

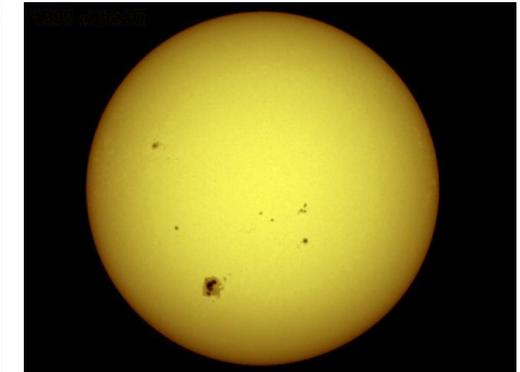
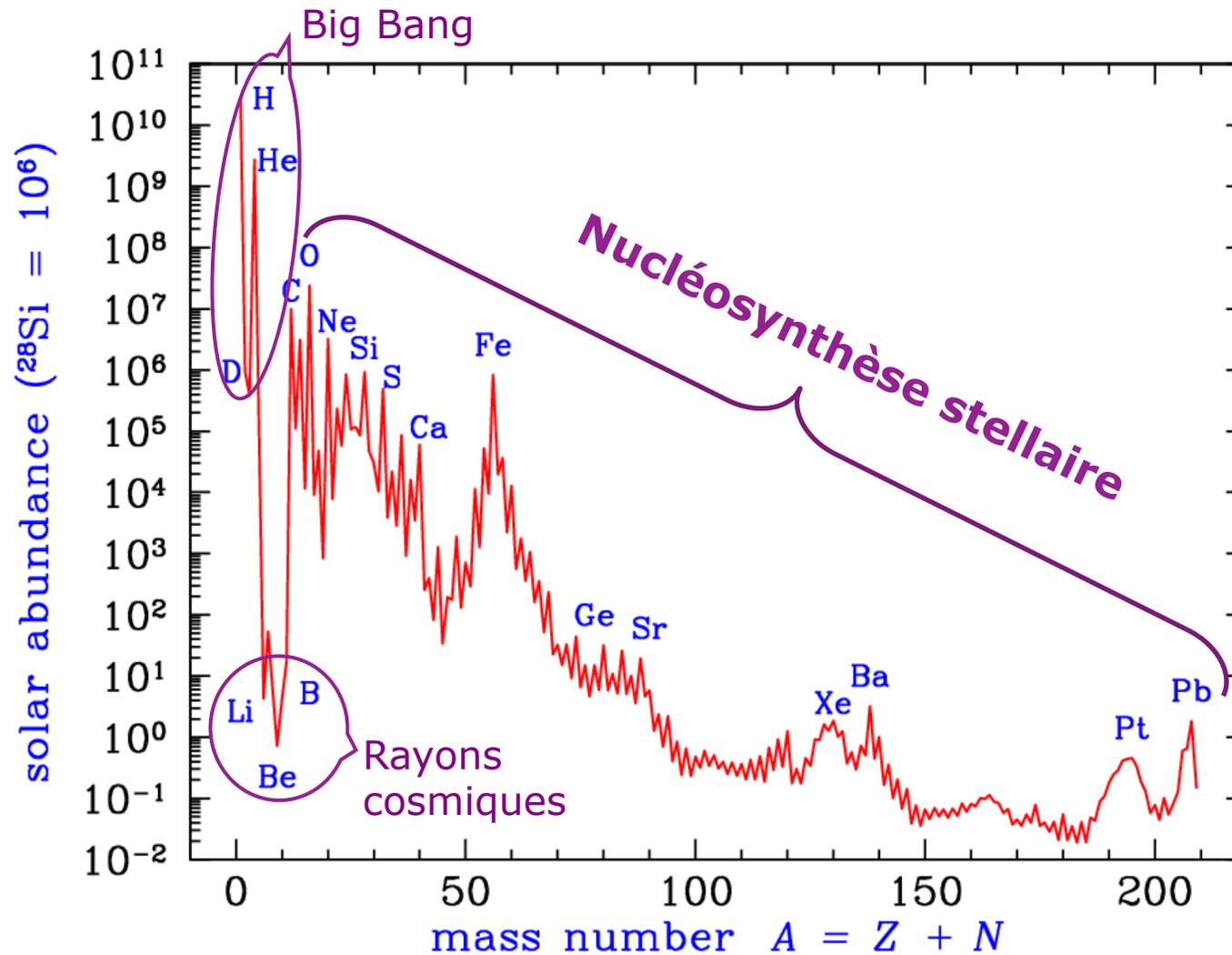
La nucléosynthèse stellaire



Vincent Tatischeff

25^e Festival d'Astronomie de Fleurance, 7– 14 août 2015

L'abondance cosmique des éléments



La photosphère solaire



Fragment de la météorite d'Orgueil

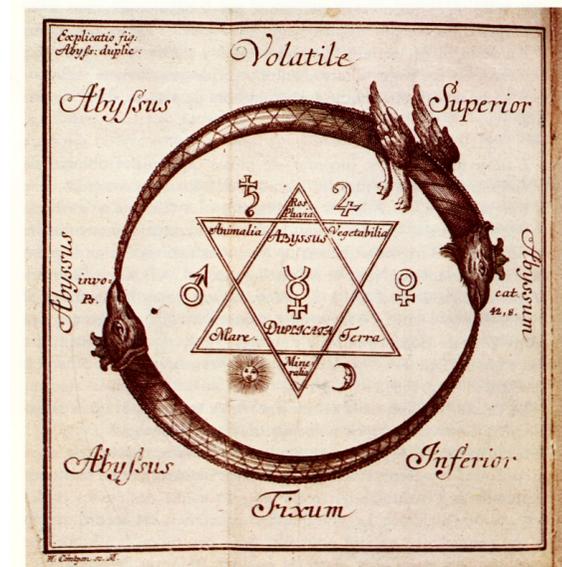
La nature de la matière

... une question « vieille comme le monde »

- **Anaxagore** (500 - 428 av. J.-C.) : « Rien ne naît ni ne périt, mais des choses déjà existantes se combinent, puis se séparent de nouveau »
- **Démocrite** (460 - 370 av. J.-C.) : « La liaison fortuite des atomes est l'origine de tout ce qui est »



⇒ Tentatives alchimiques de **transmutation de la matière** (plomb → or) pendant plus de 2000 ans...



Une révolution scientifique au XXe siècle

- **1902** Rutherford & Soddy découvrent la **transmutation radioactive** $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra} + \alpha$
- **1919** Rutherford réalise la 1^{re} **transmutation artificielle** $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{p}$
- **1919** Perrin, puis Eddington suggèrent que **l'énergie des étoiles** résulte de la **fusion nucléaire**
- **1928** Gamow découvre **l'effet tunnel**, qui démontre la probabilité non nulle de réactions nucléaires dans les étoiles
- **1938** Bethe, Critchfield & von Weizsaecker découvrent **les chaînes pp** et le **cycle CNO**
- **1951 - 1953** Öpik, Salpeter et Hoyle découvrent le mécanisme de **combustion de l'He**
- **1957** Cameron d'une part, Burbidge, Burbidge, Fowler & Hoyle de l'autre donnent une **vue d'ensemble des processus de nucléosynthèse** dans l'Univers
- **1968** Davis et al. réalisent la **1^{re} détection de neutrinos émis au cœur du soleil**
- **1987** Détection de la radioactivité γ du ^{56}Co et du ^{57}Co dans la supernova **SN 1987A**
- **2013** Indication observationnelle de la **nucléosynthèse de noyaux lourds** au cours de la **coalescence d'un système binaire de deux étoiles à neutrons** (GRB 130603B)

La durée de vie du soleil

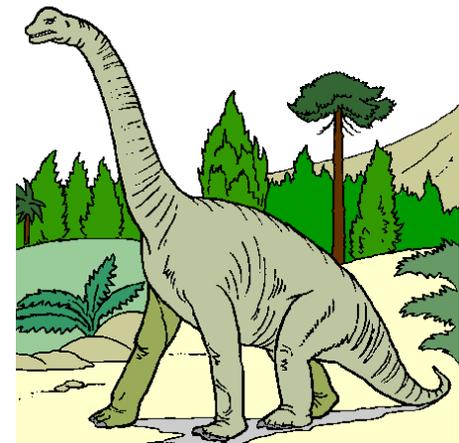
- Première estimation par **Lord Kelvin** et **von Helmholtz** en 1862 : temps que met l'étoile à rayonner son énergie interne (thermique)

$$t_K = K / L = -\Omega / (2L) \Rightarrow t_K \approx GM^2 / (2RL) \approx 2 \times 10^7 \text{ ans}$$

K est l'énergie cinétique totale des constituants, $\Omega \sim GM^2 / R$ l'énergie potentielle gravitationnelle du système, L la luminosité de l'étoile, M et R sa masse et son rayon, et G la constante universelle de gravitation. D'après le théorème du viriel pour un système autogravitant, l'énergie totale de l'étoile $E = K + \Omega = \Omega / 2 = -K$

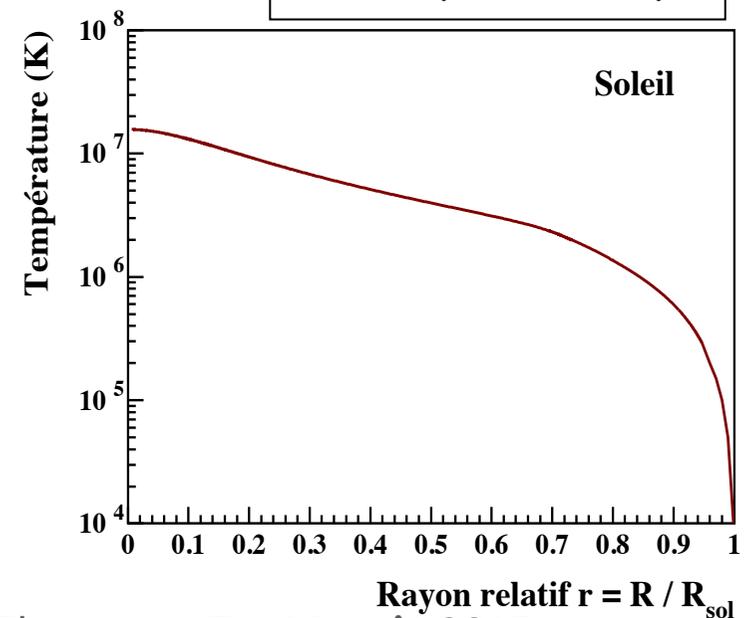
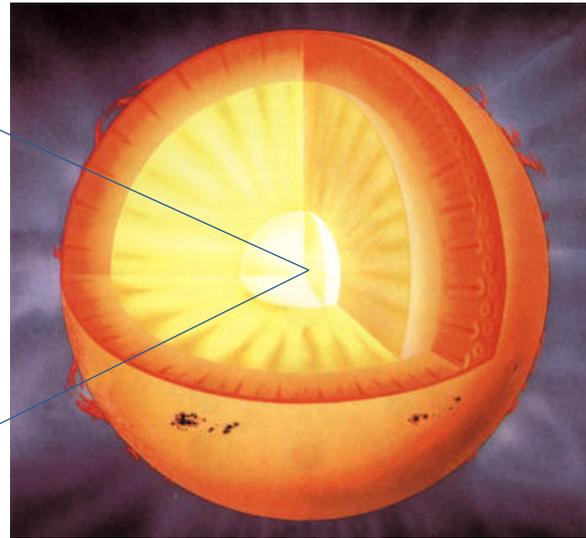
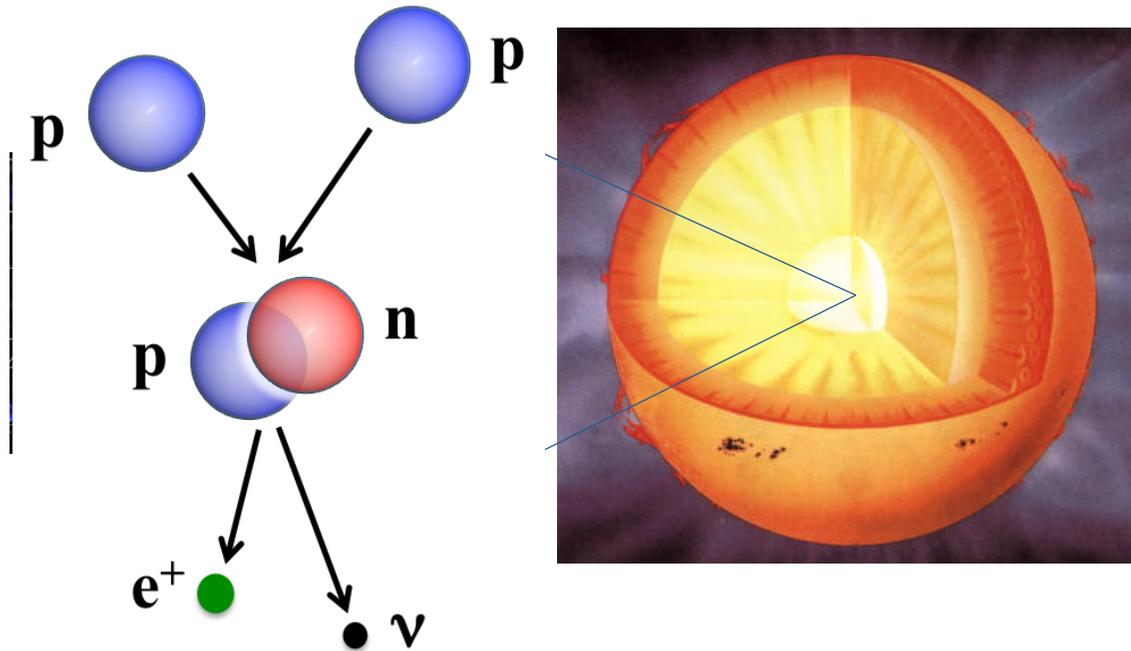
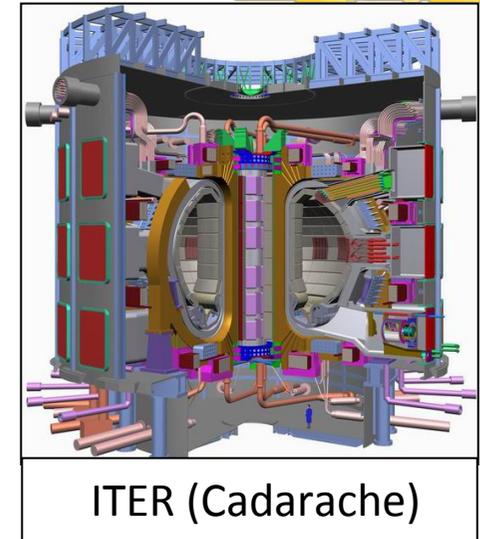
- Protestation de **Charles Darwin** : le soleil ne peut pas être plus jeune que la Terre !

