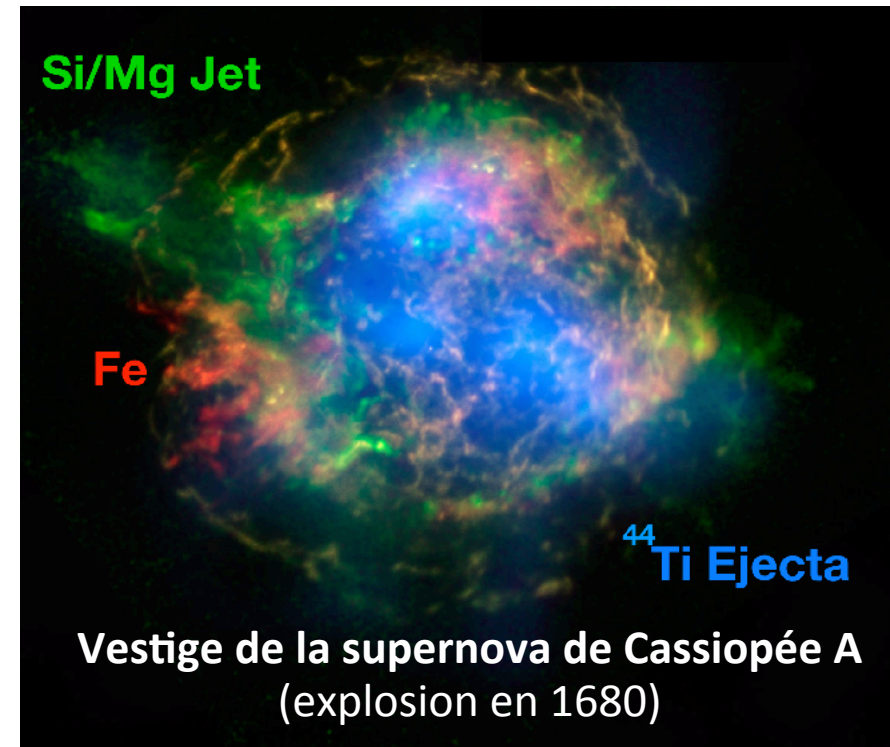
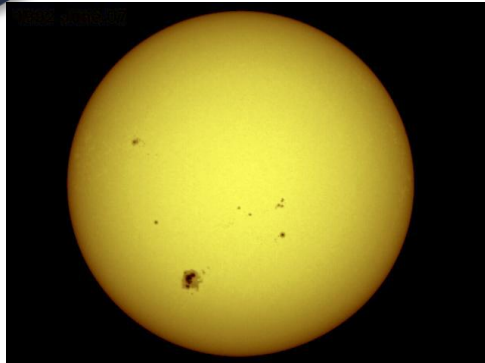


150 122.24 s $\epsilon = 100.00\%$	160 STABLE 99.757%	170 STABLE 0.038%	180 STABLE 0.205%	190 26.88 s $\beta^- = 100.00\%$
--	--------------------------	-------------------------	-------------------------	--

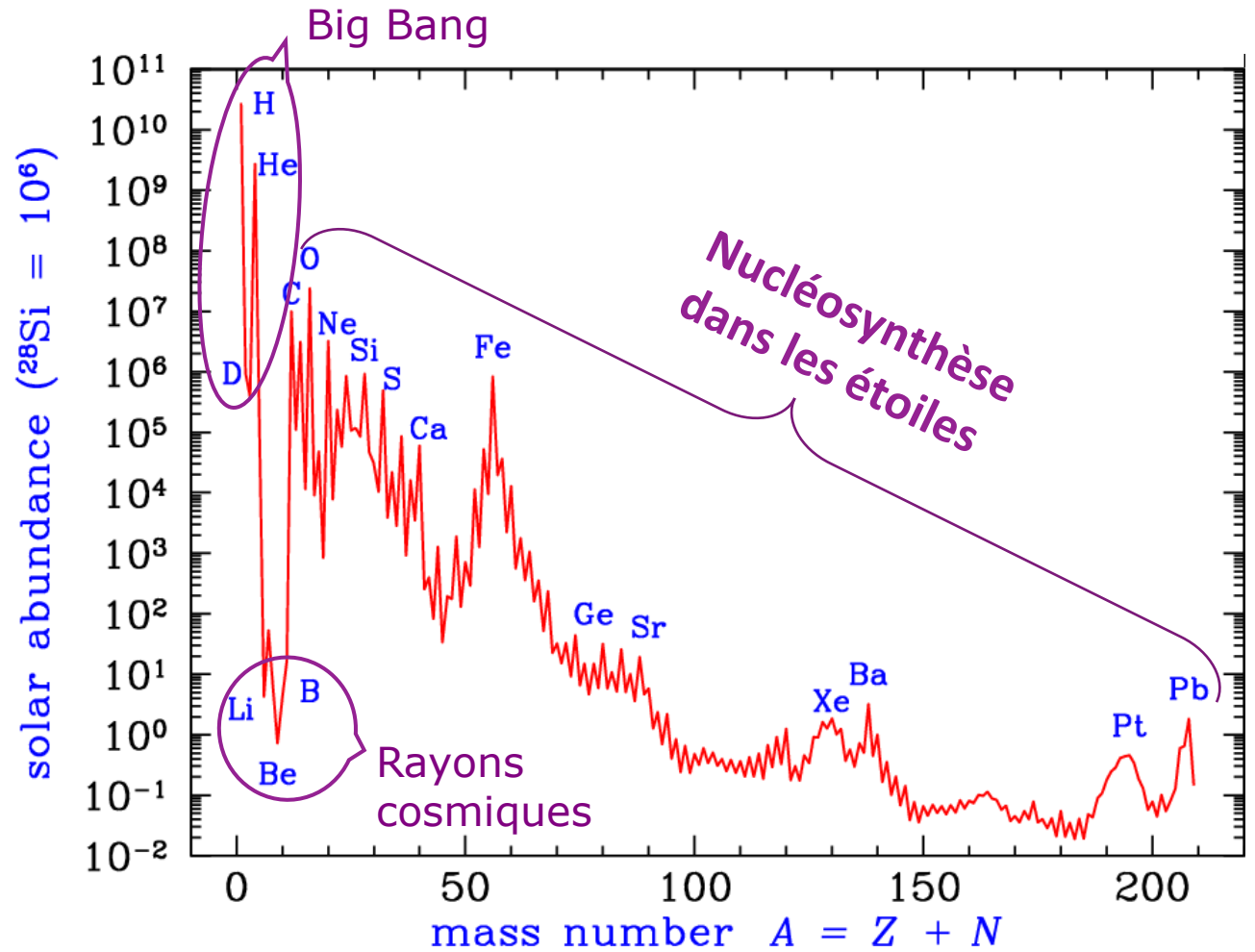


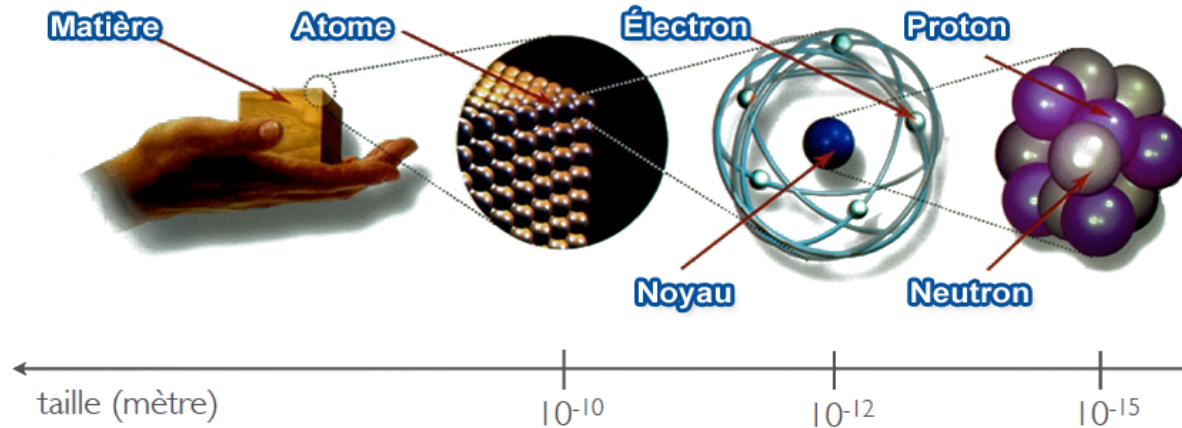
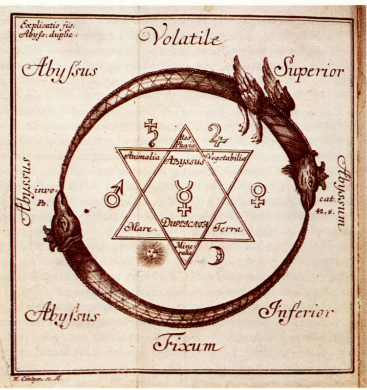


