XXVème Festival d'Astronomie de Fleurance, le 13 août 2015

Atelier « fil rouge » : Les réactions nucléaires dans le Soleil

Vincent Tatischeff (CSNSM, CNRS/Université Paris Sud)

Le soleil est un réacteur nucléaire naturel. Il tire son énergie de réactions de fusion nucléaire se produisant dans son noyau, la région de l'étoile qui s'étend du centre jusqu'à environ 20% de son rayon. Dans le cœur de ce réacteur, la température approche les 15 millions de kelvins et la masse volumique est d'environ $1,5 \times 10^5$ kg m^{-3} (environ 150 fois celle de l'eau sur Terre). Une fraction de l'énergie de masse libérée par les réactions nucléaires est convertie en énergie cinétique des produits de réaction, ce qui se traduit par une production de chaleur. Mais les neutrinos électroniques qui sont émis dans certaines réactions n'interagissent pratiquement pas avec la matière, de sorte qu'ils s'échappent librement de l'étoile. Certains peuvent atteindre la Terre.

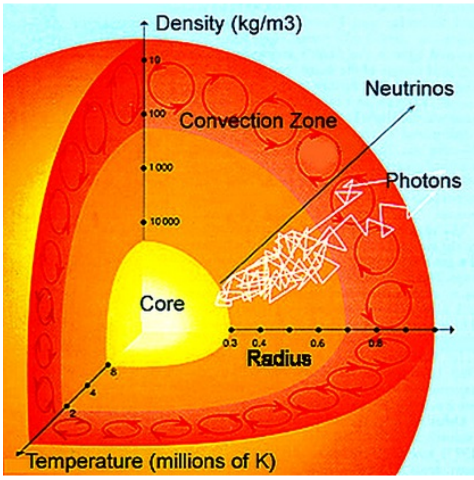


Schéma en coupe de la structure du soleil.

I- Le flux de neutrinos solaires sur Terre

Les principales réactions nucléaires qui se produisent dans le cœur du Soleil sont celles des trois premières « chaînes proton-proton » :

Chaîne proton-proton I (pp I)

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e \; (<E_\nu> = 0,26 \text{ MeV})$$
$$d + p \rightarrow {}^3He + \gamma$$
$${}^3He + {}^3He \rightarrow {}^4He + 2p$$

Chaîne proton-proton II (pp II)

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e \; (<E_\nu> = 0,26 \text{ MeV})$$
$$d + p \rightarrow {}^3He + \gamma$$
$${}^3He + {}^4He \rightarrow {}^7Be + \gamma$$
$${}^7Be + e^- \rightarrow {}^7Li + \nu_e \; (<E_\nu> = 0,86 \text{ MeV})$$
$${}^7Li + p \rightarrow {}^4He + {}^4He$$

Chaîne proton-proton III (pp III)

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e \ (<E_\nu> = 0{,}26 \text{ MeV})$$
$$d + p \rightarrow {}^3He + \gamma$$
$${}^3He + {}^4He \rightarrow {}^7Be + \gamma$$
$${}^7Be + p \rightarrow {}^8B + \gamma$$
$${}^8B \rightarrow {}^8Be + e^+ + \nu_e \ (<E_\nu> = 6{,}80 \text{ MeV})$$
$${}^8Be \rightarrow {}^4He + {}^4He$$

(p : proton ; d : noyau de deutérium (numéro atomique Z = 1, nombre de neutrons N = 1) ; ^{3}He : noyau d'hélium-3 (Z = 2, N = 1); ^{4}He : noyau d'hélium-4 (Z = 2, N = 2) ou particule alpha ; ^{7}Li : noyau de lithium-7 (Z = 3, N= 4) ; ^{7}Be : noyau de béryllium-7 (Z = 4, N = 3) ; ^{8}Be : noyau de béryllium-8 (Z = 4, N = 4) ; ^{8}B : noyau de bore-8 (Z = 5, N = 3) ; e^+ : positon ; ν_e : neutrino électronique ; γ : photon gamma).

Les probabilités respectives de ces chaînes de réactions dans le Soleil sont de 84,92% pour la chaîne pp I, 15,06% pour la chaîne pp II et 0,02% pour la chaîne pp III.

Pour les réactions produisant des neutrinos électroniques, nous avons indiqué l'énergie cinétique moyenne des neutrinos émis, $<E_\nu>$, en mégaélectronvolt (1 MeV = $1{,}602 \times 10^{-13}$ J).