⇒ Source d'énergie interne : **le charbon ?**



La source d'énergie interne des étoiles

- Dès 1919, Jean Perrin, puis Arthur Eddington suggèrent que les étoiles tirent leur énergie de la fusion de noyaux d'hydrogène



- Réactions **thermonucléaires**

La durée de vie nucléaire du soleil

- Transformation nucléaire :



- Energie de masse cédée à l'étoile :

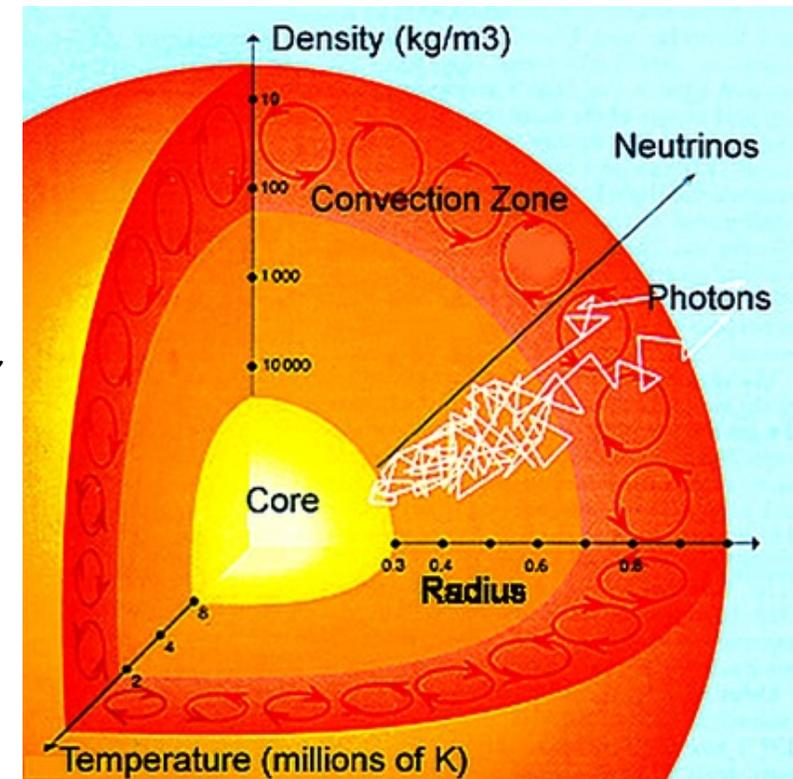
$$Q = (\Delta m)c^2 - E_\nu = 4m_p + 2m_e - m_\alpha - E_\nu$$

où E_ν est l'énergie cinétique des neutrinos s'échappant du soleil

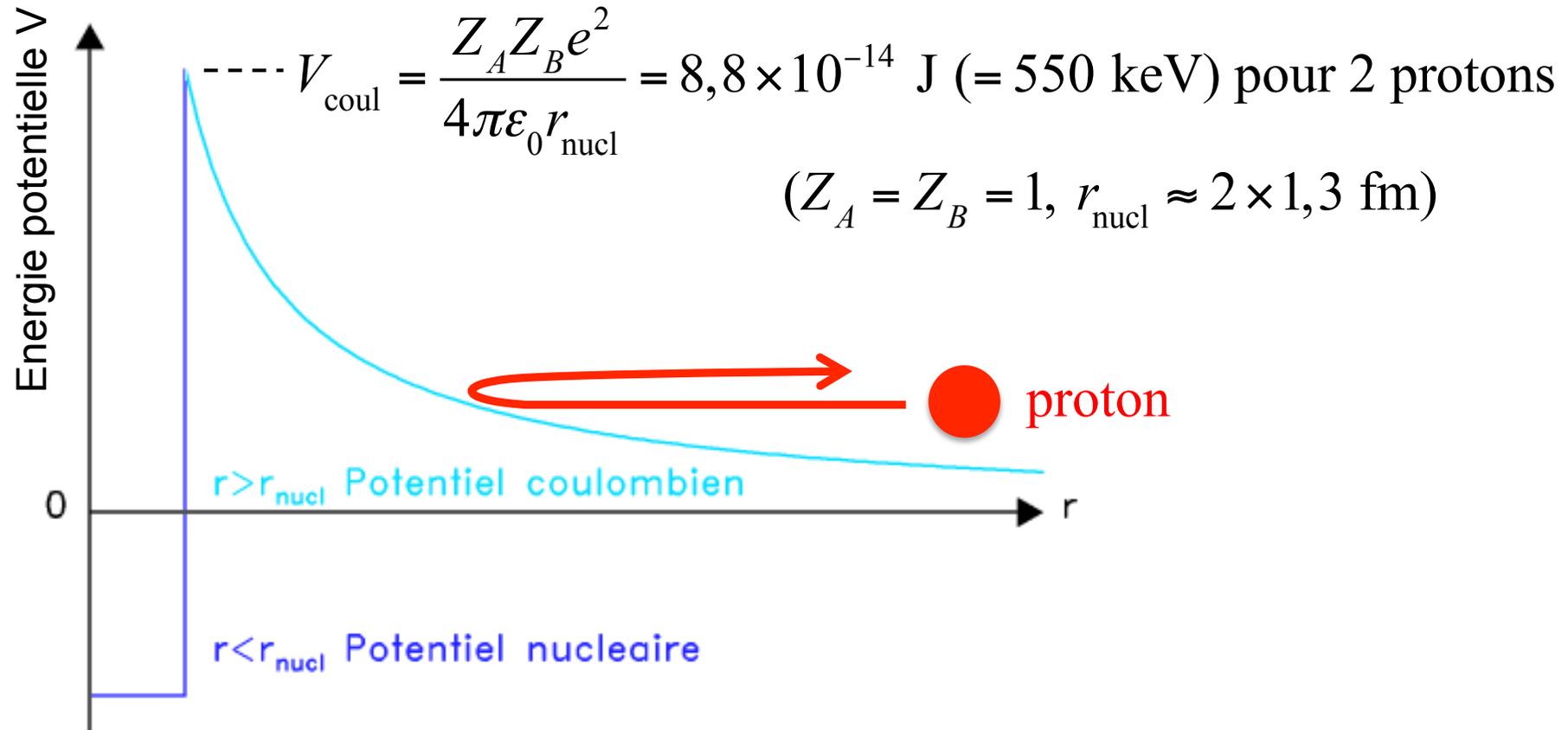
- Durée de vie nucléaire :

$$t_N = \frac{Q \times f_M M}{4m_p L} \approx \boxed{10^{10} \text{ ans}}$$

avec $Q \approx 4 \times 10^{-12} \text{ J}$, la masse du soleil $M = 2,0 \times 10^{30} \text{ kg}$, sa luminosité $L = 3,8 \times 10^{26} \text{ W}$, $m_p = 1,7 \times 10^{-27} \text{ kg}$ et la fraction de masse $f_M \approx 10\%$



La barrière coulombienne – infranchissable ?



- Dans un plasma à 15 millions de kelvins, seul **un proton sur $\sim 10^{180}$** possède une énergie cinétique d'agitation thermique supérieure à la hauteur de la barrière coulombienne entre deux protons !?

L'effet tunnel

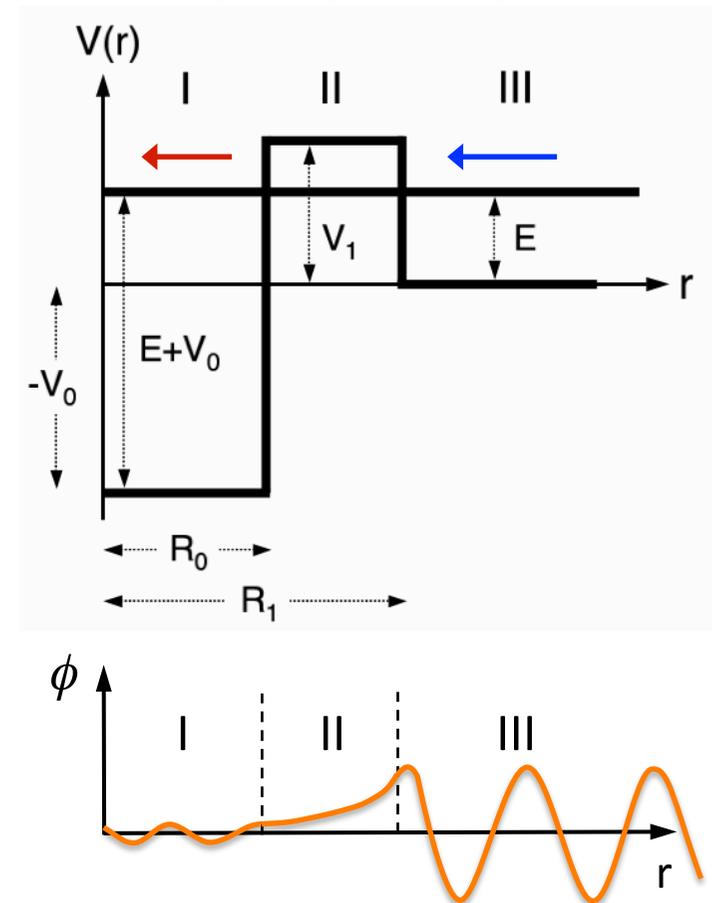
- **Gamow (1928)** : la probabilité qu'une particule chargée traverse une barrière coulombienne n'est pas nulle en mécanique quantique (étude de la radioactivité alpha)
- Avec les fonctions d'ondes radiales $\phi(x)$ (1D) solutions de **l'équation de Schrödinger indépendante du temps**

$$\left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V \right] \phi(x) = E\phi(x)$$

$$\Rightarrow \phi_{III}(x) = Ce^{-ikx} \text{ où } k^2 = 2\mu E / \hbar^2$$

$$\Rightarrow \phi_{II}(x) = Be^{\kappa x} \text{ où } \kappa^2 = 2\mu(V_1 - E) / \hbar^2$$

$$\Rightarrow \phi_I(x) = Ae^{-iKx} \text{ où } K^2 = 2\mu(E + V_0) / \hbar^2$$



L'effet tunnel – coefficient de transmission

- Coefficient de transmission pour un potentiel carré: où j_{trans} et j_{inc} sont les courants de probabilité

