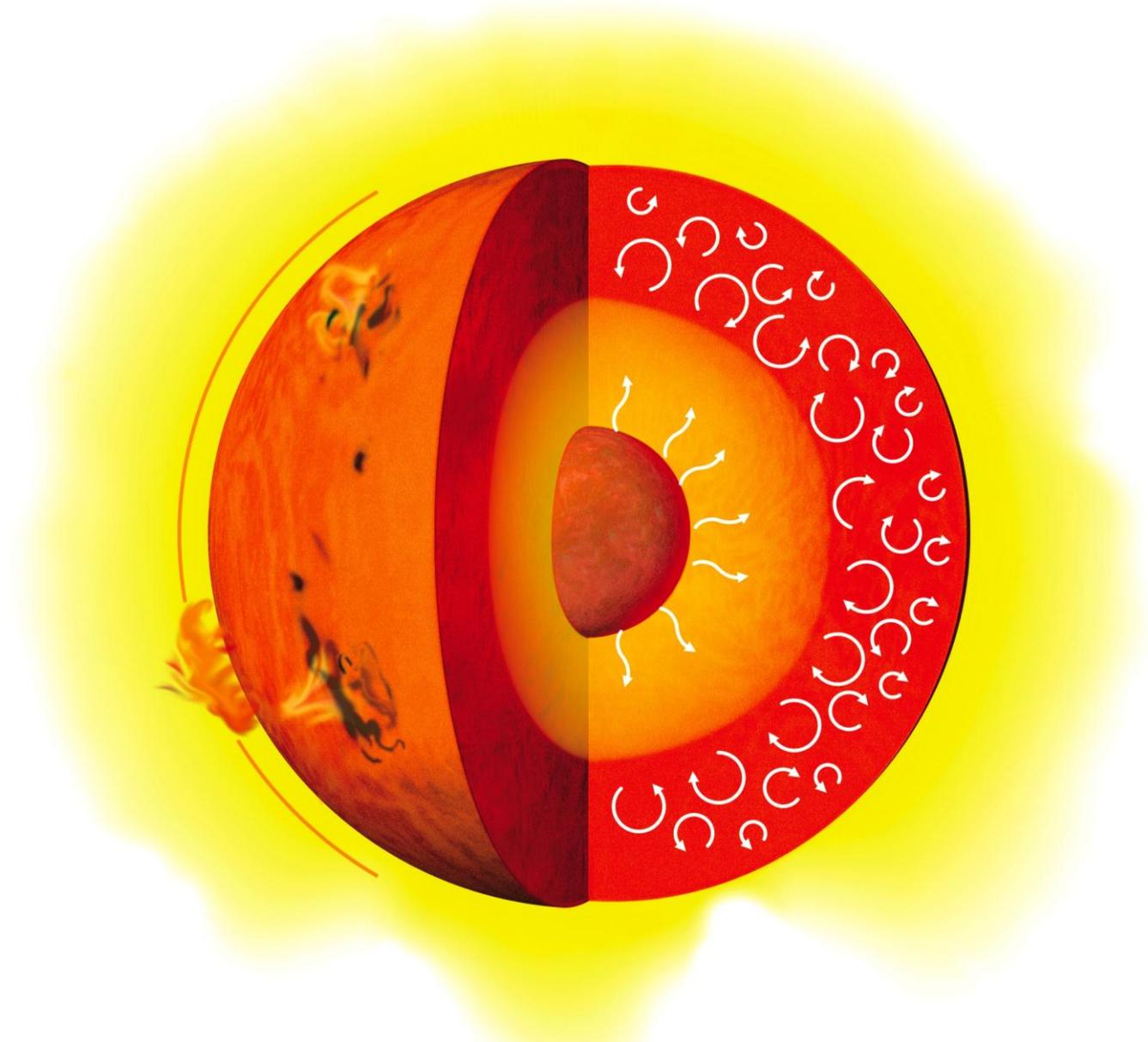
Le détecteur Super-Kamiokande (50 000 tonnes d'eau, 11 146 photomultiplicateurs)