La photosphère solaire



Fragment de la météorite d'Orgueil





- **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 »
  - **Lavoisier** (1743 - 1794) : « Rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »
- ⇒ Tentatives alchimiques de **transmutation de la matière** (plomb → or) pendant + de 2000 ans

Prix Nobel 1908

radioactivité  $\alpha$

- **1902** Rutherford & Soddy découvrent la **transmutation radioactive**  $^{232}\text{Th} \rightarrow ^{228}\text{Ra} + ^4\text{He}$
- **1919** Rutherford & Blackett réalise la 1<sup>re</sup> **transmutation artificielle**  $^{14}\text{N} + ^4\text{He} \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{proton}$
- **1919** Perrin, puis Eddington suggèrent que **l'énergie des étoiles** résulte de la **fusion nucléaire**

Prix Nobel 1983

- **1957** Cameron d'une part, Burbidge, Burbidge, Fowler & Hoyle de l'autre donnent une **vue d'ensemble des processus de nucléosynthèse** dans l'Univers

Prix Nobel 2002

- **1968** Davis et al. réalisent la **1<sup>re</sup> détection de neutrinos émis au cœur du soleil**
- **1987** Détection de la **radioactivité gamma** ( $^{56}\text{Co}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ) de la supernova à effondrement de coeur **SN 1987A**
- **2017** Observation d'une **kilonova** due à la **nucléosynthèse de noyaux lourds** au cours de la **fusion de deux étoiles à neutrons**

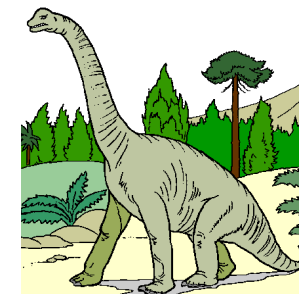
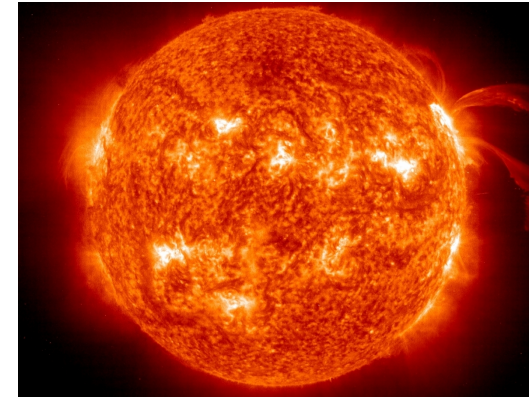
- Première estimation par **Lord Kelvin** et **von Helmholtz** en 1862 : temps que met l'étoile à rayonner son énergie interne (thermique)

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

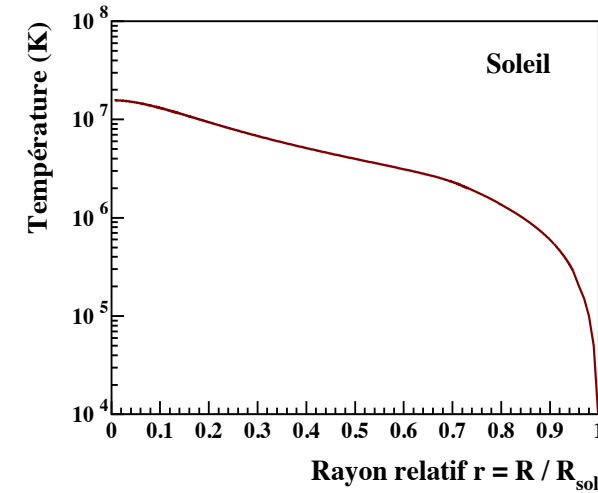
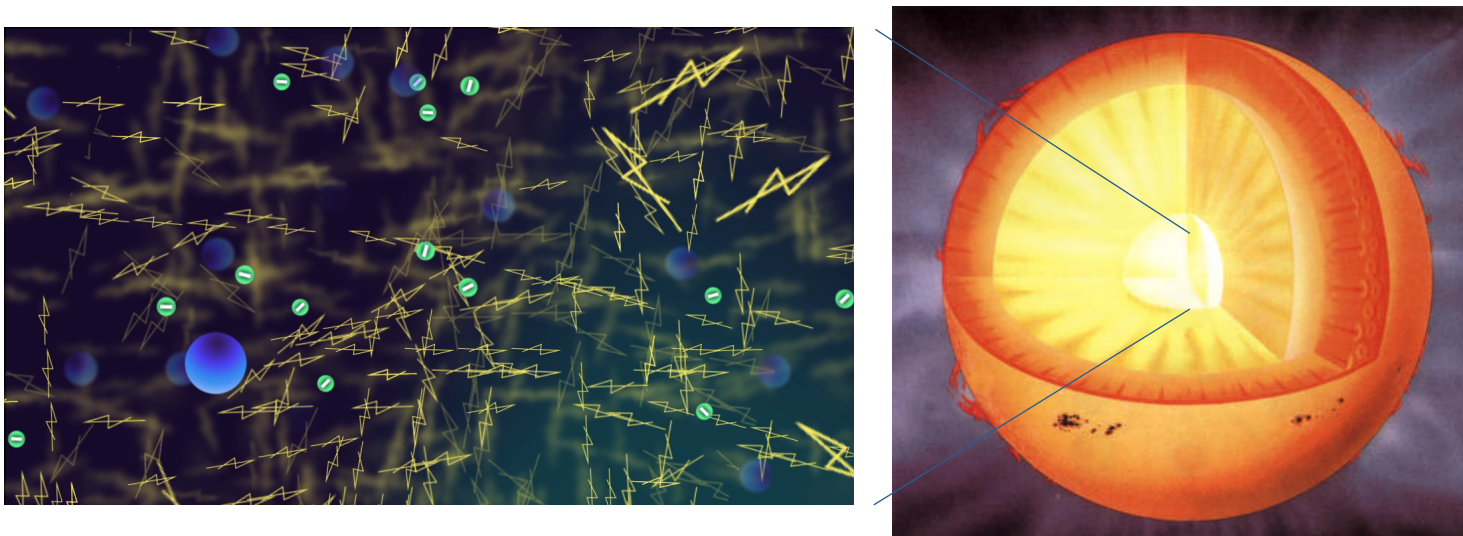
$K$  est l'énergie cinétique totale des constituants,  $\Omega \sim GM^2 / R$  l'énergie potentielle gravitationnelle du système,  $L$  la luminosité de l'étoile,  $M$  et  $R$  sa masse et son rayon, et  $G$  la constante universelle de gravitation. D'après le **théorème du viriel** pour un système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

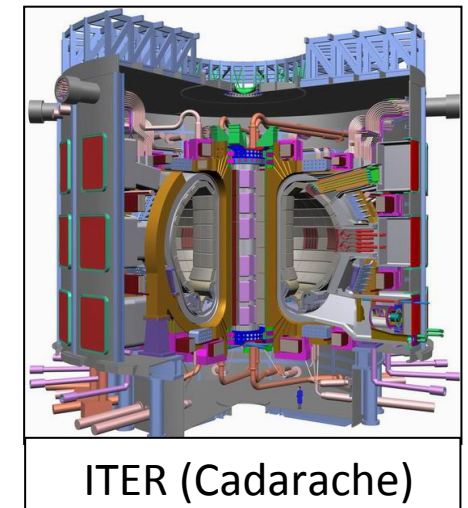
⇒ Source d'énergie interne : **le charbon ?**