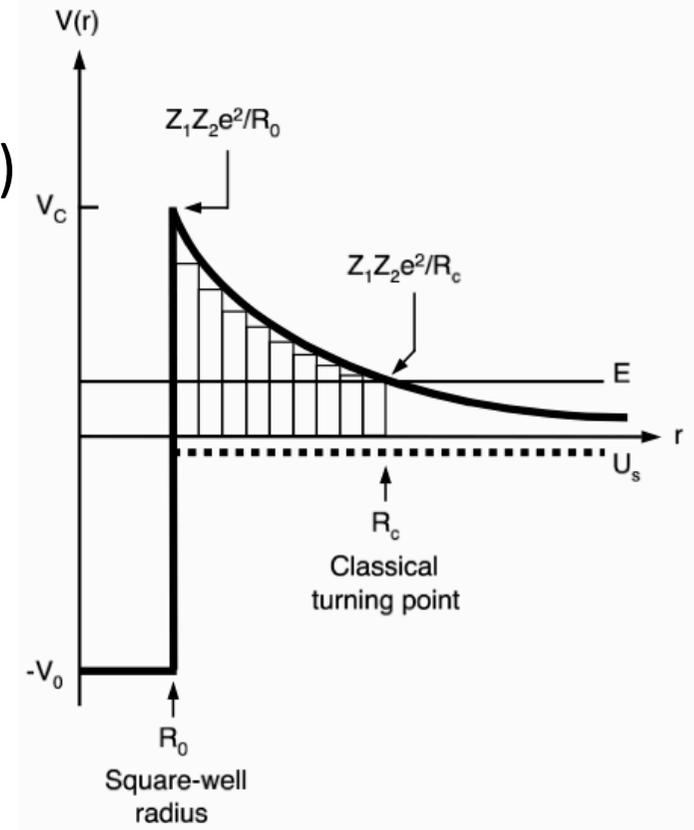
$$T = \frac{j_{\text{trans}}}{j_{\text{inc}}} = \frac{K|A|^2}{k|C|^2}$$

- Coefficient de transmission pour une barrière coulombienne (facteur de Gamow)

$$T \approx \exp\left[-\frac{2\pi}{\hbar} \sqrt{\frac{\mu}{2E}} Z_1 Z_2 e^2\right] = \exp(-2\pi\eta)$$

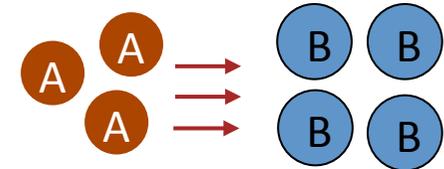
(μ est la masse réduite du système "1+2")

- Réaction $p + p$ à 6 keV : $T = 1,2 \times 10^{-4}$!
- Réaction $p + {}^{12}\text{C}$ à 6 keV : $T = 1,0 \times 10^{-32}$!



Les sections efficaces de réactions

$$\sigma_{A+B} = \frac{\text{nombre de réactions / seconde}}{(\text{nb projectiles / seconde}) (\text{nb noyaux cibles / cm}^2)}$$

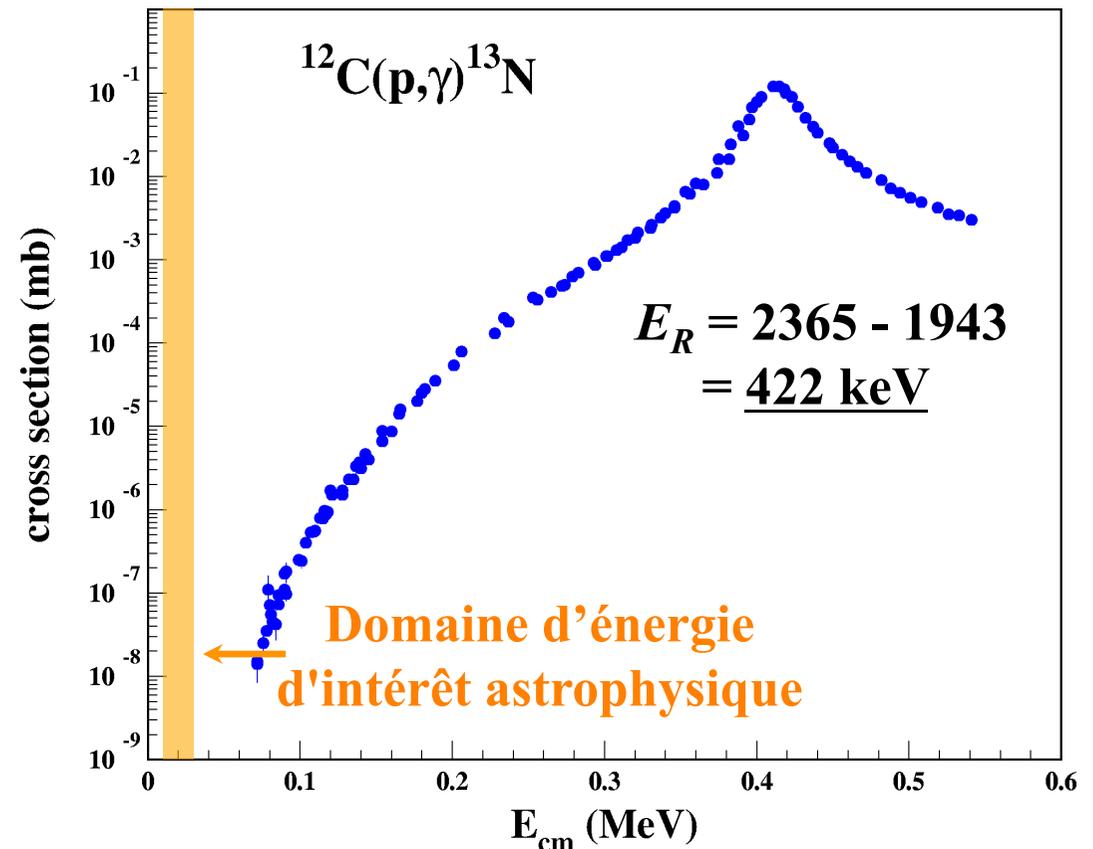


- Décroissance exponentielle à basse énergie + **résonances** \equiv états dans le noyau composé

E_x (MeV)	J^π
3,547	$5/2^+$
3,502	$3/2^-$
2,365	$1/2^+$
1,943	$1/2^+$
0	$1/2^-$

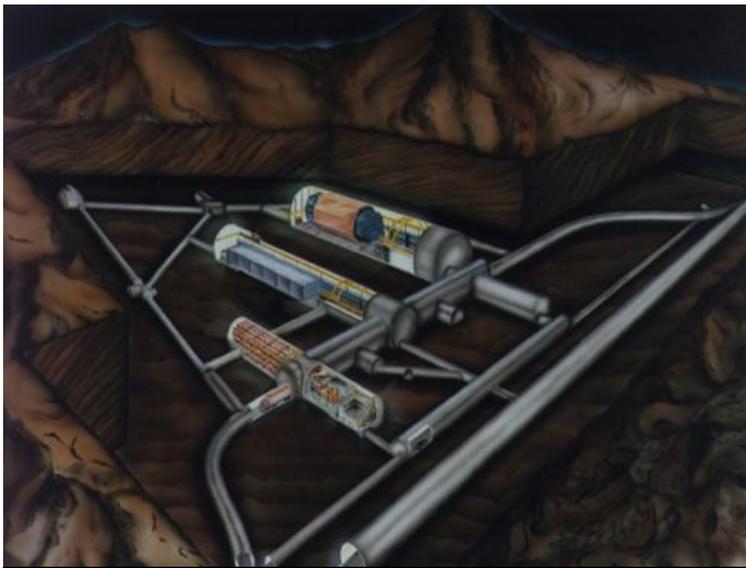
$^{12}\text{C} + p$

^{13}N

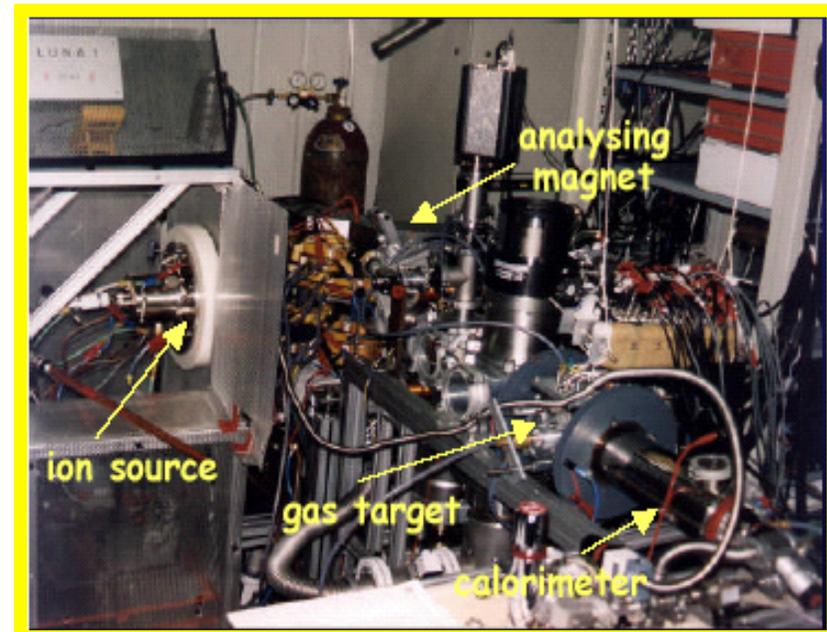


Les mesures de sections efficaces

- Ordres de grandeur à $E = 20$ keV (énergie stellaire typique...)
 - ${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p){}^4\text{He}$ (interaction forte) : $\sigma = 5 \times 10^{-37} \text{ cm}^2$
Avec $n_B \Delta x = 10^{18} \text{ cm}^{-2}$ et $N_A = 10^{15} \text{ s}^{-1} \Rightarrow N_{\text{reac}} = 1,8 \text{ par heure}$
 - ${}^3\text{He}(\alpha, \gamma){}^7\text{Be}$ (interaction EM) : $\sigma = 3 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 \Rightarrow N_{\text{reac}} = 11 / \text{siècle}$
 - $p(p, \nu e^+){}^2\text{H}$ (interaction faible) : $\sigma = 2 \times 10^{-49} \text{ cm}^2 \Rightarrow N_{\text{reac}} = 1 / 10^8 \text{ ans !}$



LUNA (Gran Sasso, Italie)



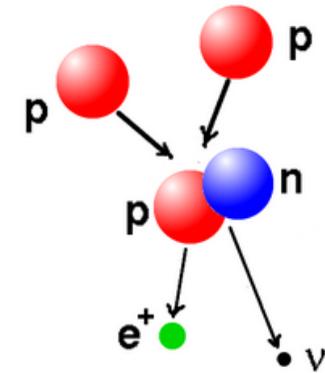
La combustion de l'hydrogène

- A l'œuvre dans toutes les étoiles, pendant $\sim 80\%$ de leur vie

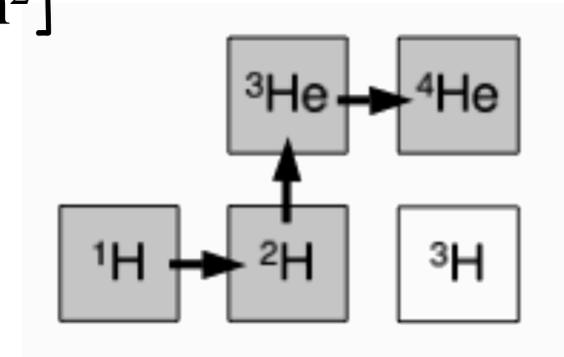
- 1^{re} réaction : $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu$ ($Q = 1,44 \text{ MeV}$)

