

# Astroparticule

## 2/3

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE  
CEA-Saclay

# Astronomie multi-messagers

## Photons

Propagation en **ligne droite**  
mais proviennent surtout  
des **milieus ténus**



## Rayons cosmiques (p)

Propagation **chaotique** (B)  
mais **ultra haute**  
**énergie**

## Neutrons

$\tau \sim 15 \text{ mn}$   
 $d_{\text{max}} = 10 \text{ kpc}$  à  $E = 10^{18} \text{ eV}$

## Neutrinos

Propagation quasi infinie  
Propagation en ligne droite  
**MESSAGER IDEAL**  
milieux denses  
lointains

# Astronomie multi-messagers

## Photons

Propagation en **ligne droite**  
mais proviennent surtout  
des **milieux ténus**



libre parcours moyen  
d'un  $v = \infty$

2 s pour sortir

libre parcours moyen  
d'un photon = 1 cm

100 000 ans pour sortir

## Neutrinos

Propagation quasi infinie  
Propagation en ligne droite  
**MESSAGER IDEAL**  
milieux denses  
lointains

# Astroparticule

1) Approche **multi-messenger**  
**Rayons cosmiques**

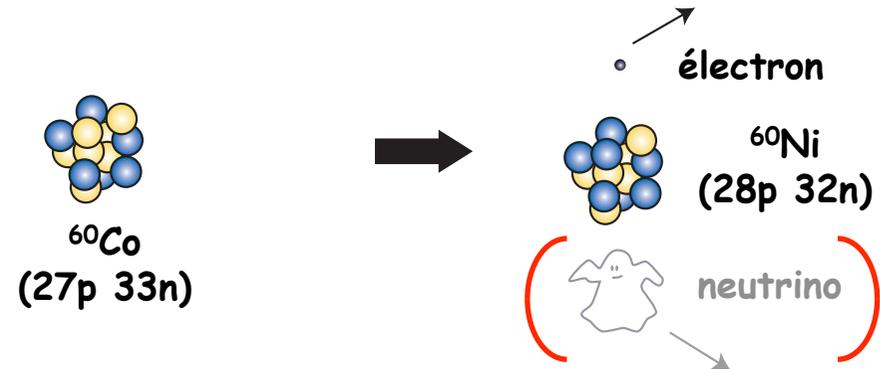


2) **Neutrinos (cosmiques ou pas)**  
- Saga solaire  
- Des neutrinos dans l'atmosphère  
- Neutrinos et supernovae

3) Approche **multi-messenger**  
**Astronomie neutrino**  
**Ondes gravitationnelles**  
*ou l'Univers violent...*

# Rappel historique

- **Mystère de la désintégration  $\beta$  :**



énergie variable de  $e^-$ : non-conservation de  $E$ ? autre particule?  
(1930)