Le spectre des neutrinos solaire



**Une étoile est
un réacteur à fusion thermonucléaire
confiné et stabilisé par sa gravité.**

Structure schématique du Soleil



3. EVOLUTION STELLAIRE

Le destin d'une étoile dépend (essentiellement) de sa masse

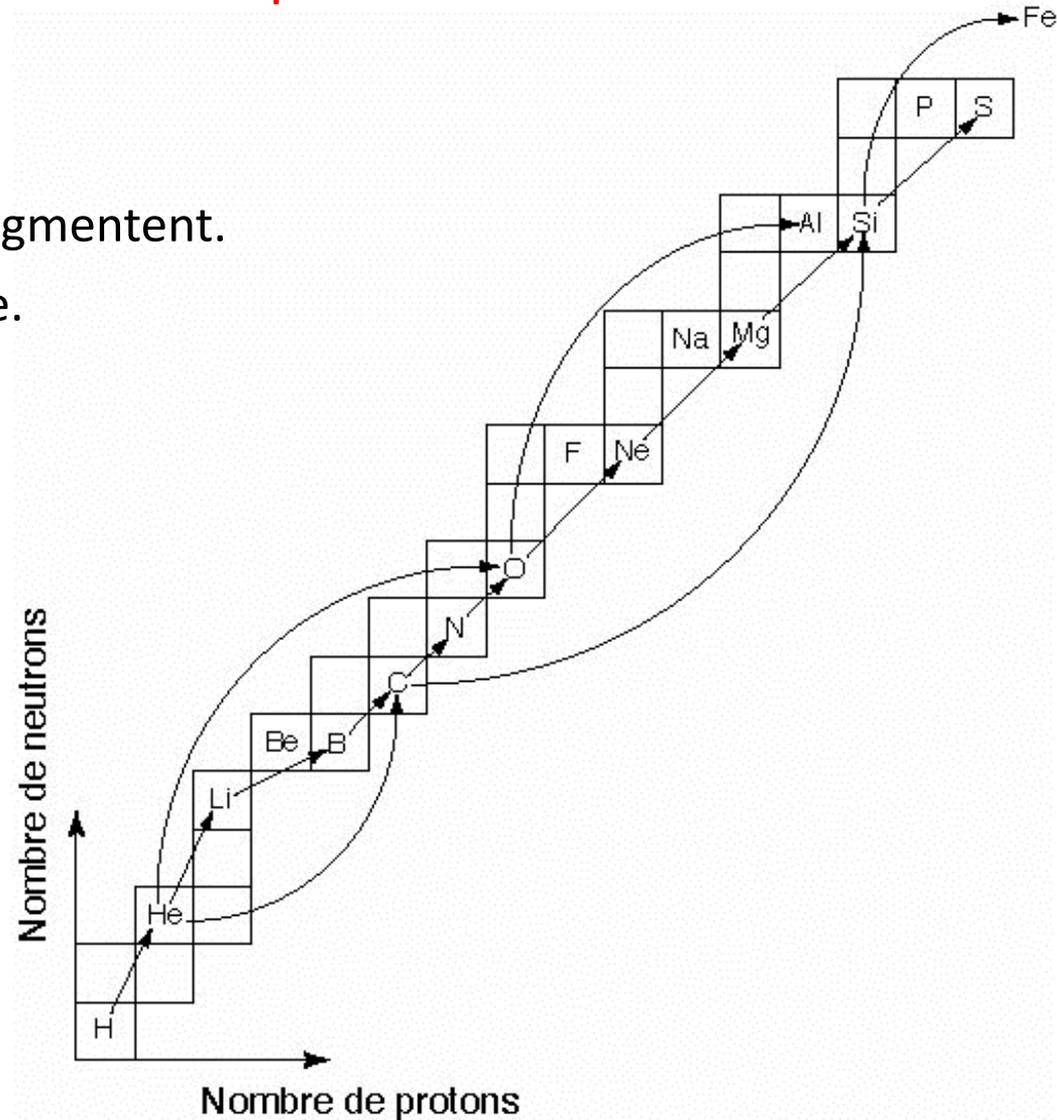
Panne sèche !

Que se passe-t-il quand le combustible s'épuise ?

- Le taux de réaction diminue.
- Le cœur de l'étoile se contracte.
- Température et densité centrales augmentent.
- Un nouveau cycle de fusion démarre.