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



- Une étoile est un réacteur à fusion thermonucléaire stabilisé par sa gravité

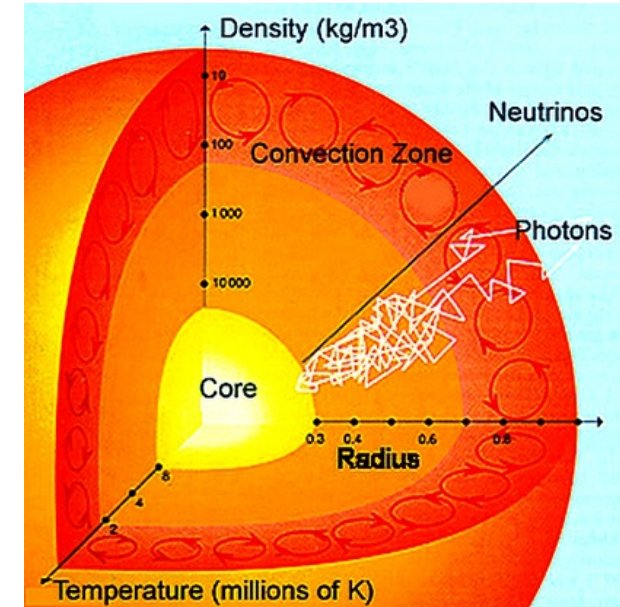


### Neutrino émis lors de la transformation d'un proton en neutron (interaction faible)

- Transformation nucléaire :  $4 p + 2 e^- \rightarrow {}^4\text{He} + 2 \nu_e + \text{photons } \gamma$
- Energie de masse cédée à l'étoile :  
 $Q = (\Delta m)c^2 - E_\nu = (4m_p + 2m_e - m_\alpha)c^2 - E_\nu \approx 4 \times 10^{-12} \text{ J}$ ,  
 $E_\nu$  étant l'énergie cinétique des **neutrinos s'échappant du soleil**
- Durée de vie de l'étoile pour transformer tout l'hydrogène du coeur en hélium :

$$t_N = Q \times N_p^{\text{coeur}} / (4L) \approx Q \times f_{\text{coeur}} M / (4m_p L) \approx \boxed{10^{10} \text{ ans}}$$

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



- Flux théorique de **neutrinos solaires** arrivant sur Terre: **65 milliards par cm<sup>2</sup> et par seconde !**

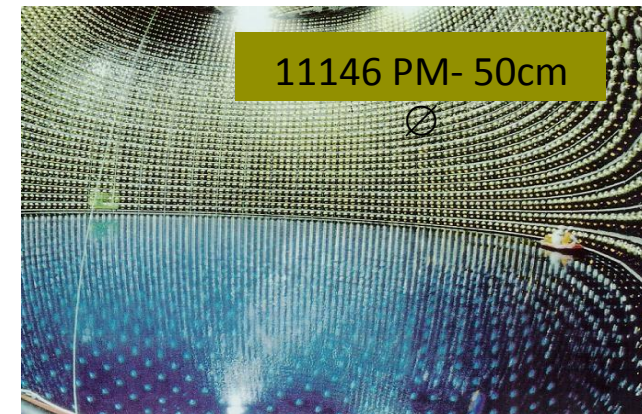
- **Expérience pionnière** (1964 - 2001) de **R. Davis** (prix Nobel 2002) et J. Bahcall : **615 t** de C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub> (détergent) dans la mine de **Homestake**



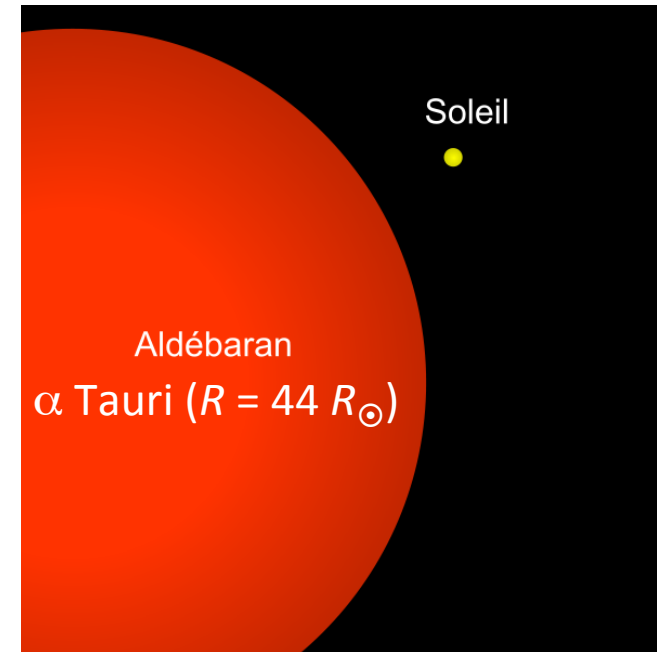
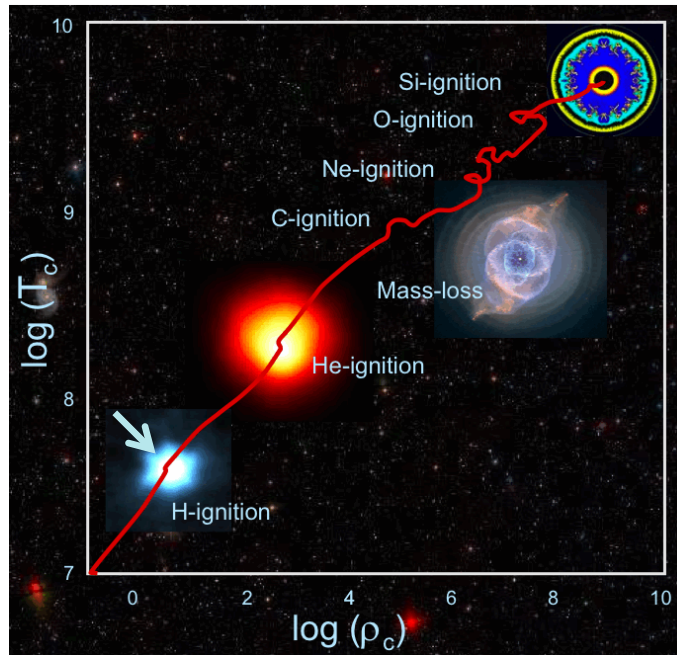
Production de <sup>37</sup>Ar = ~ 0,4 atome par jour, soit environ 30% du signal attendu

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

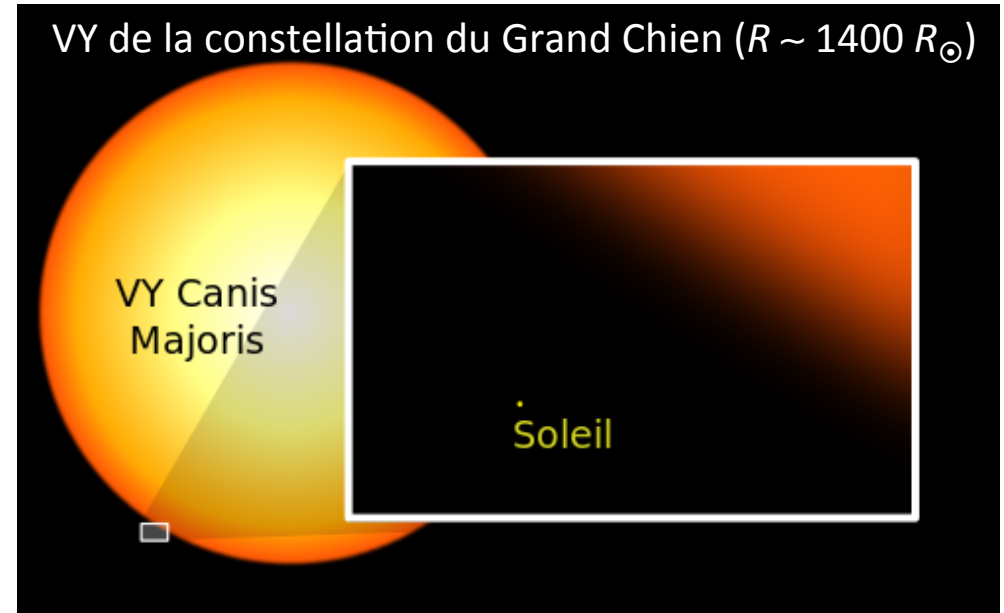
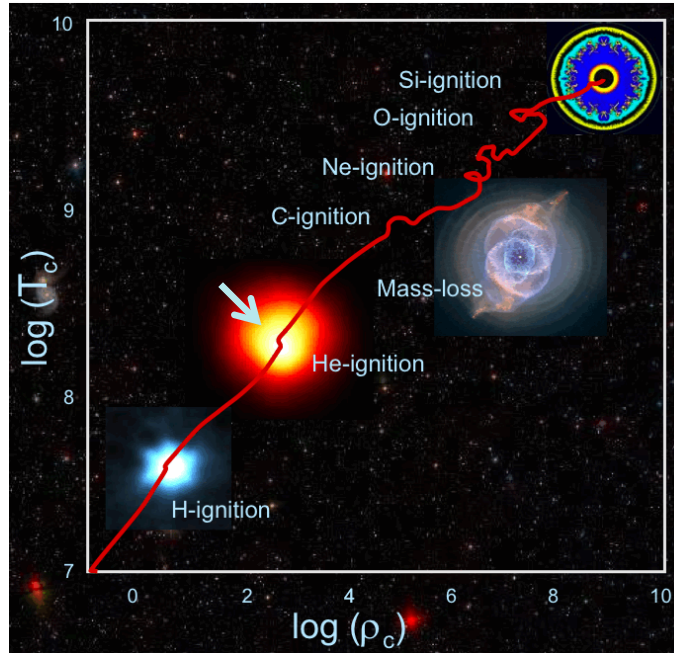
⇒ **Oscillation des neutrinos**: transformation des neutrinos électroniques en neutrinos muoniques et tauiques ( $\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$ )