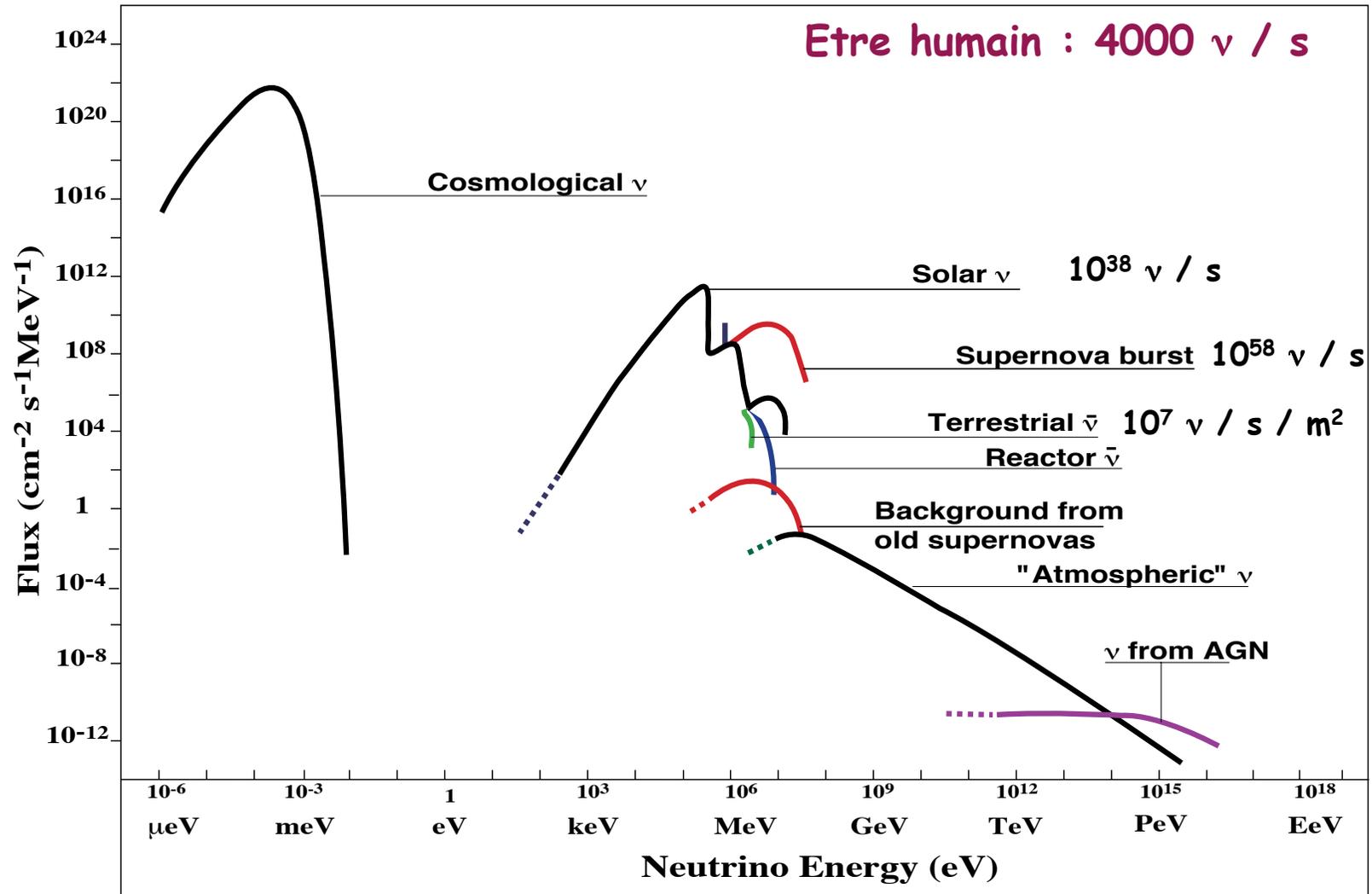
Bohr

Pauli (« n »)

- **Découverte du neutron :**  $^4_2\text{He} + ^9_4\text{Be} \rightarrow ^{12}_6\text{C} + n$  Chadwick (Nobel 1935)  
(1932)

- **Baptême du « neutrino » de Pauli :** Interprétation désintégration  $\beta$  par Fermi  
(1933)