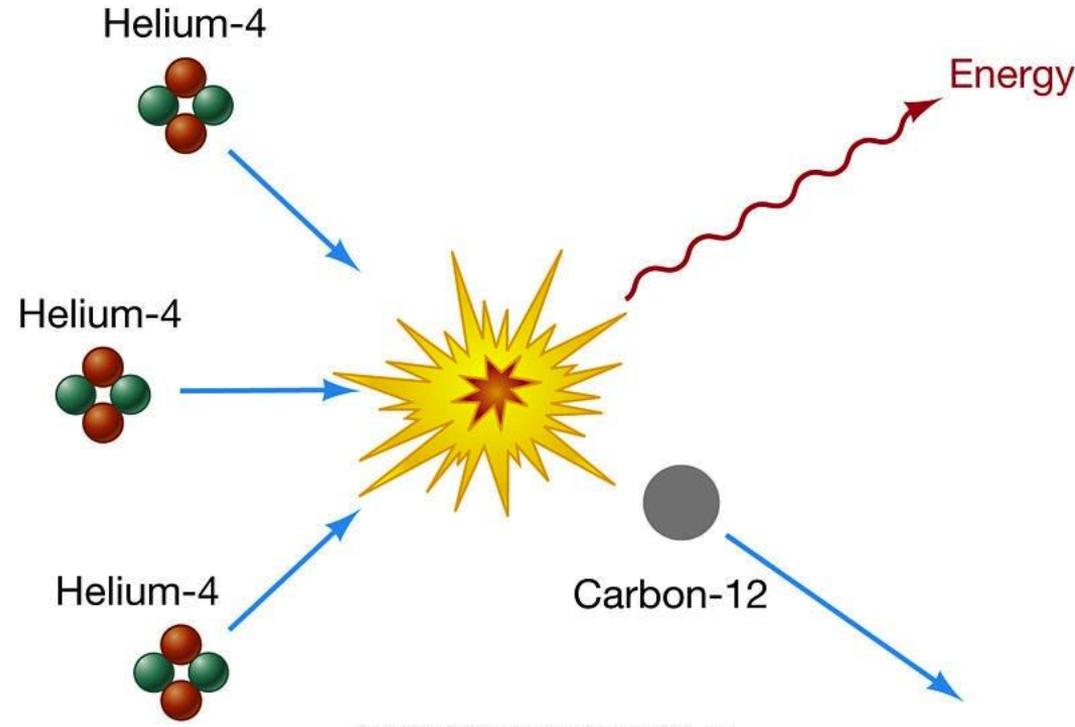
Etoile de 20 masses solaires

Combustion	T 10 ⁶ K	ρ kg/cm ³	Durée années
H	37	0.0045	8.1 millions
He	188	0.97	1.2 millions
C	870	170	976
O	1980	5550	1.25
Si	3340	33400	0.03



Le problème du carbone

Comment le carbone s'est-il formé ?



Idée proposée par Fred Hoyle (1953)

Réaction $3 \times {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ dans les géantes rouges...

Si la durée de vie du ${}^8\text{Be}$ est assez longue

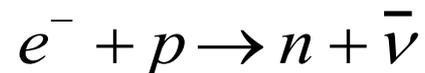
Si il existe un niveau résonant du ${}^{12}\text{C}$

Supernova !

Pour une étoile de grande masse, les cycles de fusion aboutissent au fer.
Fer = noyau le plus lié \Rightarrow énergétiquement stérile...

Théorème de Chandrasekhar
une masse auto-gravitante et énergétiquement stérile
ne peut dépasser 1,4 masse solaire.