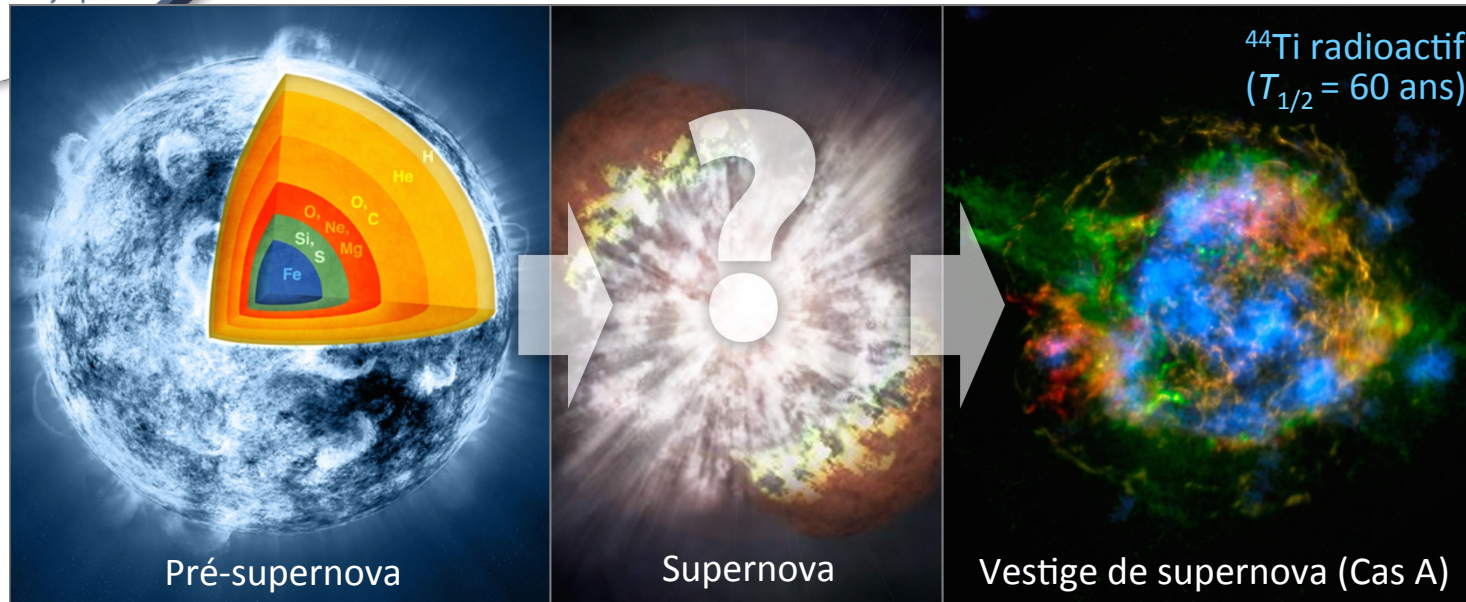




- Fin de la combustion de H  $\Rightarrow$  **contraction** et **chauffage du cœur** inerte d'He  $\Rightarrow$  **Refroidissement** ( $K \sim \text{constant}$ ) et **expansion** ( $\Omega \sim \text{constant}$ ) de l'enveloppe (rayon du soleil  $R_{\odot} \rightarrow 50 R_{\odot}$ , soit environ l'orbite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



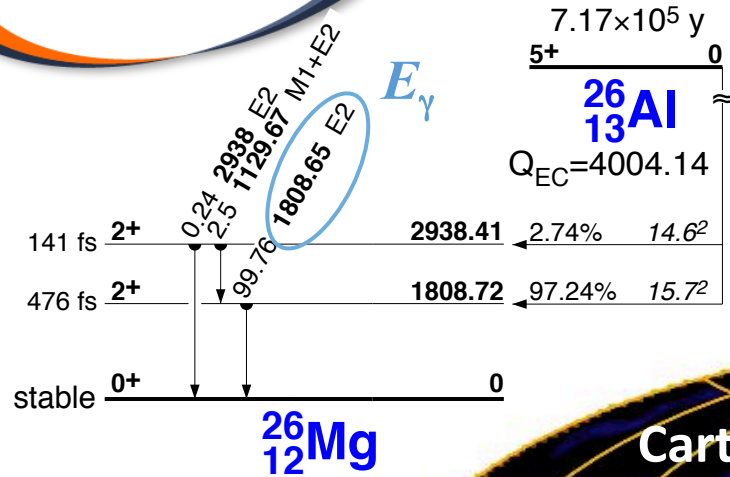
- Combustion de l'hélium (géantes rouges) :  $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C} + \gamma$ , puis  $\alpha + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$
- Combustion du carbone dans les étoiles massives ( $M > 8 M_{\odot}$ ) :  
 ${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{20}\text{Ne} + {}^4\text{He}$ , ou  $\rightarrow {}^{23}\text{Na} + \text{p}$ , ou  $\rightarrow {}^{23}\text{Mg} + \text{n}$ , ou  $\rightarrow {}^{24}\text{Mg} + \gamma$
- Puis combustion du néon, de l'oxygène et du silicium (équilibre statistique nucléaire  $A + \alpha \leftrightarrow B + \gamma$ ) => formation d'un **coeur de fer**



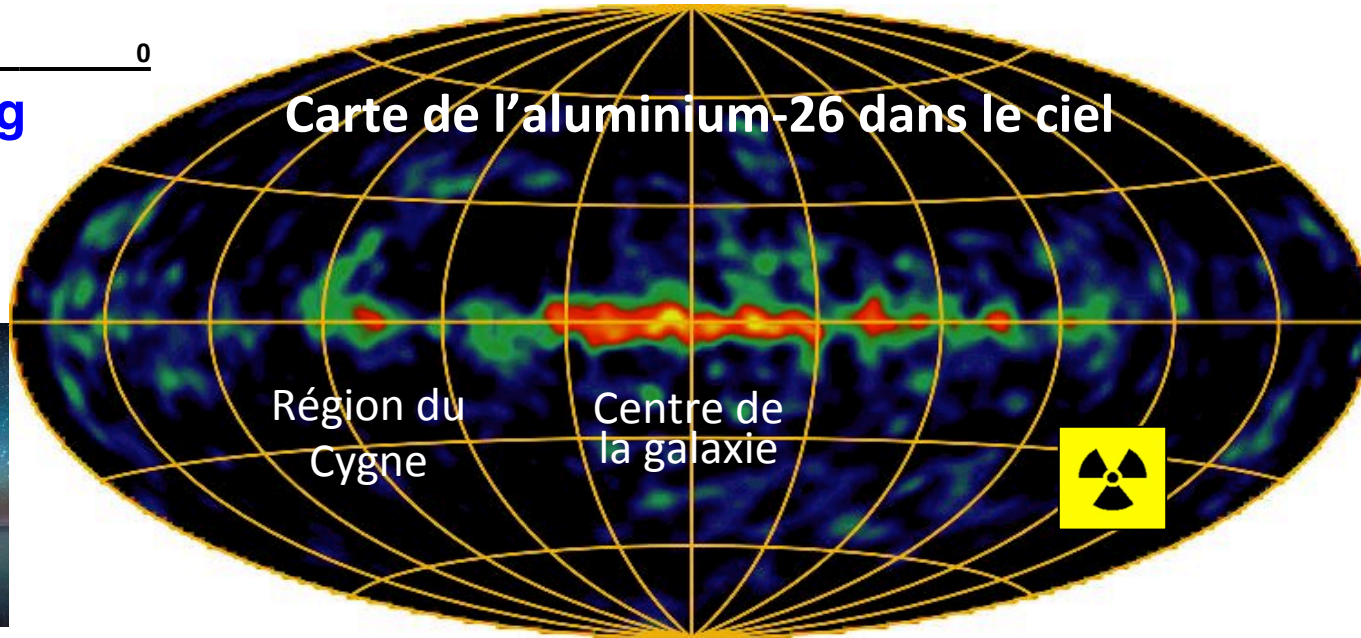
Distribution spatiale du  $^{44}\text{Ti}$  synthétisé **pendant l'explosion** (astronomie gamma) => mécanisme de l'explosion (importance d'instabilités convectives; Grefenstette et al. 2017)