Réaction de plus faible barrière coulombienne

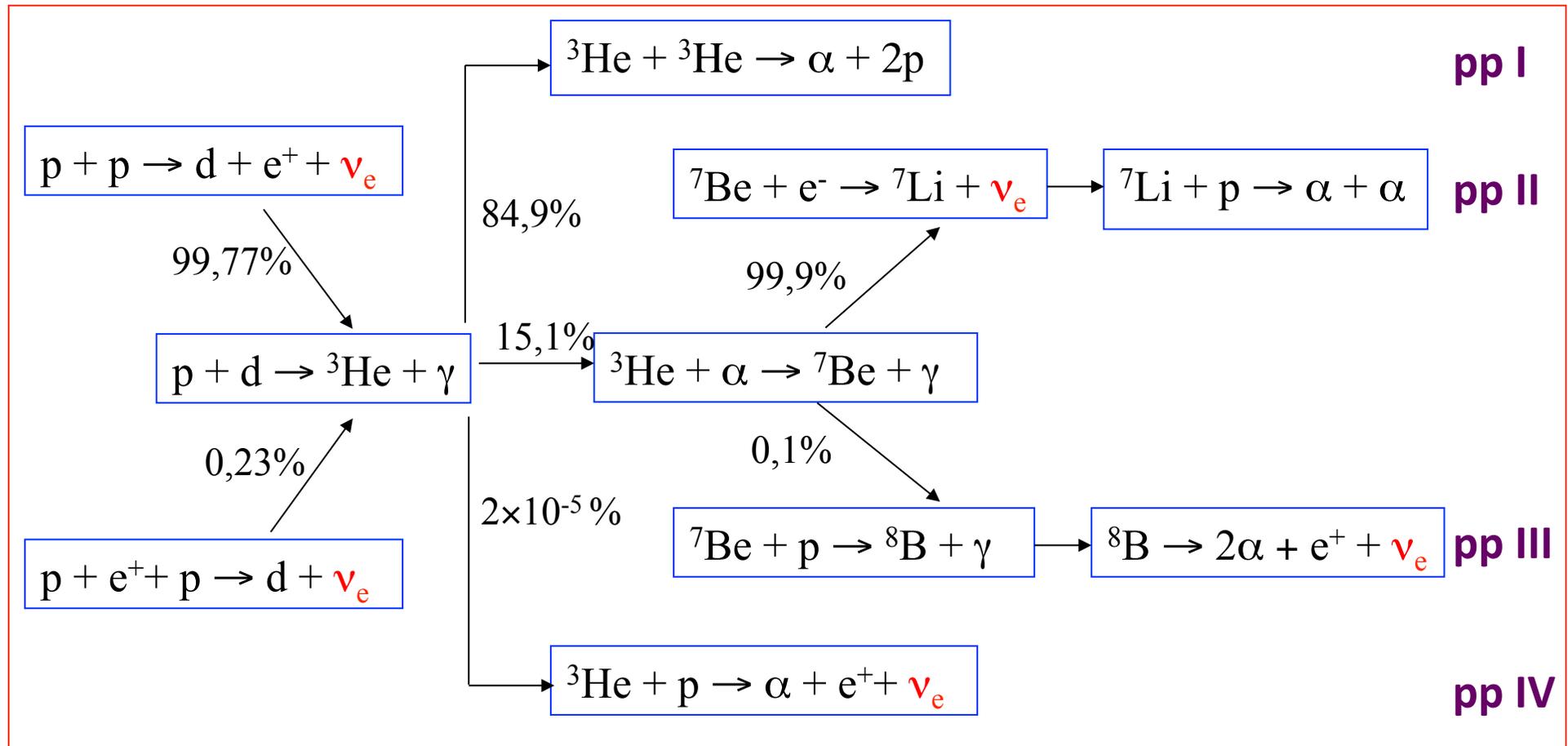
Mécanisme de réaction: (i) formation d'un état composé ${}^2\text{He}$ avec spins des protons antiparallèles (principe d'exclusion de Pauli) (ii) transformation d'un proton en neutron – possible car $Q > \Delta(n) - \Delta(p)$ – et simultanément (iii) changement de spin de l'un des nucléons ($J^\pi({}^2\text{H}) = 1^+$) [$\sigma(E_0=6 \text{ keV}) = 8 \times 10^{-51} \text{ cm}^2$]



- 2^e réaction : ${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ ($Q = 5,49 \text{ MeV}$)
De nombreuses mesures depuis 1962, dont à **LUNA** en 2002 à l'énergie typique du cœur du soleil (l'énergie du pic de Gamow)

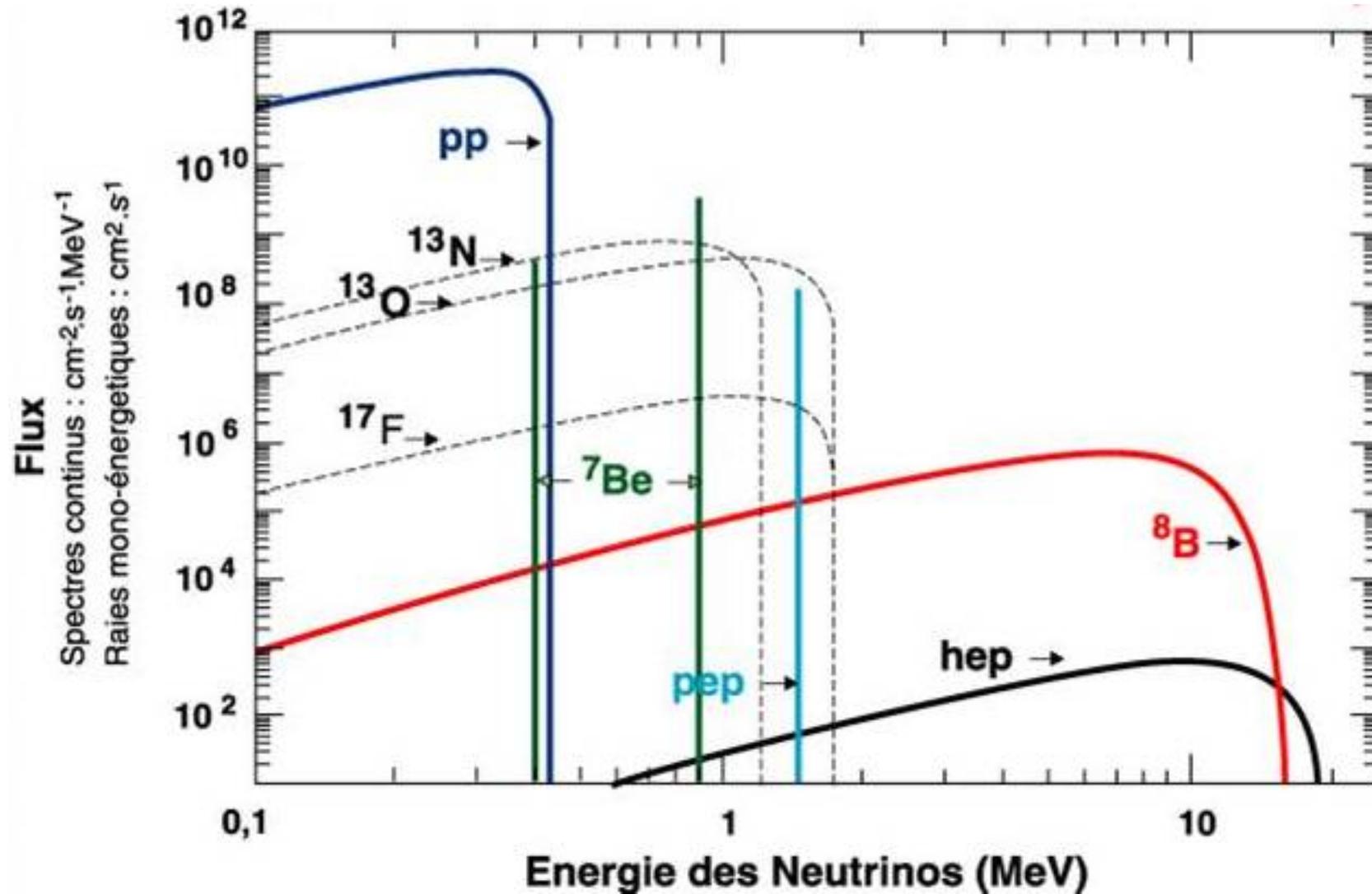


Les chaînes proton-proton dans le soleil



Référence : Bethe & Critchfield (1938) (prix Nobel décerné à **Hans Bethe** en 1967)

Les neutrinos solaires



La détection des neutrinos solaires

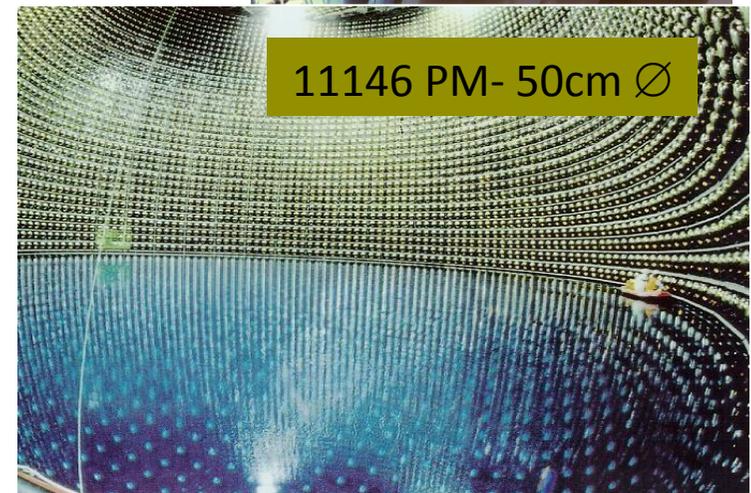
- **Expérience pionnière** (1964 - 2001) de **R. Davis** (prix Nobel 2002) et J. Bahcall : **615 t** de C_2Cl_4 (détergent) dans la mine de **Homestake**



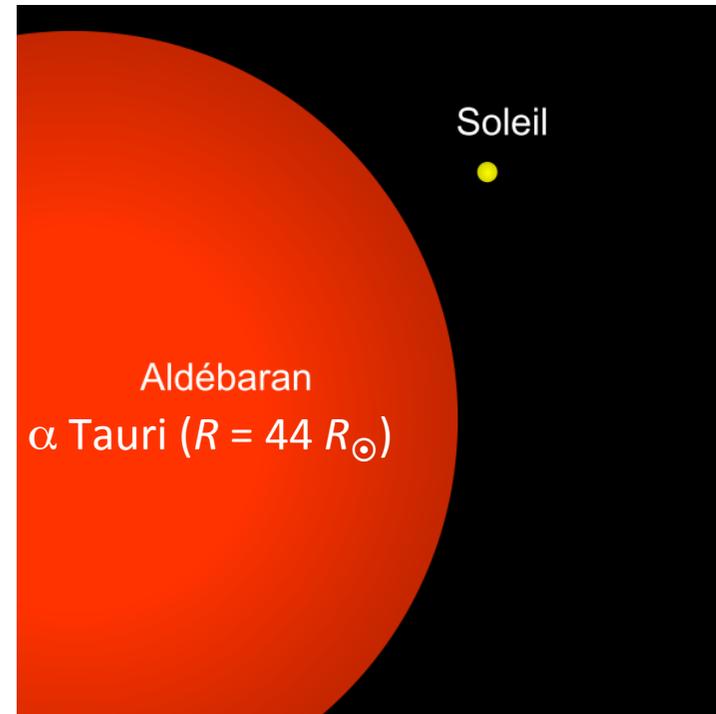
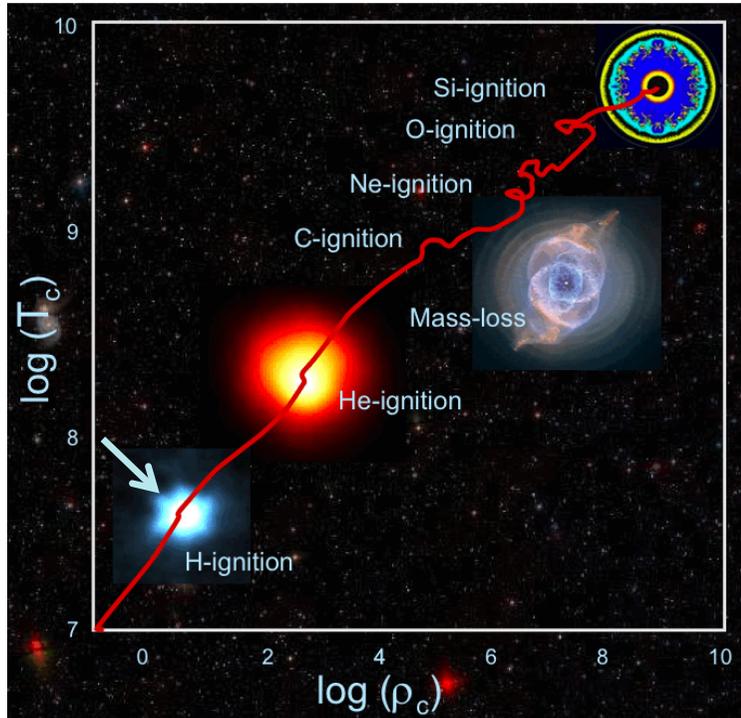
Production de ${}^{37}Ar$ = $\sim 0,4$ atome par jour, soit environ 30% du signal attendu