1) Montrer que résultat net de ces chaînes de réactions est de transformer des noyaux d'hydrogène en noyau d'hélium-4 selon le processus suivant : $4p + 2e^- \rightarrow {}^4He + 2\nu_e + \gamma$ (ici « γ » représente l'émission de plusieurs photons gamma). On tiendra compte du fait que les positons produits par la réaction p + p ou par la désintégration β^+ du ^{8}B (de période radioactive $T_{1/2}$ = 770 ms) s'annihilent rapidement avec des électrons du plasma solaire en produisant deux photons gamma ($e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$).

Chaine pp I : $4p \rightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu_e + 2\gamma_{dp}$
Chaine pp II : $4p + e^- \rightarrow {}^4He + e^+ + 2\nu_e + \gamma_{dp} + \gamma_{34}$
Chaine pp III : $4p \rightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu_e + \gamma_{dp} + \gamma_{34} + \gamma_{7Bep}$

Ici, γ_{dp} représente le photon gamma produit par la réaction d + p, γ_{34} celui produit par la réaction ^{3}He + ^{4}He, et γ_{7Bep} celui de la réaction ^{7}Be + p.

Après prise en compte de l'annihilation des positons : $4p + 2e^- \rightarrow {}^4He + 2\nu_e + \gamma$

2) Calculer l'énergie de masse libérée par la transmutation de 4 protons en une particule alpha dans le cœur du Soleil. On négligera la masse du neutrino électronique.

Données complémentaires : Masse du proton $m_p = 1{,}672622 \times 10^{-27}$ kg
Masse de la particule alpha $m_\alpha = 6{,}644656 \times 10^{-27}$ kg
Masse de l'électron (ou du positon) $m_e = 9{,}109 \times 10^{-31}$ kg
Vitesse de la lumière dans le vide $c = 2{,}998 \times 10^8$ m s^{-1}

$Q = (\Delta m)c^2 = (4m_p + 2m_e - m_\alpha)c^2 = \underline{4{,}283 \times 10^{-12} \text{ J}}$

3) Calculer l'énergie *cédée* au plasma stellaire au cours de la transformation de 4 protons en une particule alpha, en tenant compte du fait que les neutrinos électroniques s'échappent (pratiquement) librement de l'étoile (pour rappel 1 MeV = $1{,}602 \times 10^{-13}$ J).

$Q_\nu = f_{pp\,I} \times (Q - 2<E_\nu>_{pp}) + f_{pp\,II} \times (Q - <E_\nu>_{pp} - <E_\nu>_{7Be}) + f_{pp\,III} \times (Q - <E_\nu>_{pp} - <E_\nu>_{8B})$

$Q_\nu = \underline{4{,}185 \times 10^{-12}\ \mathrm{J}}$,

étant données les probabilités des chaines pp $f_{pp\,I} = 0{,}8492$, $f_{pp\,II} = 0{,}1506$, $f_{pp\,III} = 0{,}0002$, et les énergies cinétiques moyennes des neutrinos émis $<E_\nu>_{pp} = 4{,}165 \times 10^{-14}$ J, $<E_\nu>_{7Be} = 1{,}378 \times 10^{-13}$ J et $<E_\nu>_{8B} = 1{,}089 \times 10^{-12}$ J.

4) La luminosité du Soleil s'élève à $3{,}846 \times 10^{26}$ W (1 Watt = 1 Joule par seconde). Sachant que l'énergie rayonnée par l'étoile provient initialement des réactions de fusion thermonucléaire dans le cœur, calculer le nombre de particules alpha produites chaque seconde dans l'étoile.

$P_\alpha = L_\odot / Q_\nu = \underline{9{,}190 \times 10^{37}\ \alpha\ \mathrm{s}^{-1}}$

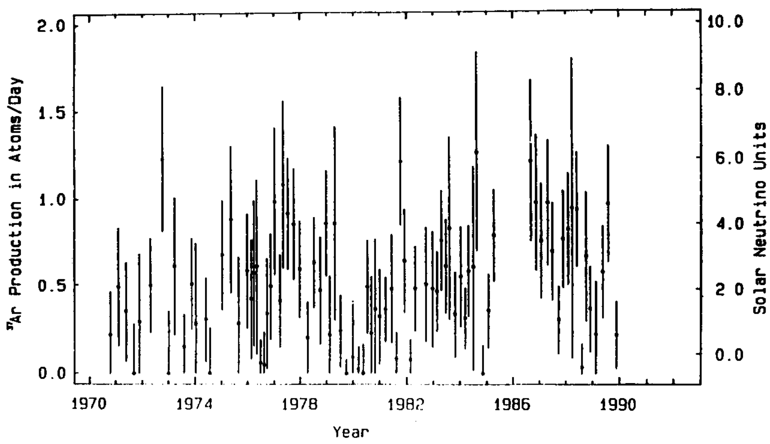
5) En déduire le flux théorique de neutrinos électroniques solaires arrivant sur Terre (i.e. le nombre de particules par mètre-carré et par seconde), la distance Terre-Soleil (i.e. l'unité astronomique) étant de $1{,}496 \times 10^{11}$ m.