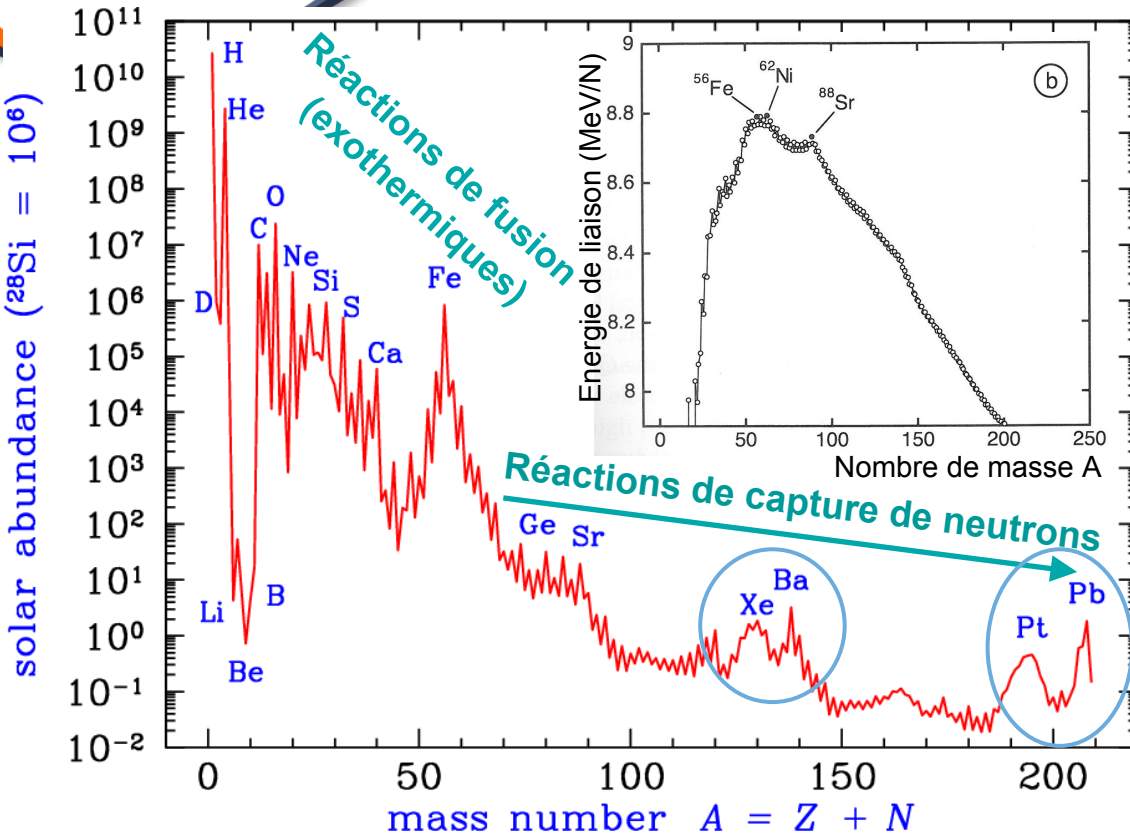
- Effondrement du cœur de fer quand il atteint la **masse de Chandrasekhar** ( $M_{\text{Ch}} \sim 1,4 M_{\odot}$ ; prix Nobel 1983), la pression de dégénérescence des électrons n'étant plus suffisante pour contrebalancer sa propre gravité
- Rebond quand la densité centrale du cœur atteint celle du noyau atomique ( $\sim 2,3 \times 10^{17} \text{ kg/m}^3$ ) => explosion en **supernova**
- **Mécanisme détaillé de l'explosion ?** Rôle du champ magnétique, des neutrinos... ?

- Observations par satellite de **radio-isotopes émetteurs  $\gamma$**
- ⇒ **Nucléosynthèse en cours dans l'Univers**
- ⇒ Par exemple,  $^{26}\text{Al}$  => en moyenne, **une étoile explose tous les 50 ans dans la Voie lactée**



Carte de l'aluminium-26 dans le ciel

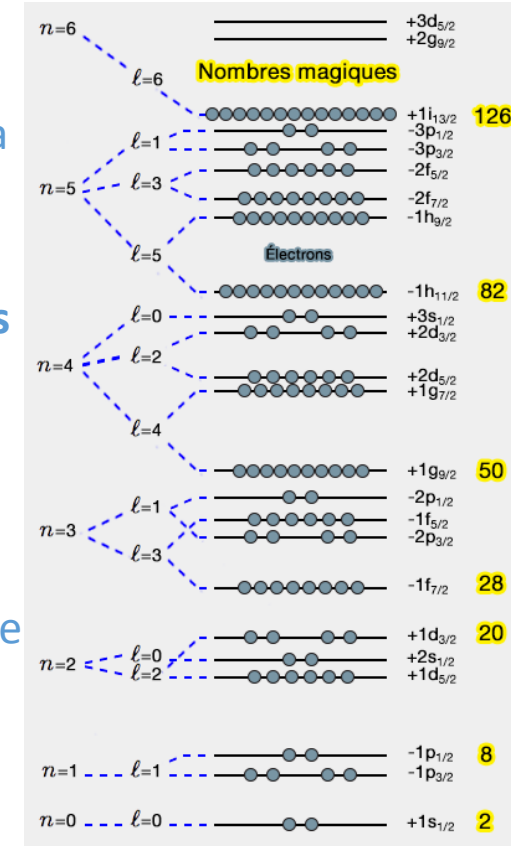




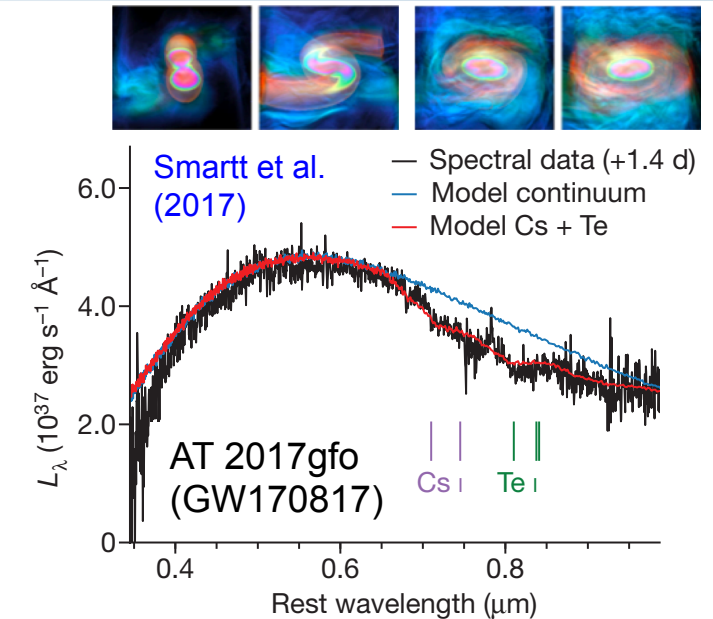
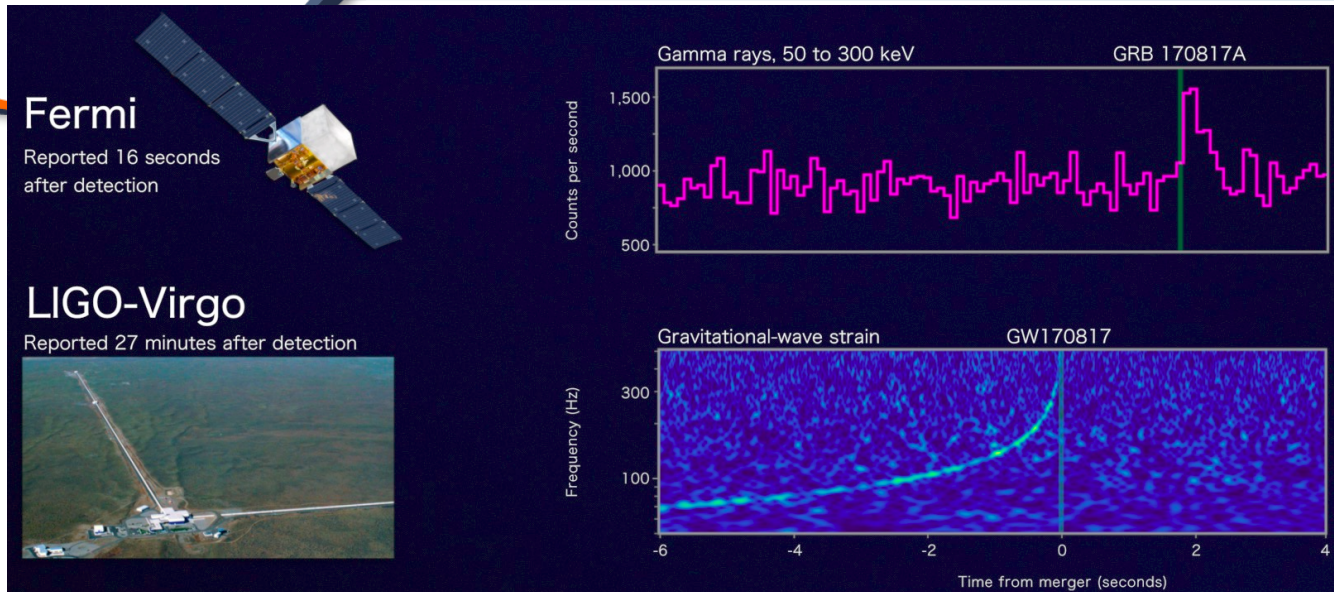
Les pics d'abondance au-delà du Fer correspondent à des fermetures de couche neutron : **nombre magique**