- Expériences ultérieures : SAGE, GALLEX (radiochimiques), (Super-)Kamiokande (prix Nobel 2002 à M. Koshiba), SNO

⇒ Oscillation des neutrinos $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$
(les neutrinos ont une masse)



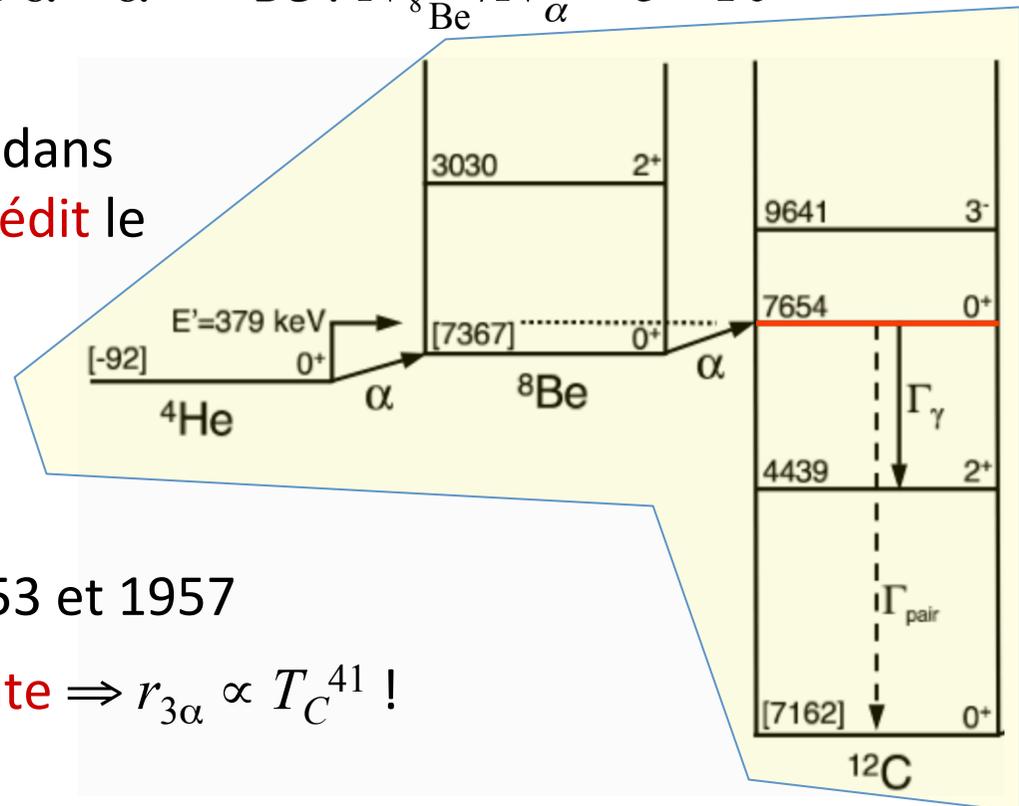
Les étoiles géantes rouges



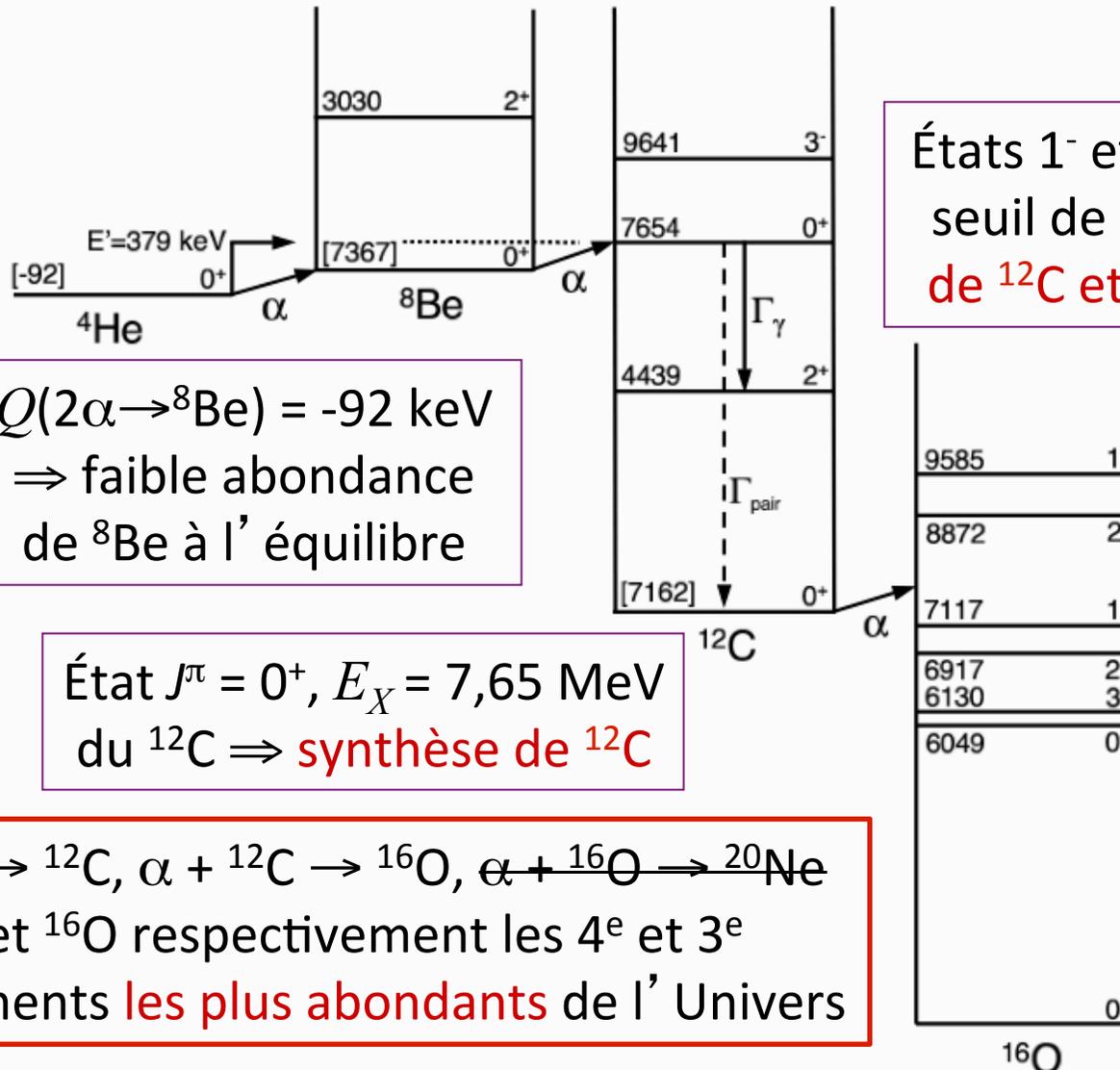
- Fin de la combustion de H \Rightarrow **contraction** et **chauffage du cœur** inerte d'He
 \Rightarrow **Refroidissement** ($K \sim \text{constant}$) et **expansion** ($\Omega \sim \text{constant}$) de l'**enveloppe**
 (rayon du soleil $R_{\odot} \rightarrow 50 R_{\odot}$, soit environ l'orbite de Mercure)
- Allumage de la combustion du cœur d'He quand $T_c \sim 10^8$ K

La combustion de l'hélium

- **Instabilité de $p + \alpha = {}^5\text{Li}$** ($T_{1/2} = 3,7 \times 10^{-22}$ s) et **$\alpha + \alpha = {}^8\text{Be}$** ($T_{1/2} = 6,7 \times 10^{-17}$ s)
- Fusion de 3α en ${}^{12}\text{C}$ en **2 étapes** : $\alpha + \alpha \rightarrow {}^8\text{Be}$ puis $\alpha + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ (Öpik 1951, Salpeter 1952)
- Abondance de ${}^8\text{Be}$ à l'équilibre de $\alpha + \alpha \leftrightarrow {}^8\text{Be}$: $N_{{}^8\text{Be}} / N_{\alpha} = 5 \times 10^{-10}$ pour $T_C = 10^8$ K et $\rho_C = 10^5$ g cm $^{-3}$
- Etant donnée l'abondance de ${}^{12}\text{C}$ dans l'Univers (!), **Fred Hoyle (1953) prédit** le caractère résonant de la réaction $\alpha + {}^8\text{Be} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ et donc **l'existence d'un état de spin-parité $J^{\pi} = 0^+$ à $\sim 7,7$ MeV dans le ${}^{12}\text{C}$**
- Vérification expérimentale en 1953 et 1957
- Réaction 3α **doublement résonante** $\Rightarrow r_{3\alpha} \propto T_C^{41}$!



De l'origine du carbone et de l'oxygène



$Q(2\alpha \rightarrow ^8\text{Be}) = -92$ keV
 \Rightarrow faible abondance
 de ^8Be à l'équilibre

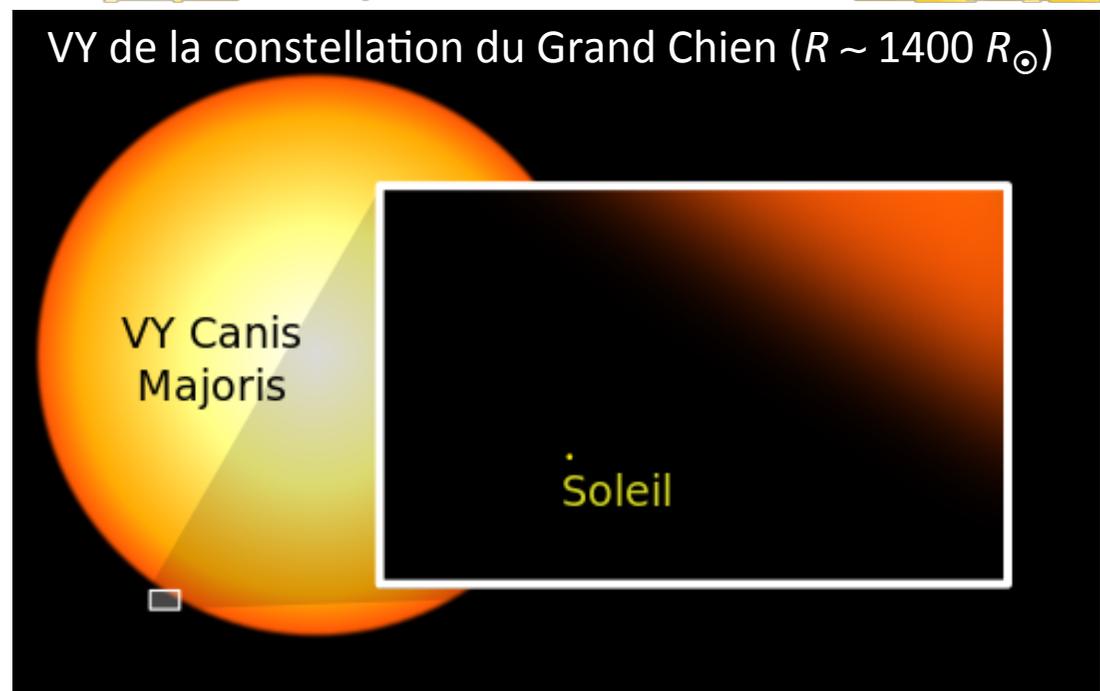
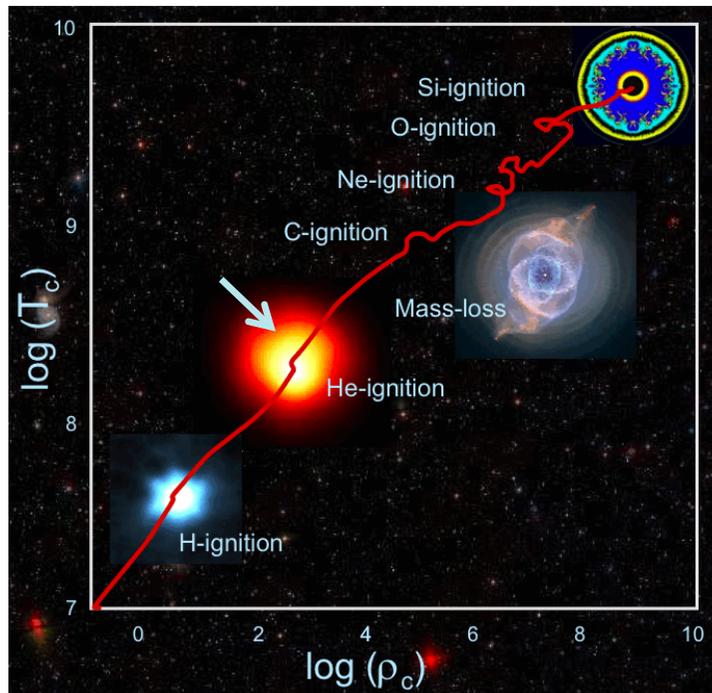
État $J^\pi = 0^+$, $E_X = 7,65$ MeV
 du $^{12}\text{C} \Rightarrow$ **synthèse de ^{12}C**