$\Phi_\nu = 2P_\alpha / (4\,\pi\,\mathrm{UA}^2) = \underline{6{,}535 \times 10^{14}\ \nu\ \mathrm{m}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}}$ (soit environ 65 milliards de neutrinos par cm^2 et par seconde)

6) Dans les années 1960, Raymond Davis (prix Nobel 2002) et quelques collaborateurs ont monté une expérience visant à détecter les neutrinos solaires, dans la mine d'or de Homestake aux Etats-Unis. Ils ont placé à une profondeur de 1480 m sous terre un réservoir contenant 615 tonnes de tétrachloroéthylène (C_2Cl_4), un détergent commun surtout utilisé pour le nettoyage à sec de tissus. Leur idée était d'utiliser la réaction $\nu_e + {}^{37}\mathrm{Cl} \rightarrow {}^{37}\mathrm{Ar} + e^-$ (la réaction inverse de celle de désintégration radioactive par capture électronique de l'argon-37, $T_{1/2} = 35$ d) pour mesurer le flux de neutrinos solaires provenant de la désintégration du ^{8}B (chaîne pp III). Cette expérience était plus sensible aux neutrinos énergétiques du ^{8}B qu'aux autres neutrinos solaires, parce que la section efficace[1] de la réaction sur le chlore-37 augmente rapidement avec l'énergie des neutrinos ; elle vaut $1{,}1 \times 10^{-46}$ m^2 pour la capture des neutrinos du ^{8}B (par rapport à $2{,}9 \times 10^{-50}$ cm^2 pour l'absorption des neutrinos de désintégration du ^{7}Be produits par la chaîne pp II).

---

[1] En physique nucléaire, la section efficace est une grandeur homogène à une surface, qui caractérise la probabilité d'interaction d'une particule incidente avec une particule cible pour une réaction donnée. La relation entre le taux de réaction T (i.e. le nombre de réactions par seconde) et la section efficace σ est $T = \sigma\,\Phi_{inc}\,N_{cible}$, où Φ_{inc} est le flux de particules incidentes et N_{cible} le nombre de particules cibles dans le volume irradié.



Taux de production de ^{37}Ar mesuré dans l'expérience Homestake de 1970.8 à 1990. L'Unité de Neutrinos Solaires (SNU) sur l'axe de droite correspond à 10^{-36} capture de neutrino par seconde et par atome de ^{37}Cl. Tiré de R. Davis 1994, Progress in Particle and Nuclear Physics, vol. 32, p. 13-32.

Le taux moyen de production d'argon-37 mesuré dans l'expérience Homestake de 1970 à 1993 est de 0,437 ± 0,042 atome par jour (voir figure ci-dessus). Comparer ce résultat au taux attendu d'après le flux théorique de neutrinos solaires du ^{8}B. Que peut-on en déduire ?

<u>Données complémentaires</u> : Masse d'une molécule de C_2Cl_4 : $m(C_2Cl_4) = 2{,}754 \times 10^{-25}$ kg
Abondance naturelle du ^{37}Cl : 24,23%

Flux mesuré de neutrinos solaires du ^{8}B :

$$\Phi_\nu(^{8}\mathrm{B}) = T_\nu / [\sigma_\nu N(^{37}\mathrm{Cl})] = \underline{(2{,}13 \pm 0{,}21) \times 10^{10}\ \nu\ \mathrm{m}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}},$$

où $T_\nu = (5{,}06 \pm 0{,}49) \times 10^{-6}$ s^{-1} est le taux de réactions des neutrinos avec le ^{37}Cl, $\sigma_\nu = 1{,}1 \times 10^{-46}$ m^2 la section efficace de la réaction, et $N(^{37}\mathrm{Cl}) = 4\ M_{\mathrm{cible}}\ A(^{37}\mathrm{Cl}) / m(C_2Cl_4) = 2{,}164 \times 10^{30}$ le nombre de noyaux cibles ($M_{\mathrm{cible}} = 6{,}15 \times 10^{5}$ kg et $A(^{37}\mathrm{Cl}) = 0{,}2423$).