**Infiniment petit (mécanique quantique) ↔ infiniment grand (abondances solaires)**

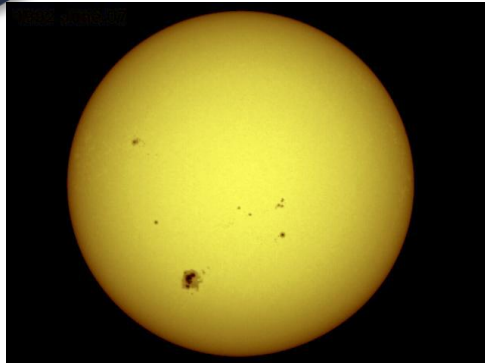
Double pics ⇒ 2 processus de capture de neutrons



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



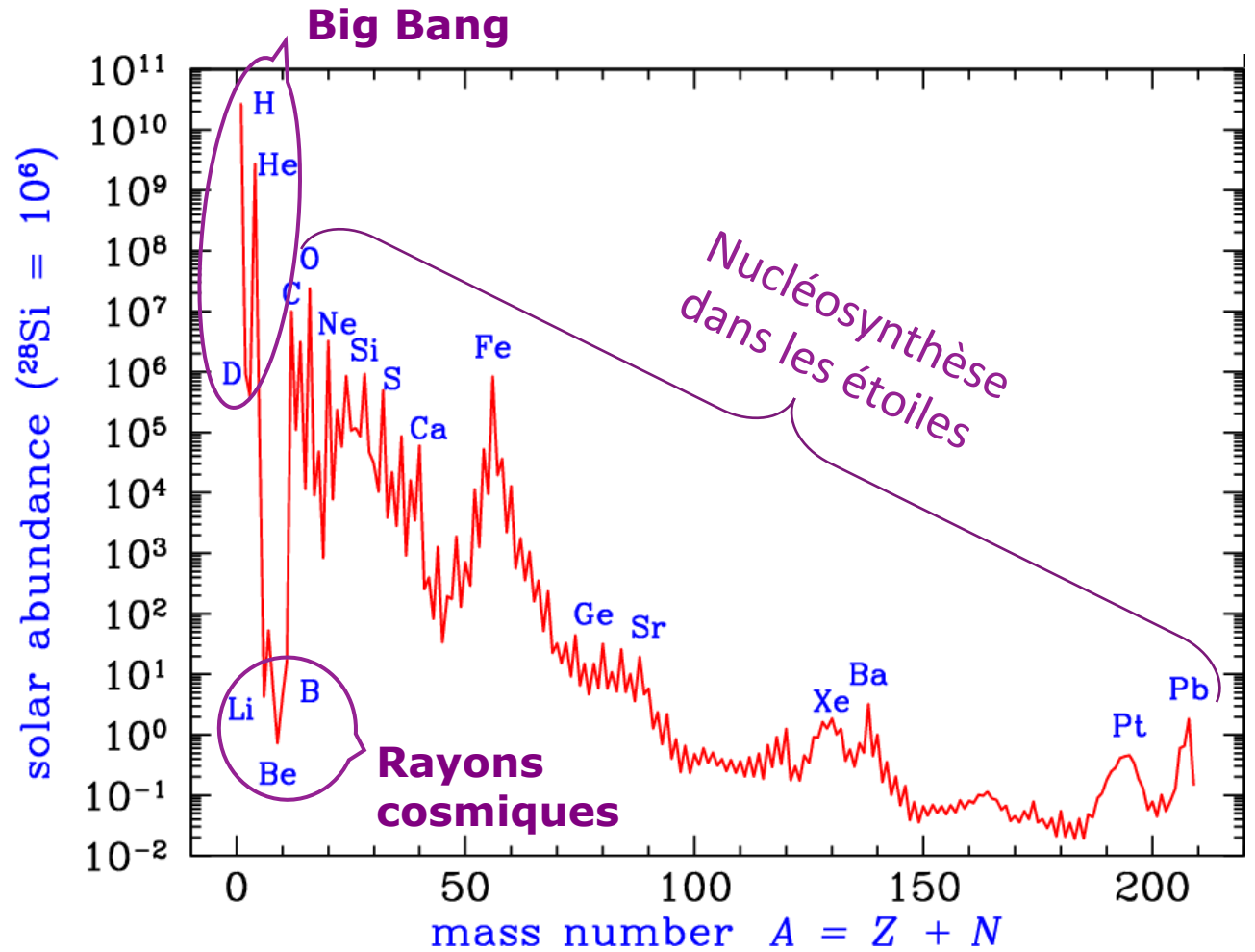
- (i) Nucléosynthèse dans les supernovas à effondrement de coeur **et/ou** (ii) **décompression de matière lors de la fusion de 2 étoiles à neutrons** (ou d'une étoile à neutrons et d'un trou noir)
- **17 août 2017** : détection de la fusion de deux étoiles à neutrons sous la forme **d'ondes gravitationnelles** (GW170817; LIGO & Virgo) et de lumière : sursaut gamma (missions *Fermi* & *INTEGRAL*) et évènement transitoire en optique/proche infrarouge => **kilonova** alimentée par la désintégration radioactive de noyaux **du processus r** (raies d'absorption en optique/PIR)



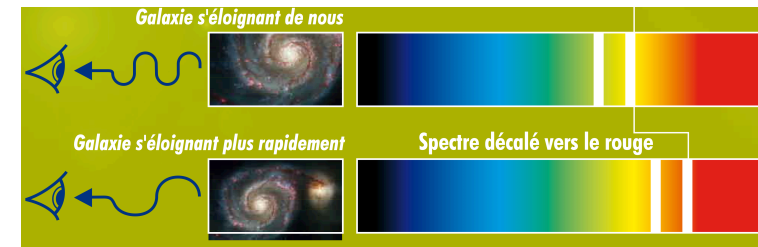
La photosphère solaire



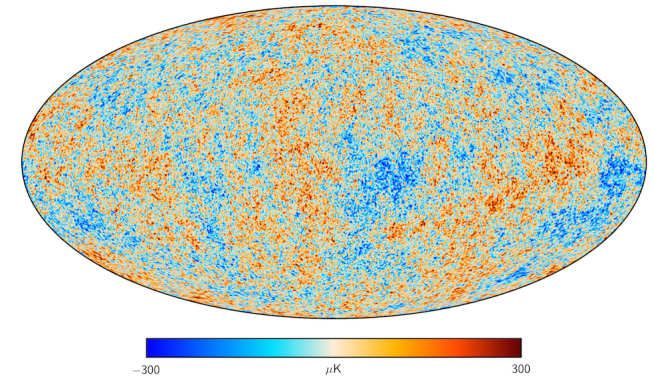
Fragment de la météorite d'Orgueil



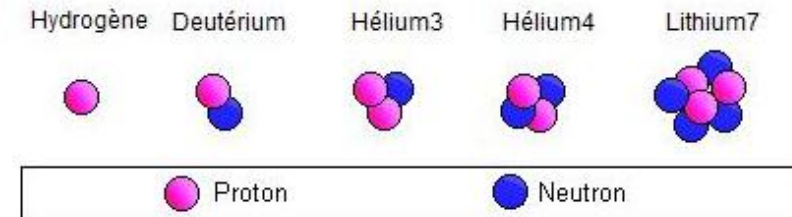
✓ **L'expansion de l'Univers** : les galaxies s'éloignent de nous d'autant plus vite qu'elles sont loin (Hubble 1920)



✓ **Le rayonnement fossile** dans le domaine des micro-ondes (Gamov 1948; Penzias & Wilson 1965, prix Nobel 1978) : rayonnement de corps noir cosmologique au moment de la recombinaison (380 000 ans après le Big Bang)