- $3\alpha \rightarrow ^{12}\text{C}$, $\alpha + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{16}\text{O}$, $\alpha + ^{16}\text{O} \rightarrow ^{20}\text{Ne}$
 \Rightarrow ^{12}C et ^{16}O respectivement les 4^e et 3^e
 éléments **les plus abondants** de l'Univers

États 1^- et 2^+ de ^{16}O sous le
 seuil de $^{12}\text{C} + \alpha \Rightarrow$ **survie**
 de ^{12}C et **synthèse de ^{16}O**

Etat du ^{20}Ne à
 4,97 MeV de
 parité non-
 naturelle \Rightarrow
survie de ^{16}O

Les phases de combustion avancées



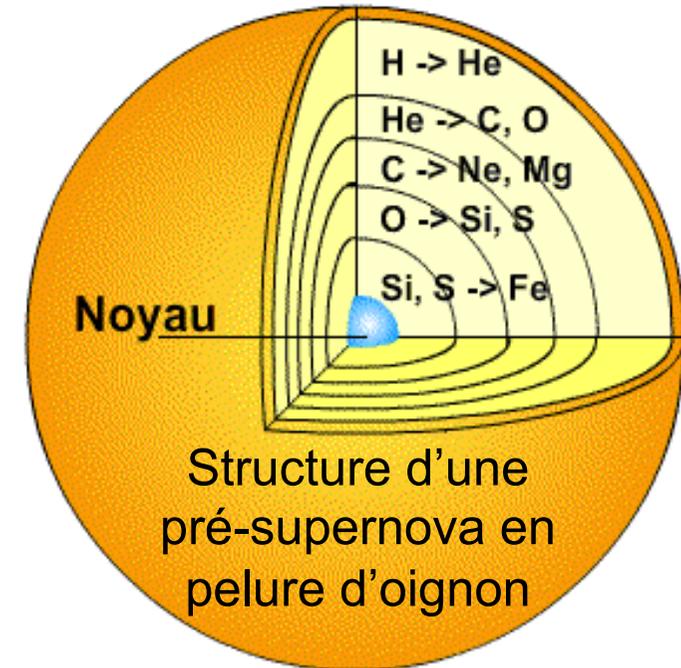
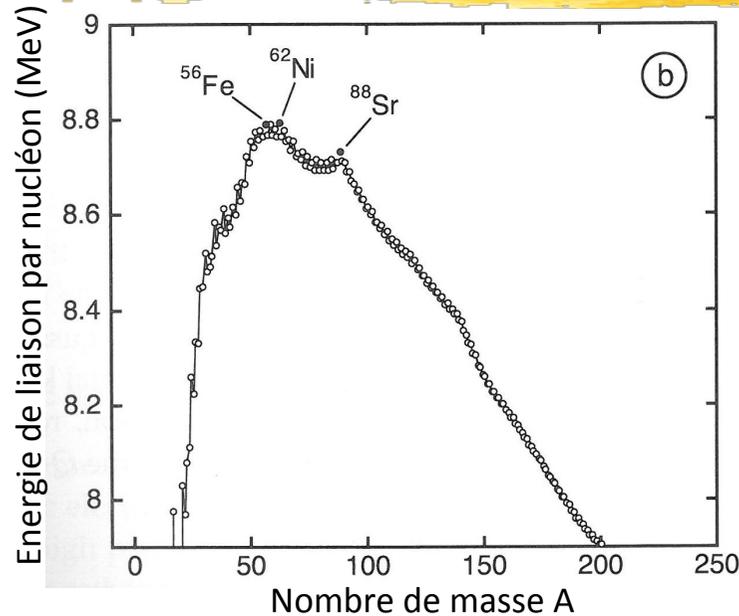
- Dans les étoiles massives ($M > 8 M_{\odot}$), combustion du carbone :
 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + ^4\text{He}$; $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Na} + \text{p}$; $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{23}\text{Mg} + \text{n}$;
 $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C} \rightarrow ^{24}\text{Mg} + \gamma$
- Puis combustion du néon, de l'oxygène et du silicium (équilibre statistique nucléaire $A + \alpha \leftrightarrow B + \gamma$)

Structure d'une pré-supernova

Equilibre
statistique
nucléaire \Rightarrow

$$N_A \propto e^{B(A)/kT}$$

($T \sim 3,5$ GK)



- Formation d'un **cœur de fer inerte**
- Effondrement du cœur quand il atteint la **masse de Chandrasekhar** ($M_{\text{Ch}} \sim 1,4 M_{\odot}$), la pression de dégénérescence de ses électrons n'étant plus suffisante pour contrebalancer sa propre gravité
- Rebond quand la densité centrale du cœur atteint celle du noyau atomique \Rightarrow **supernova**

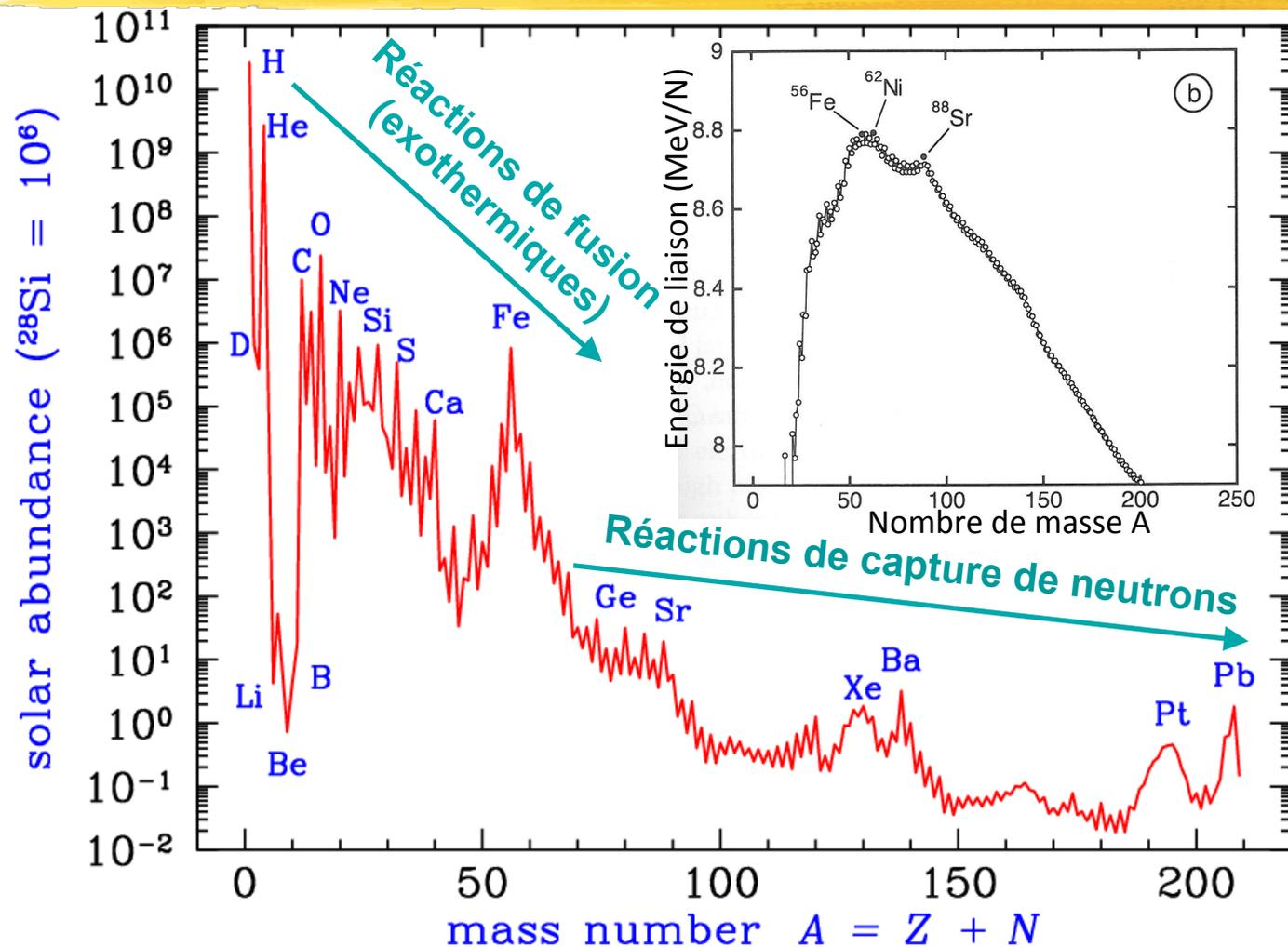
Supernova à effondrement gravitationnel du cœur



- Observation de **titane-44 radioactif** ($T_{1/2} = 60$ ans) dans le vestige de supernova de **Cassiopee A** (NuSTAR ; Grefenstette et al. 2014)