En comparaison, le flux théorique de neutrinos solaires du ^{8}B est :

$$\Phi_\nu(^{8}\mathrm{B}) = \Phi_\nu\, f_{\mathrm{pp\ III}} = \underline{13{,}07 \times 10^{10}\ \nu\ \mathrm{m}^{-2}\ \mathrm{s}^{-1}}.$$

Notons que les modèles détaillés du soleil prédisent un flux de neutrinos du ^{8}B sensiblement plus faible, de l'ordre de 50 à 60 milliards de neutrinos par m^{-2} et par seconde (voir par exemple Bahcall et al. 2005, Astrophysical Journal Letters, volume 621, page L85–L88).

Le déficit de neutrinos électroniques mesuré dans l'expérience Homestake est dû au phénomène **d'oscillation de neutrinos** entre le cœur du soleil et la Terre, certains neutrinos électroniques se changeant en neutrinos muoniques ou tauiques (changement de saveur), qui ne sont pas détectés dans cette expérience.

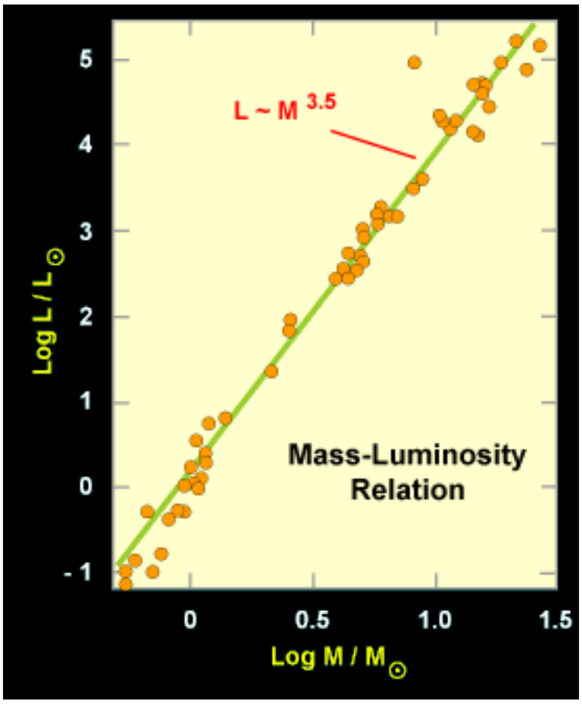
II- Le temps de vie du Soleil (et de Proxima Centauri et Rigel)

1) Au cours de la phase de combustion thermonucléaire de l'hydrogène, environ 10% de la masse d'une étoile comme le Soleil se transforme d'hydrogène en hélium. En déduire la durée de cette phase pour le Soleil, dont la masse est $M_\odot = 1{,}989 \times 10^{30}$ kg.

$t_\odot = f\, M_\odot / (4\, m_p\, P_\alpha) = f\, M_\odot\, Q_\nu / (4\, m_p\, L_\odot)$ = 10 milliards d'années,

où $f = 0{,}1$ est la fraction de masse du Soleil se transformant d'hydrogène en hélium.

2) La phase de combustion de l'hydrogène se déroule pendant environ 80% de la vie d'une étoile (avant que, selon sa masse, elle explose en supernova ou devienne une naine blanche). On observe pour les étoiles à ce stade de leur existence (appelé la séquence principale) une forte corrélation entre leur masse et leur luminosité ($L \propto M^{3,5}$, voir la figure ci-dessous).



En déduire une loi empirique donnant le temps de vie des étoiles sur la séquence principale en fonction de leur masse. Combien de temps environ devrait encore vivre notre proche voisine stellaire Proxima du Centaure, dont la masse est de 0,12 M_{sol} (on pourra négliger en bonne approximation son âge actuel de 4 à 5 milliards d'années) ? Et Rigel, la supergéante bleue d'environ 21 M_{sol} de la constellation d'Orion, sachant qu'elle n'est plus sur la séquence principale, quand est-elle née approximativement ?

$t \propto M / L \propto M^{-2,5} \Rightarrow t = 10^{10}\, (M / M_\odot)^{-2,5}$ ans

Durée de vie de Proxima du Centaure : 2000 milliards d'années d'après la loi empirique (en réalité plutôt 4000 milliards d'années)
Âge de Rigel : 5 millions d'années d'après la loi ci-dessus (en réalité plutôt 8 ± 1 millions d'années)