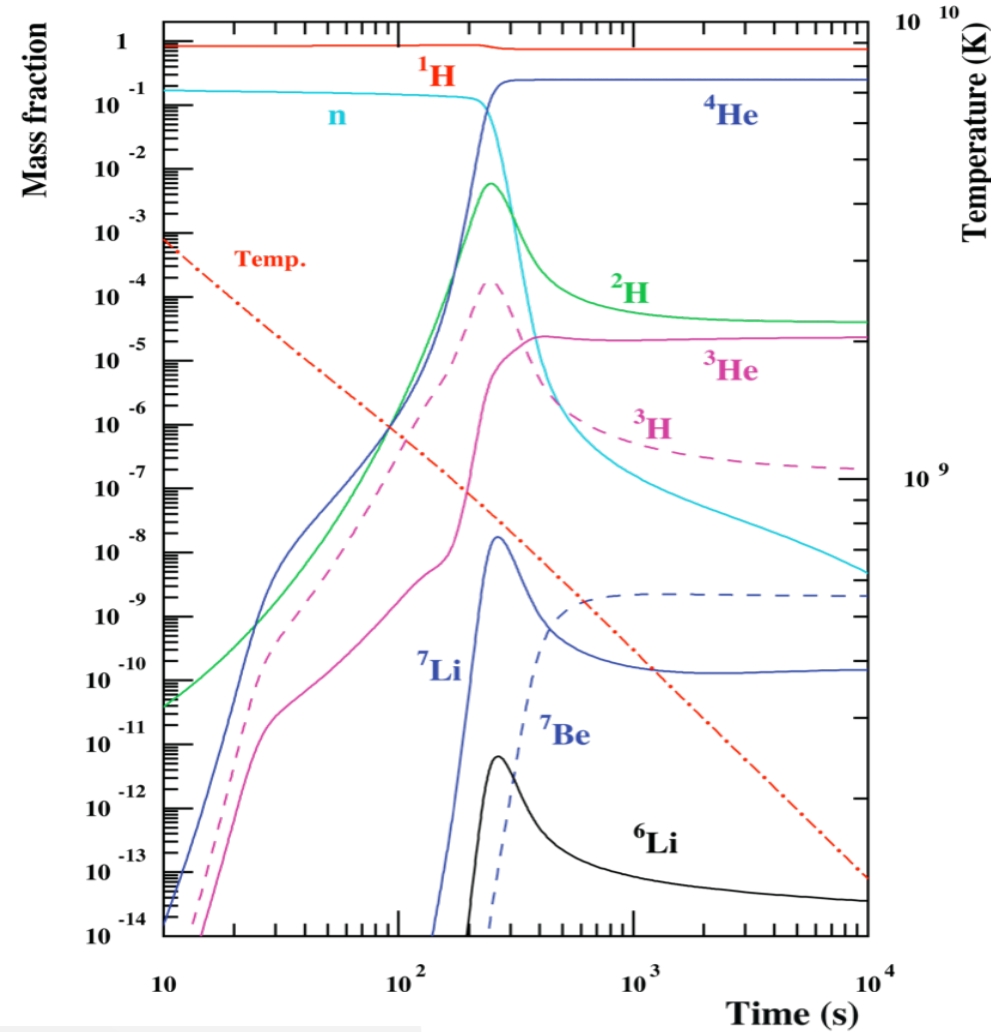
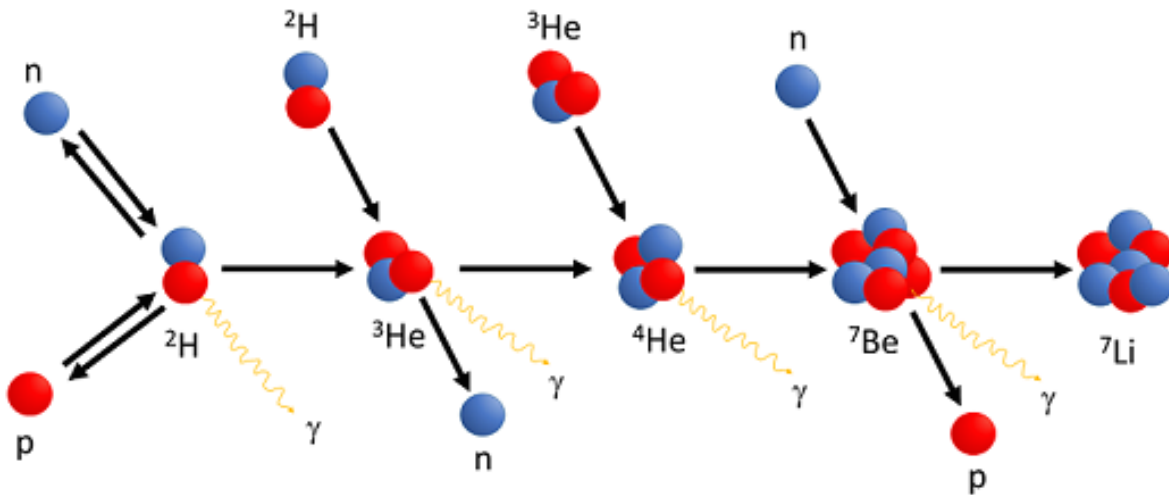


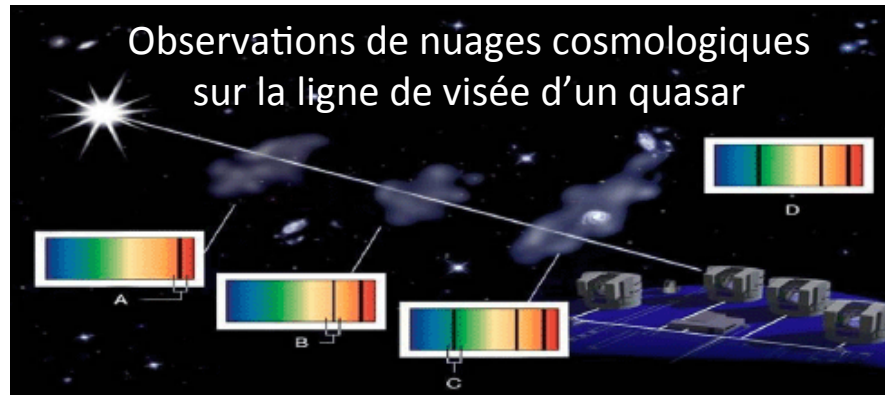
✓ **La nucléosynthèse primordiale** : réactions de **fusion thermonucléaire** dans l'Univers primordial quand il était dense et chaud