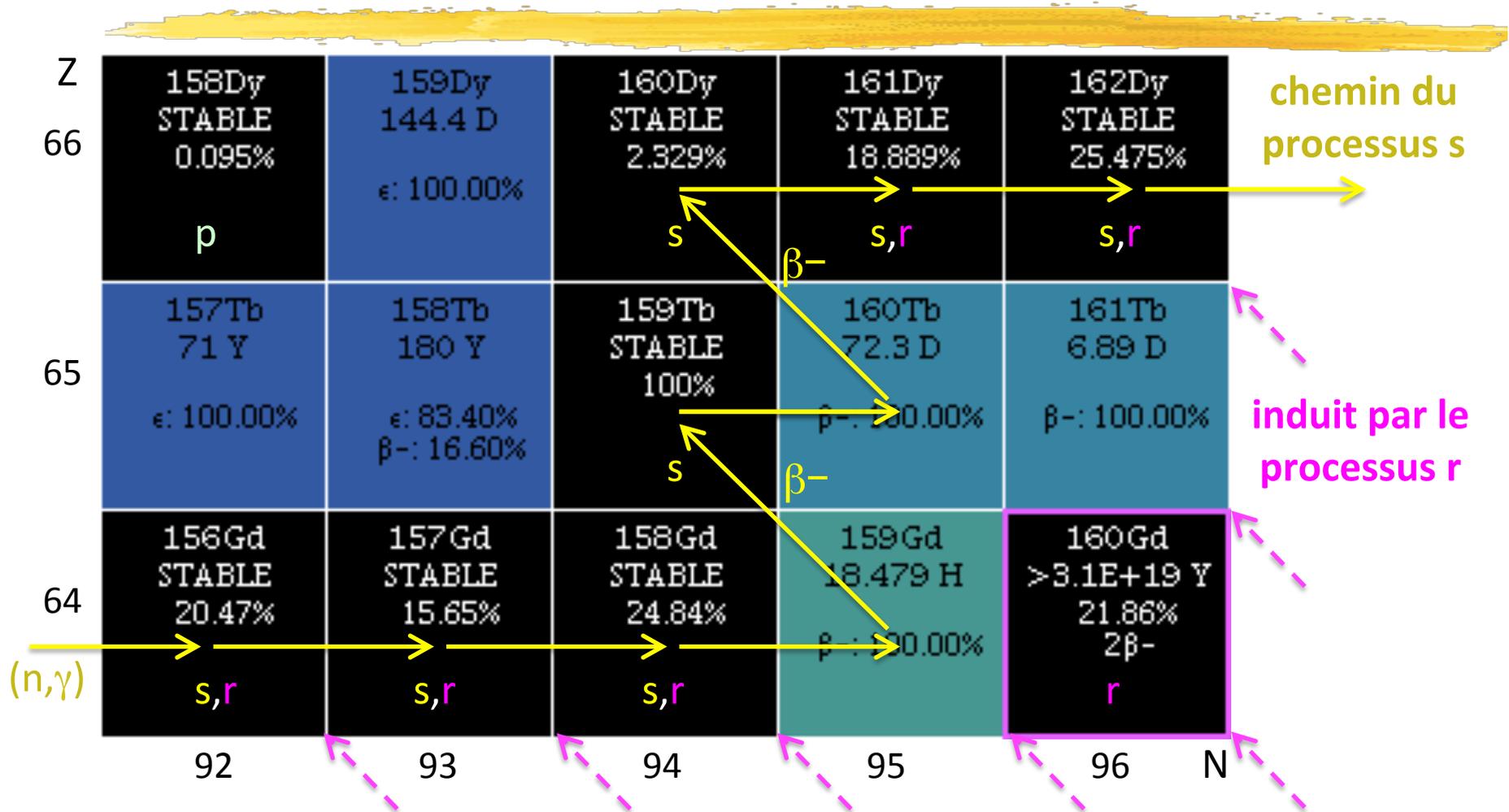
Vincent Tatischeff, 25^e Festival d'Astronomie de Fleurance, 7 – 14 août 2015

Nucléosynthèse au-delà du pic du fer



- Vue d'ensemble de la nucléosynthèse : Cameron (1957) ; Burbidge, Burbidge, Fowler & Hoyle (1957) – Prix Nobel à **William Fowler** en 1983
Vincent Tatischeff, 25^e Festival d'Astronomie de Fleurance, 7 – 14 août 2015

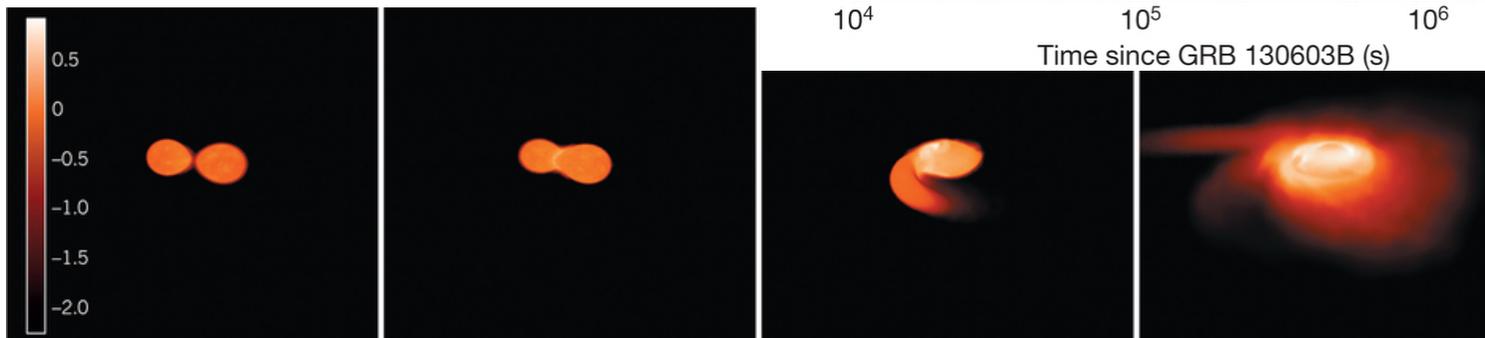
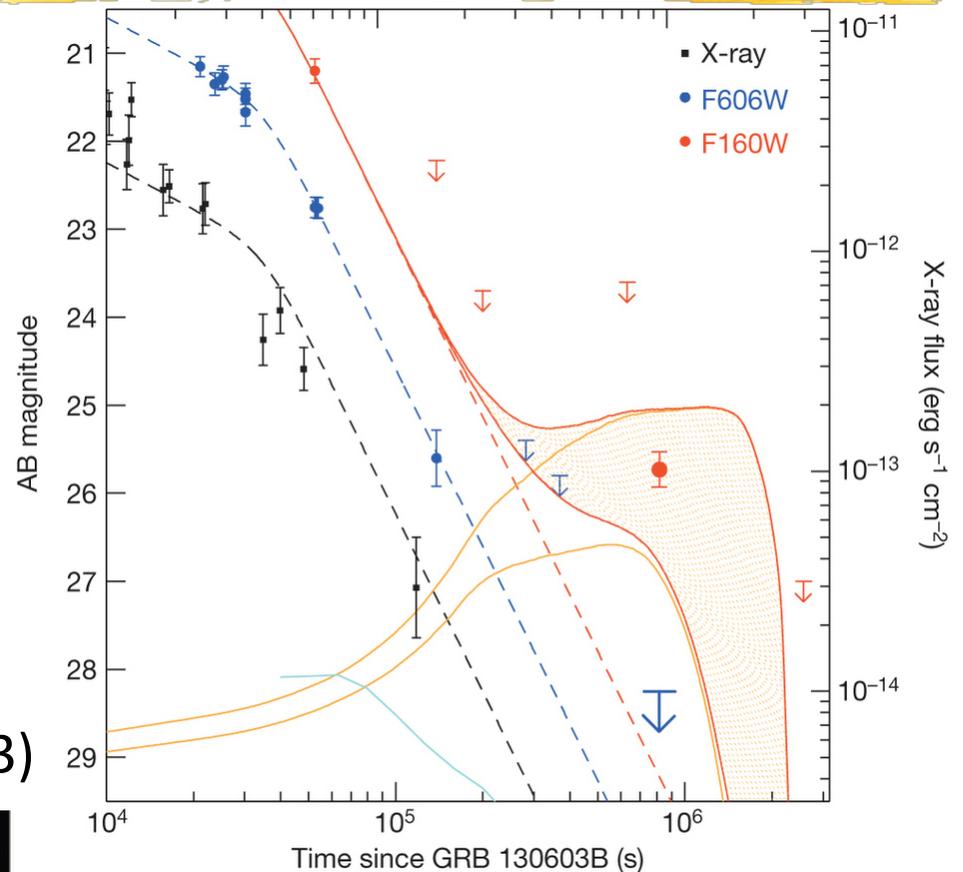
Les processus de capture de neutrons



- **Processus s (slow)** : étoiles massives ($M > 13 M_{\odot}$), AGB ; $N_n \sim 10^7 \rightarrow 10^{11} \text{ cm}^{-3}$
- **Processus r (rapid)** : environnements explosifs (?) ; $N_n \sim 10^{20} - 10^{23} \text{ cm}^{-3}$

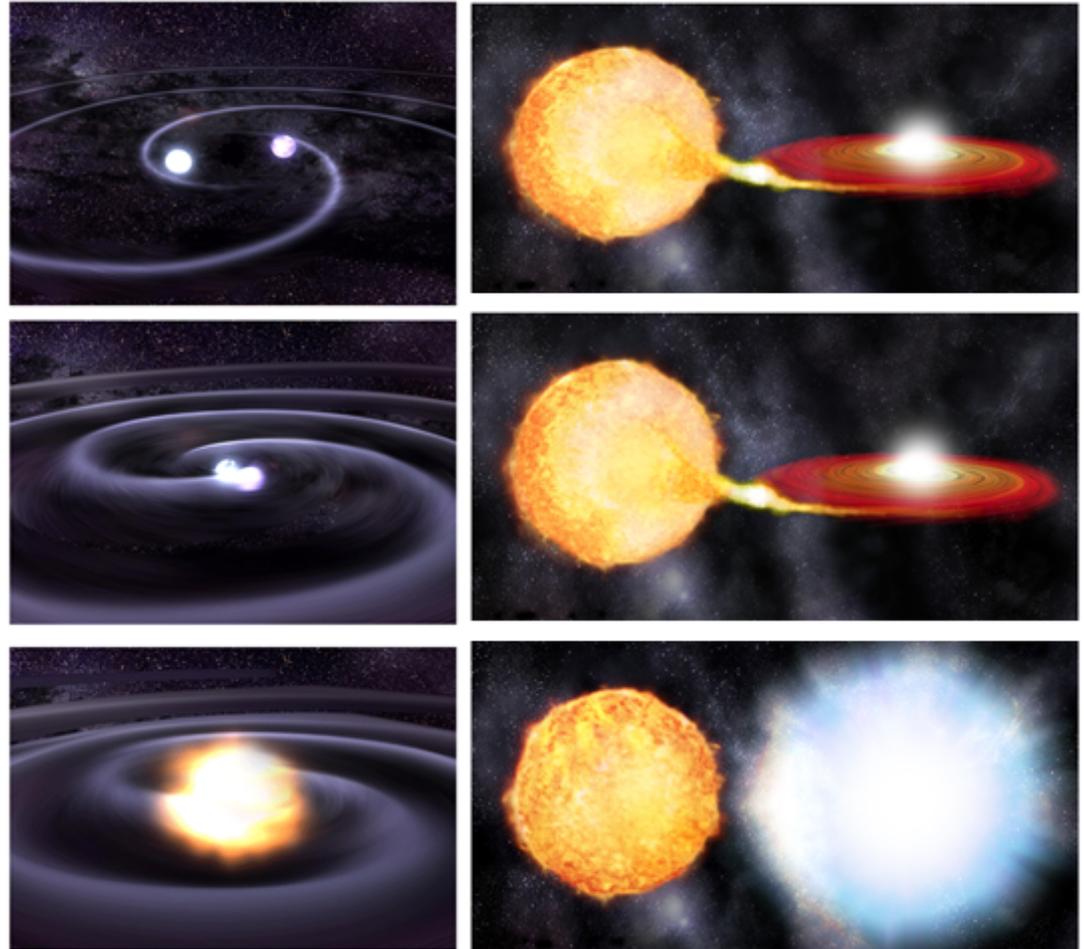
Le site astrophysique du processus r

- Couches internes des supernovae gravitationnelles ? Pas assez riches en neutrons (e.g. Wanajo 2013)
- Détection (Hubble) d'un excès d'émission rémanente (proche IR) dans la **coalescence d'un système binaire de deux étoiles à neutrons** (GRB 130603B) : **kilonova** générée par la radioactivité de noyaux *r* (Tanvir et al. 2013 ; Berger et al. 2013)



Les supernovas thermonucléaires (type Ia)