Quand la masse du cœur de fer atteint la masse de Chandrasekhar, il s'effondre. La température (1 MeV soit 10^{10} K) devient telle que l'énergie des photons est suffisante pour briser les noyaux de fer. Dans ces conditions, les électrons se combinent aux protons pour former des neutrons selon :



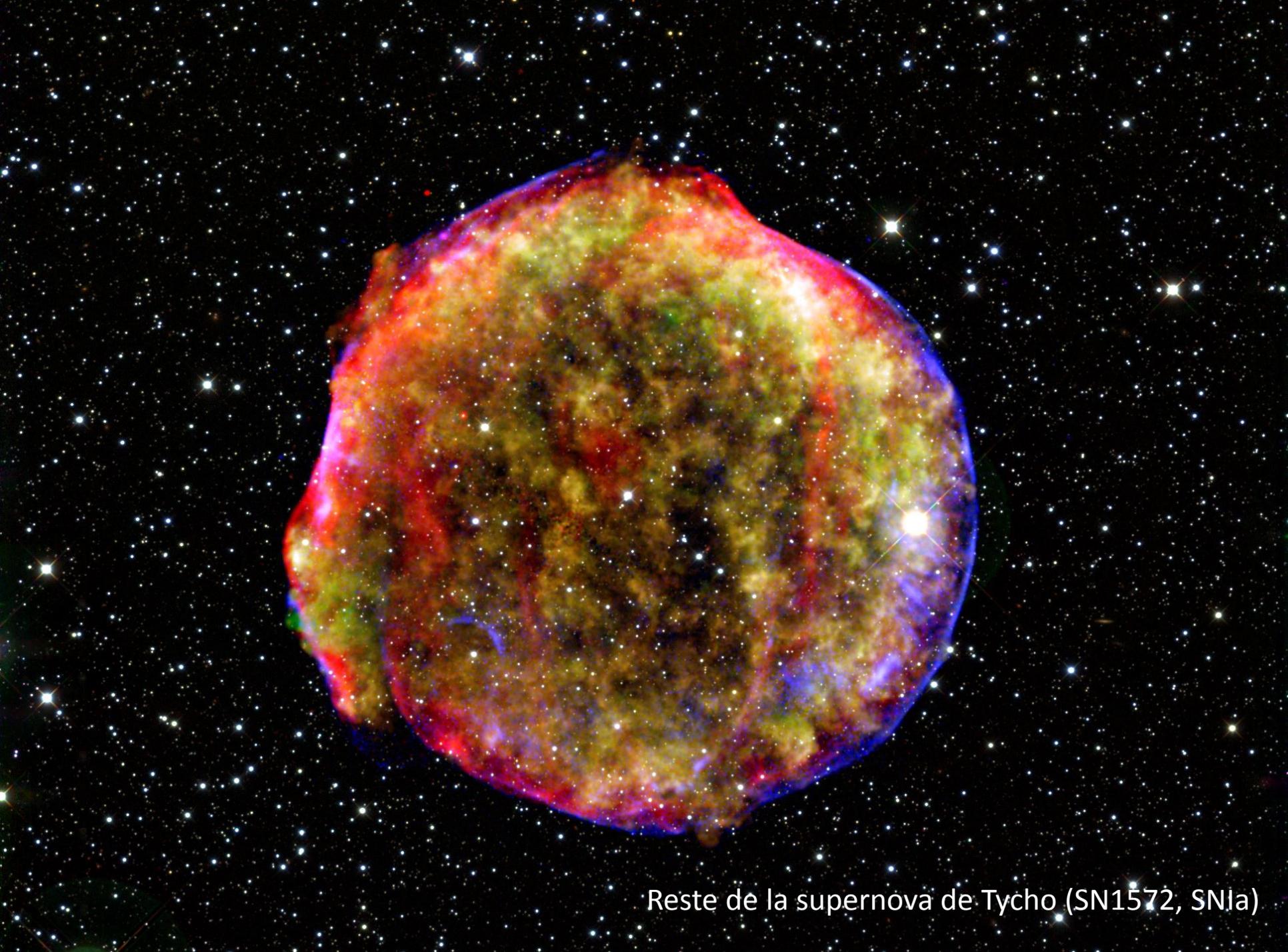
Origine des noyaux !

La gravité entraîne le cœur dans une formidable implosion (SN II) pour former une **étoile à neutrons**.

Pendant ce temps le reste de l'étoile en chute libre vient s'écraser sur la surface rigide de l'étoile à neutrons. Il en résulte une violente compression qui inverse le mouvement de chute et provoque une onde de choc qui remonte dans l'enveloppe et fait exploser l'étoile.