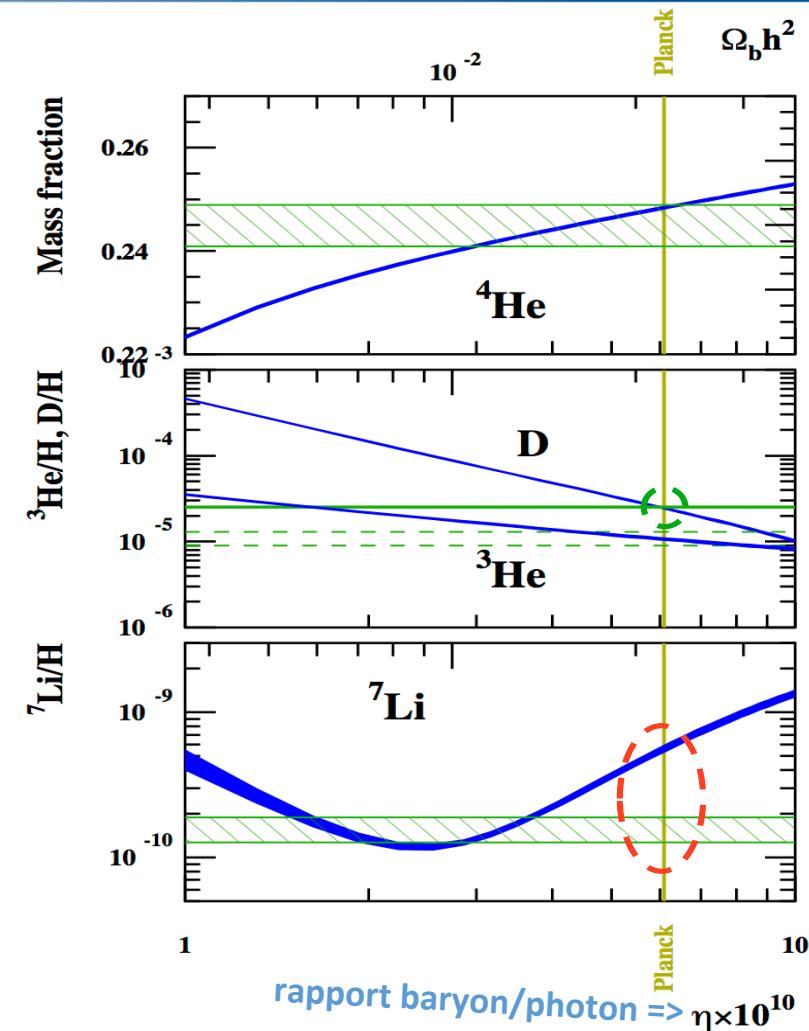


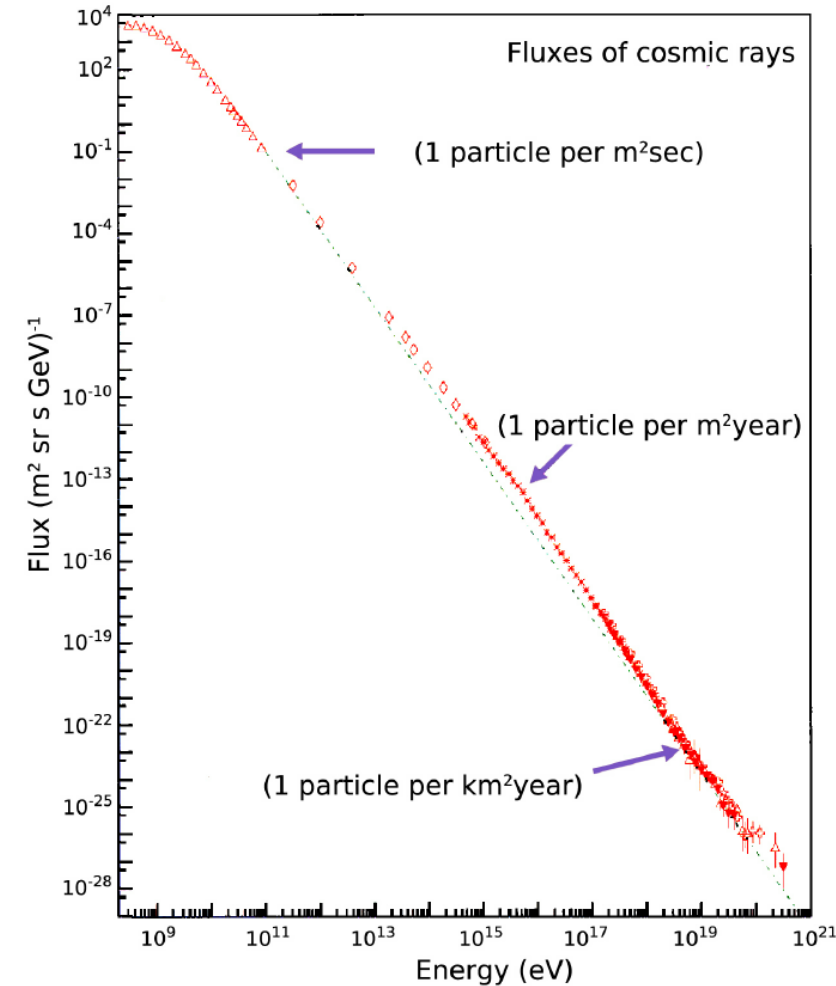
- Succession de **12 réactions nucléaires** principales au cours des **~ 20 premières minutes** de L'Univers
- Quand la température de l'Univers a chuté jusqu'à environ **1 milliards de degrés**



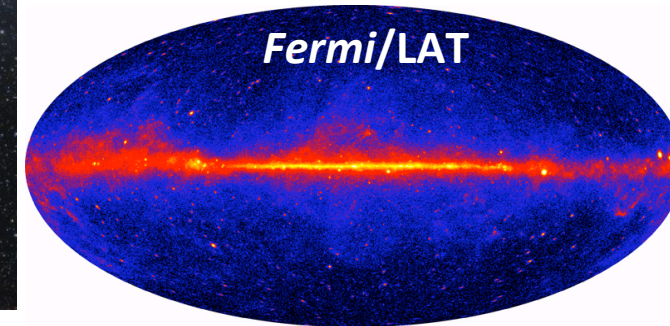
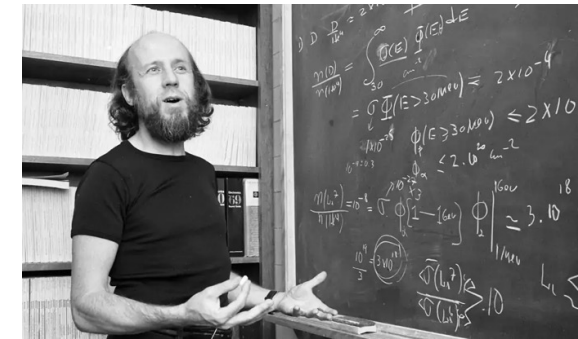
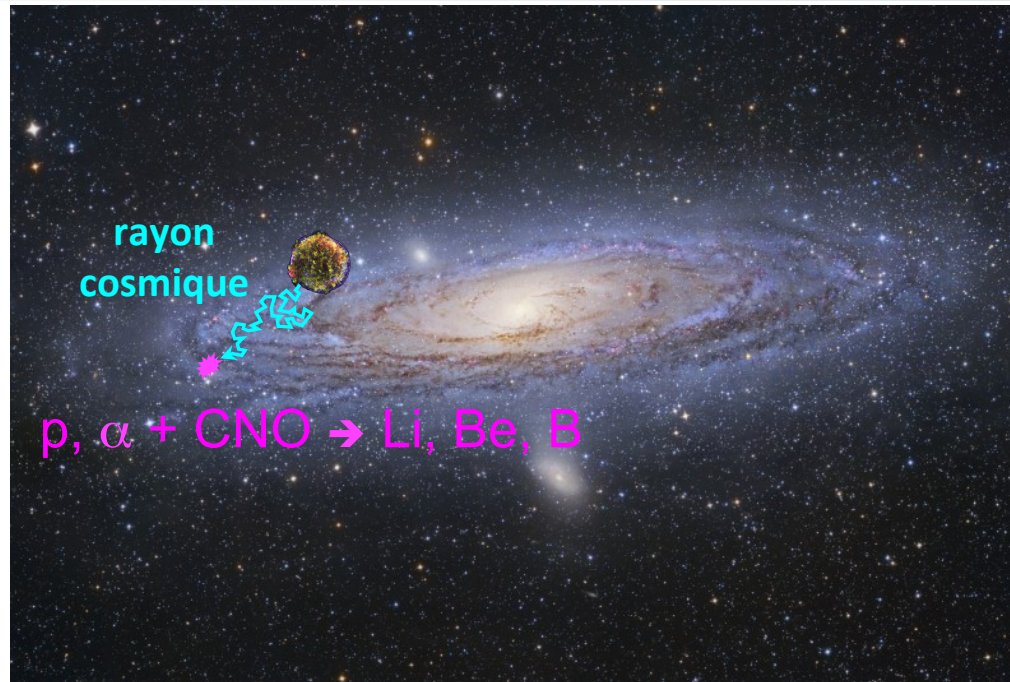


- Abondances primordiales mesurées dans des objets primitifs (nuages cosmologiques, vieilles étoiles...)
- **Très bon accord de la théorie** avec les observations sur 9 ordres de grandeur (cf. D mais aussi  ${}^7\text{Li}$ ), étant donnée la densité baryonique déduite du **fond diffus cosmologique**
- **Problème du  ${}^7\text{Li}$**  : déplétion à la surface de vieilles étoiles ou **nouvelle physique** ?





- **1785 C.-A. Coulomb**: décharge spontanée d'électroscopes
- **Début du 20e siècle**: l'effet est dû à des **radiations ionisantes**
- **1912 V. Hess** (prix Nobel en 1936): augmentation de l'ionisation avec l'altitude => **origine cosmique**
- **1928 J. Clay**: augmentation de l'ionisation avec la latitude géomagnétique => **particules chargées**



- Les éléments légers **lithium**, **béryllium** et **bore** sont plutôt détruits dans les étoiles
- Nucléosynthèse par **interaction nucléaire (spallation) des rayons cosmiques** avec les atomes du milieu interstellaire (e.g.  $p + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{11}\text{B} + 2p$ ) (Reeves, Fowler & Hoyle 1970)
- **Origine des rayons cosmiques ?** Astronomie gamma => interaction des rayons cosmiques

- La compréhension de l'origine des nucléides est **l'une des grandes avancées scientifiques du XX<sup>e</sup> siècle** (observations astronomiques, modélisations astrophysiques, mesures de sections efficaces de réactions nucléaires...)
- Mais de nouvelles observations et mesures d'abondance (astronomie gamma, analyse isotopique de matériaux extraterrestres...) posent de nouvelles questions :
  - **Mécanisme de l'explosion des étoiles massives en supernova ?**
  - **Site(s) astrophysique(s) du processus r ?**
  - **Problème du <sup>7</sup>Li cosmologique ?**
  - **Origine des rayons cosmiques ?**
  - ...