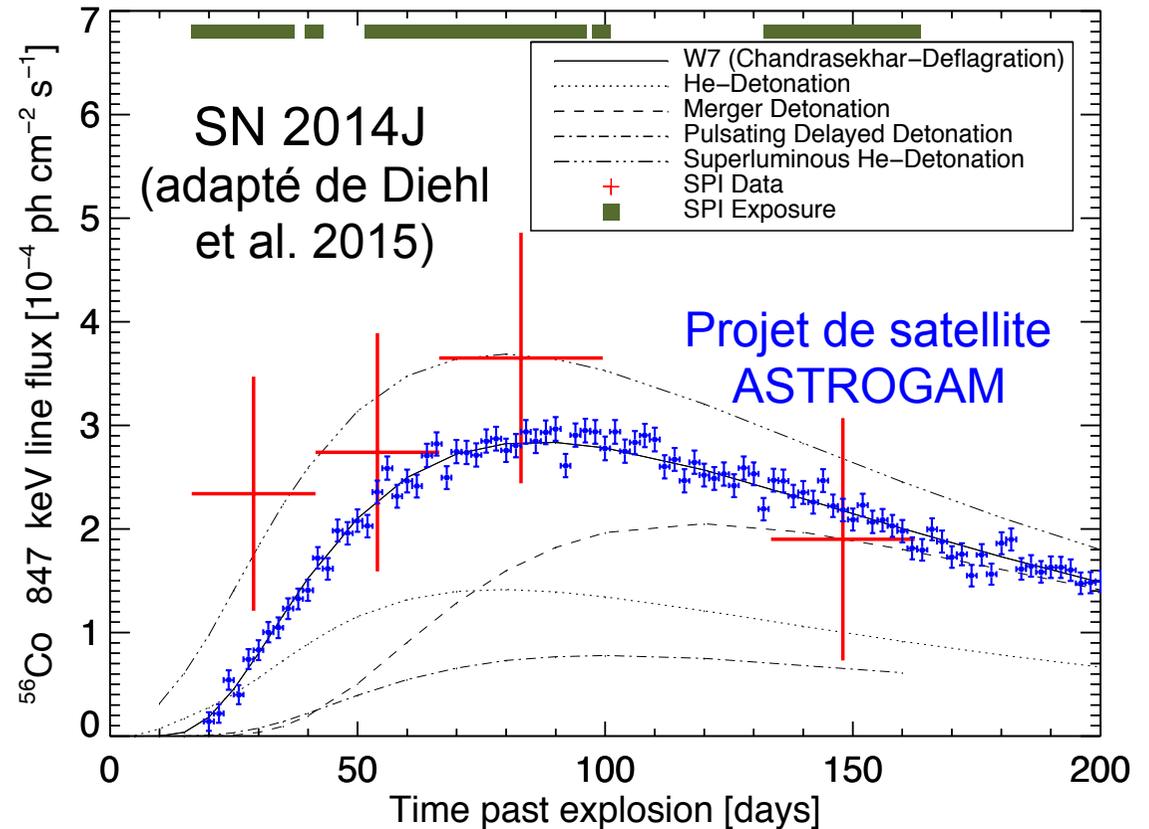
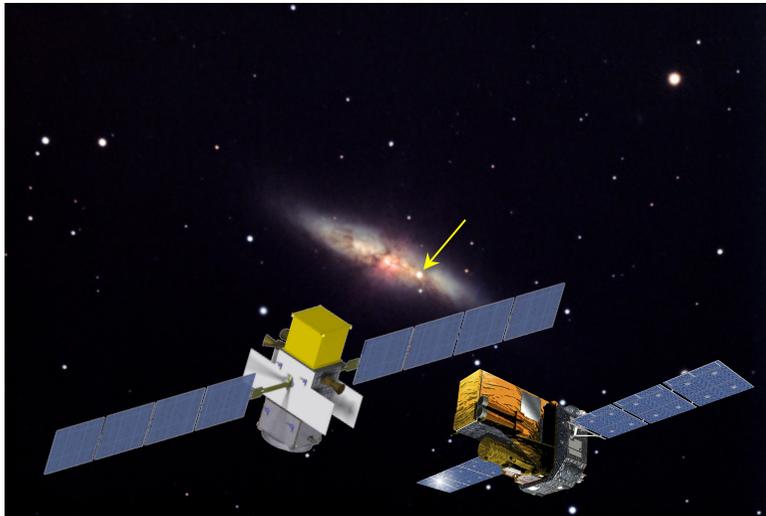
- Explosion d'une **naine blanche à carbone-oxygène dans un système binaire**
- Allumage des réactions de combustion du carbone, puis de l'oxygène, quand la masse de la naine blanche atteint M_{Ch} => synthèse d'éléments de masse intermédiaire (O - Ca) et de ceux du pic du Fe
- **Nature du compagnon** (autre naine blanche, étoile géante), **mécanisme d'explosion** (déflagration, détonation)?



- **Chandelles standards en cosmologie !?**

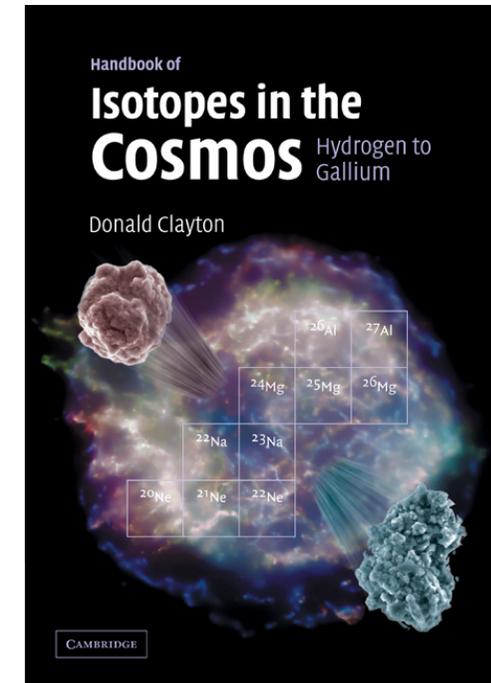
La supernova SN 2014J

- Supernova de **type Ia** ayant explosé le 14 Jan 2014 dans la galaxie à flambée d'étoiles M82 à $D = 11,4 \times 10^6$ années-lumière (proche !)
- Détection des raies γ du ^{56}Co ($T_{1/2}=77$ j) avec **INTEGRAL** \Rightarrow synthèse dans l'explosion de $0,62 \pm 0,13 M_{\odot}$ de ^{56}Ni ($T_{1/2}=6,1$ j, $\rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$)



Conclusion

- La compréhension de l'origine des nucléides est **l'une des grandes avancées scientifiques du XX^e siècle** (modélisations astrophysiques, mesures de sections efficaces de réactions nucléaires...)
- La nucléosynthèse stellaire est aujourd'hui comprise dans ses grandes lignes, la principale question en suspens demeurant **l'identification du site astrophysique du processus r**
- De nouvelles mesures d'abondance (astronomie gamma, analyse isotopique de matériaux extraterrestres etc.) posent de nouvelles questions : mécanismes d'explosion des **supernovas de type Ia**, contexte astrophysique de **formation du système solaire**, etc.





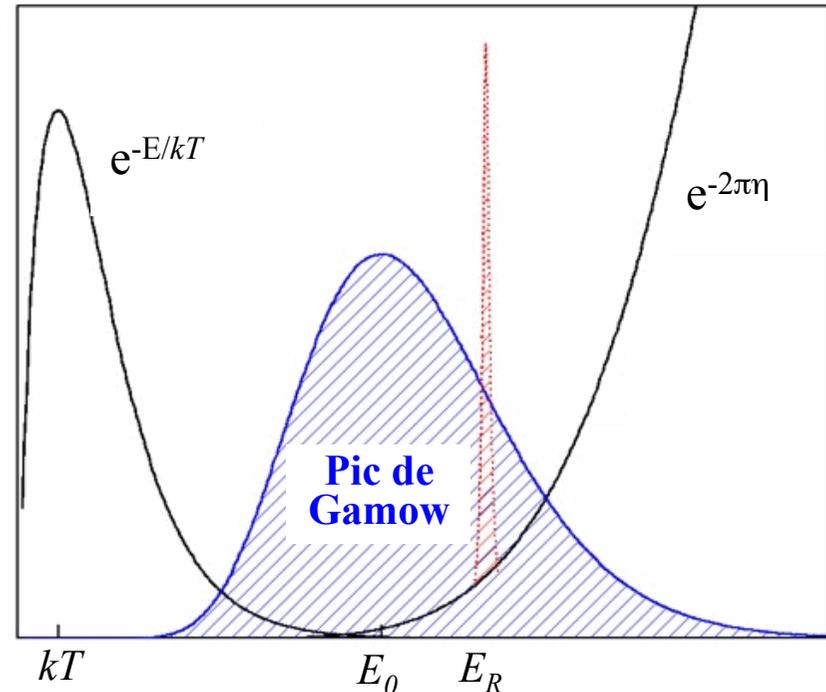
Diapositives supplémentaires

Les taux de réactions thermonucléaires

- Nombre de réactions entre A et B par unité de volume et unité de temps :

$$r_{A+B} = \frac{N_A N_B}{1 + \delta_{AB}} \int_0^{\infty} \sigma_{A+B}(v) v \phi(v) dv$$

où N_i est la densité des particules i (cm^{-3}), δ_{AB} le symbole de Kronecker et $\phi(v)dv$ la probabilité que la vitesse relative entre A et B $v \in [v, v+dv]$



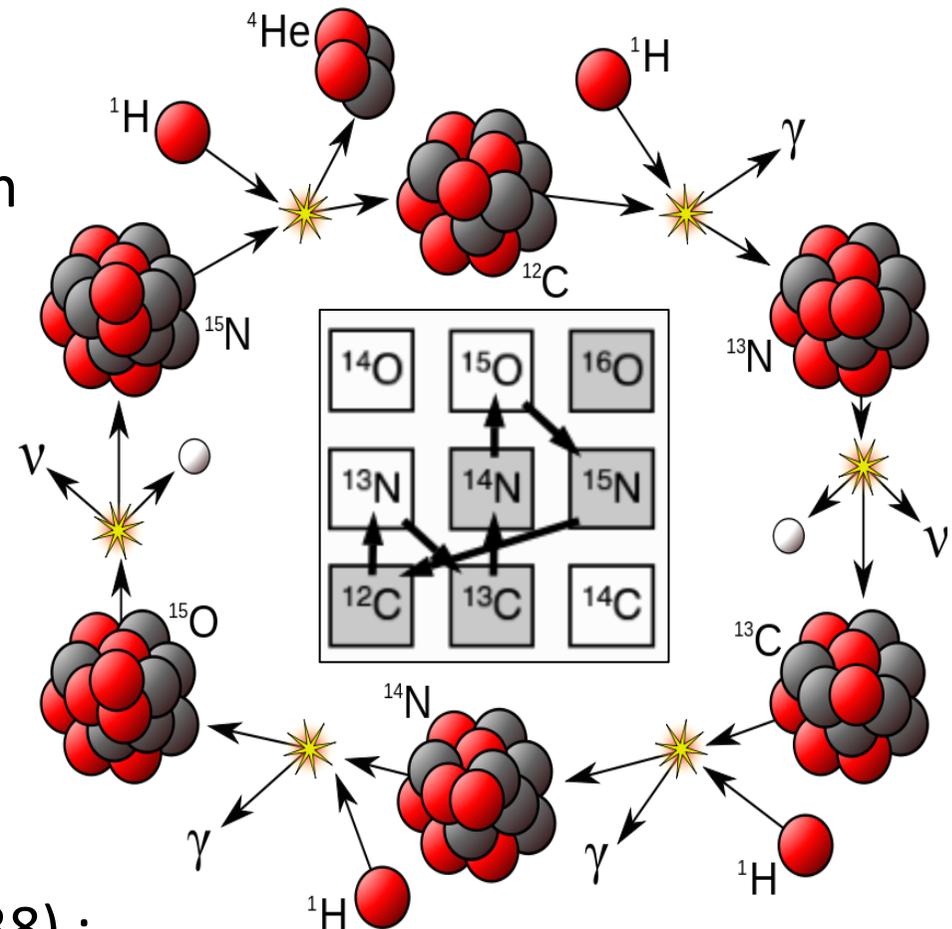
- Pour un gaz parfait non dégénéré, $\phi(v)$ est la distribution de **Maxwell-Boltzmann** ($\phi(E) \exp(-E/kT)$ pour $E \gg kT$)

⇒ Domaine d'énergie d'intérêt = **pic de Gamow** (1928)

- Dans le soleil, $E_0 = 6 \text{ keV}$ pour la réaction $p + p$, $E_0 = 24 \text{ keV}$ pour $p + {}^{12}\text{C}$

Le cycle CNO

- Dans les étoiles **enrichies**, les éléments C, N et O peuvent servir de **catalyseurs** de la transmutation $4p+2e^- \rightarrow {}^4\text{He}+2\nu$ ($Q = 26,7 \text{ MeV}$)
 - Source d'énergie principale des étoiles de masse $M > \sim 1,2 M_{\odot}$
 - A l'équilibre du cycle : $({}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C})_e = 0,25$, comparé à $({}^{12}\text{C}/{}^{13}\text{C})_{\odot} = 1\%$
- ⇒ **Source principale de ${}^{13}\text{C}$ et de ${}^{14}\text{N}$ dans l'Univers**



Références : von Weizsaecker (1938) ;

Bethe (1939) ; prix Nobel décerné à **Hans Bethe** en 1967