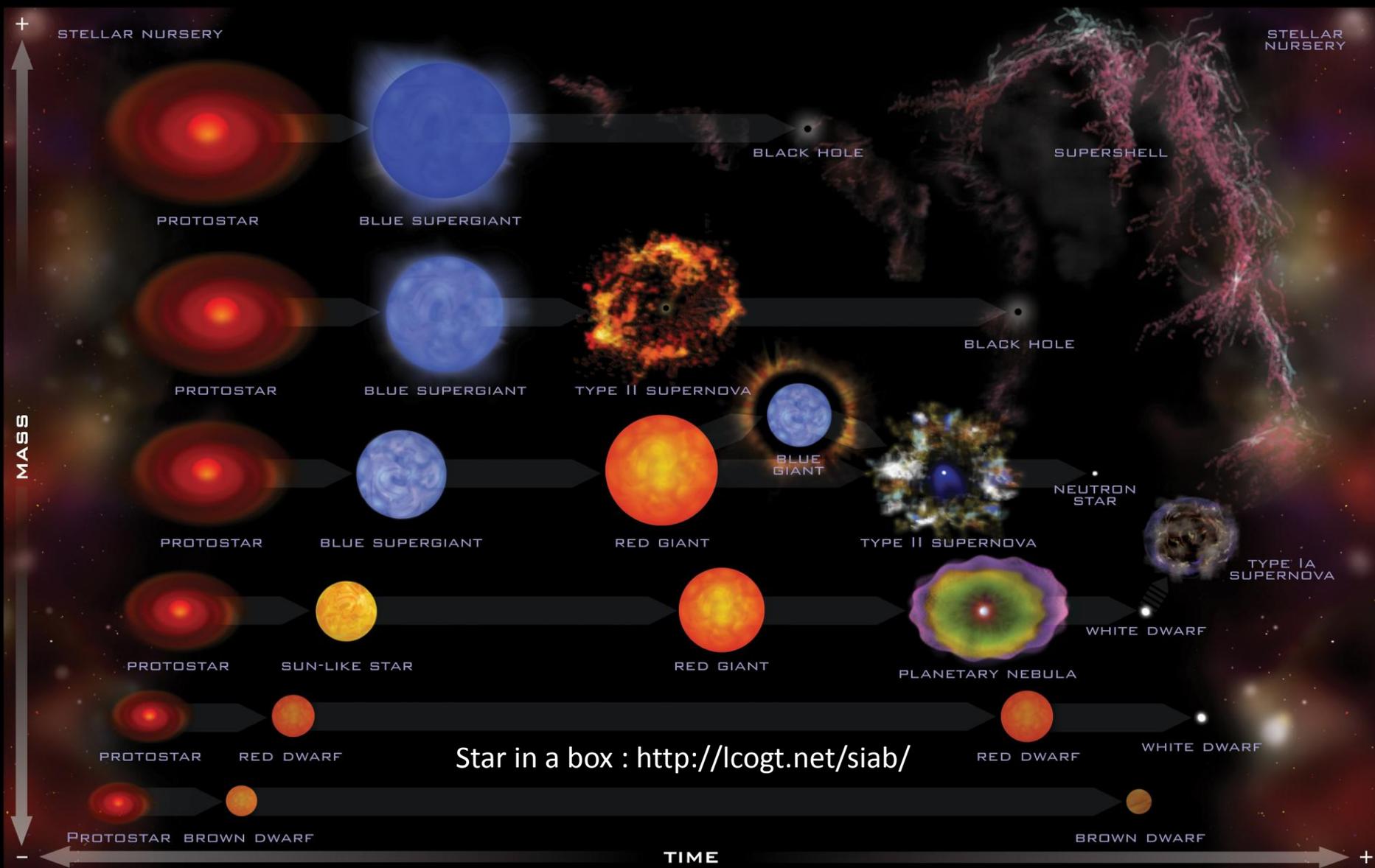
Nucléosynthèse explosive !
Enrichissement du milieu interstellaire

Nébuleuse du Crabe (M1, SN1054, SNII)

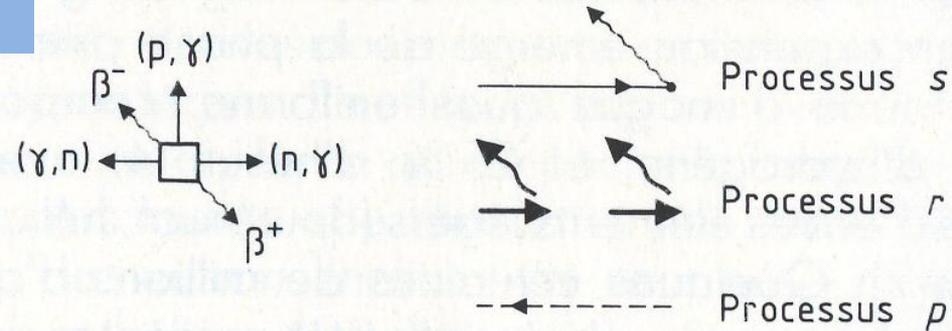


Reste de la supernova de Tycho (SN1572, SN Ia)

Evolution stellaire



Au-delà du fer



Processus s, « slow neutron capture »

Durée quelques millénaires

Site géante rouge

Grimpe la vallée de stabilité jusqu'au ^{208}Pb et ^{209}Bi

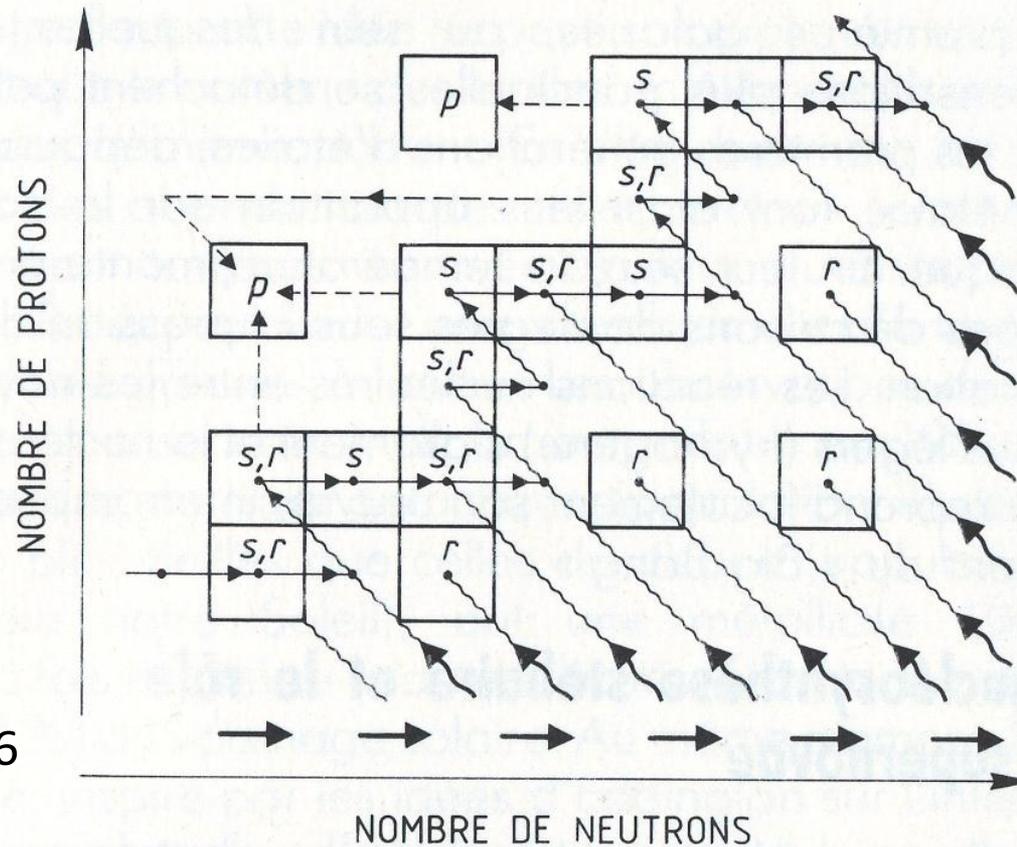
Ne synthétise pas les actinides (Th, U, ...)

Processus r, « rapid neutron capture »

Durée quelques secondes

Site SN, nucléosynthèse explosive

Synthétise les actinides



Noyaux « magiques » : $N = 28, 50, 82, 126$

Genèse des éléments