# Sources de neutrinos



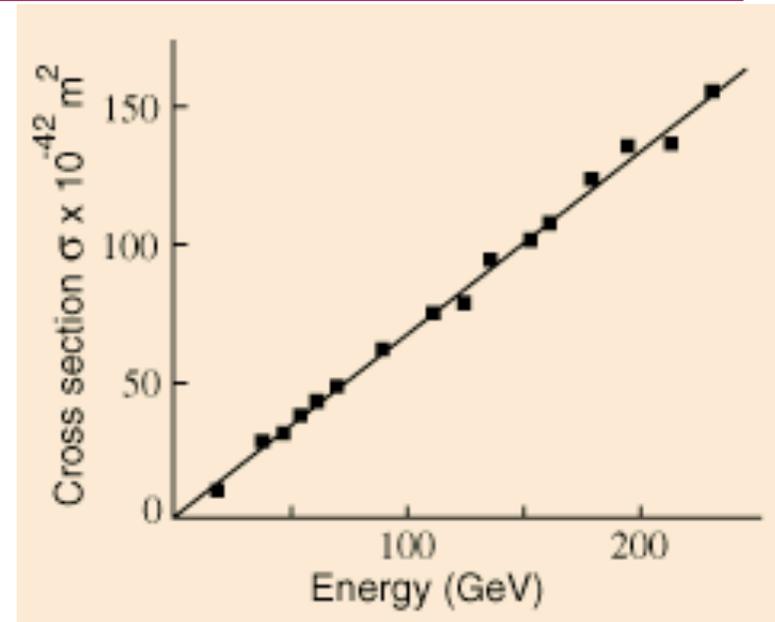
# Section efficace d'interaction

$$\sigma = 0.7 \cdot 10^{-38} \times E \text{ (GeV) cm}^2$$

Nb d'interaction par unité de longueur :

$$N = \sigma \rho / u$$

$\swarrow$  masse d'un nucléon  
 $\searrow$  densité massique



Libre parcours moyen  $d = 1/N$

$$d_{\text{eau}} = \frac{1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}}{(10^{-47} \text{ m}^2)(1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})} = 2 \cdot 10^{17} \text{ m}$$

$$d_{\text{plomb}} = \frac{1.66 \times 10^{-27} \text{ kg}}{(10^{-47} \text{ m}^2)(11400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3})} = 2 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

1 année-lumière !  $\leftarrow$

pour  $E$  ( $\beta$  decay)  $\sim 1 \text{ MeV}$   $\sigma \sim 10^{-47} \text{ m}^2$

# Rappel historique

- Très faible interaction : source intense + grand détecteur (1956)

réacteur nucléaire  
 $10^{13} \bar{\nu} / \text{s} / \text{cm}^2$

cuve 200l d'eau + cadmium  
 $\bar{\nu} + \text{p} \rightarrow \text{n} + \text{e}^+$



( $\Delta t = 5 \mu\text{s}$ )

$\sim 3 \nu / \text{heure}$

« Détection du neutrino libre: une confirmation »  
Cowan et Reines (Nobel 1995)



# Saga solari

# Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

ou encore : Quel est l'âge de la Terre ?

- 1859: géologues et biologistes (dont Darwin)



$t_{\text{Terre}}$ : au moins 300 millions d'années

- 1850: refroidissement de la Terre par transfert radiatif (Lord Kelvin)



$t_{\text{Terre}} \sim 100\,000$  ans

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Terre}} \sim 4.6$  milliards d'années

# Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

ou encore : Quel est l'âge de la Terre ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Terre}} \sim 4.6$  milliards d'années

- Source d'énergie du Soleil: **Chimique ?**

Sur Terre, chaleur reçue  $F \sim 1400 \text{ W/m}^2$   
 $d_{\text{Terre-Soleil}} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$

Luminosité  $L = 4\pi d^2 F$   
 $L \sim 3 \cdot 10^{26} \text{ W}$

**durée de vie:**  $t_{\text{Soleil}} \sim N_p \times E_p / L \sim 10^{57} \times 1 \text{ eV} / 3 \cdot 10^{26} \text{ W}$



$\sim 10 \text{ 000 ans !}$

# Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

ou encore : Quel est l'âge de la Terre ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs

→  $t_{\text{Terre}} \sim 4.6$  milliards d'années

- Source d'énergie du Soleil: **Gravitationnelle ?**

$$\text{E pot. } U = - \int_0^R \frac{GM(r)dm}{r} = - \frac{3GM^2}{5R}$$

$$\text{Luminosité } L = 4\pi d^2 F \\ L \sim 3.10^{26} \text{ W}$$

**durée de vie:**  $t_{\text{Soleil}} \sim U / L \sim (7.10^{-11})(2.10^{30})^2 / (7.10^8) / 3.10^{26} \text{ W}$

→  $\sim 10$  millions d'années

# Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

ou encore : Quel est l'âge de la Terre ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Terre}} \sim 4.6$  milliards d'années

- Source d'énergie du Soleil: Nucléaire ?

En. de liaison par nucléon  $B \sim 1\text{MeV}$

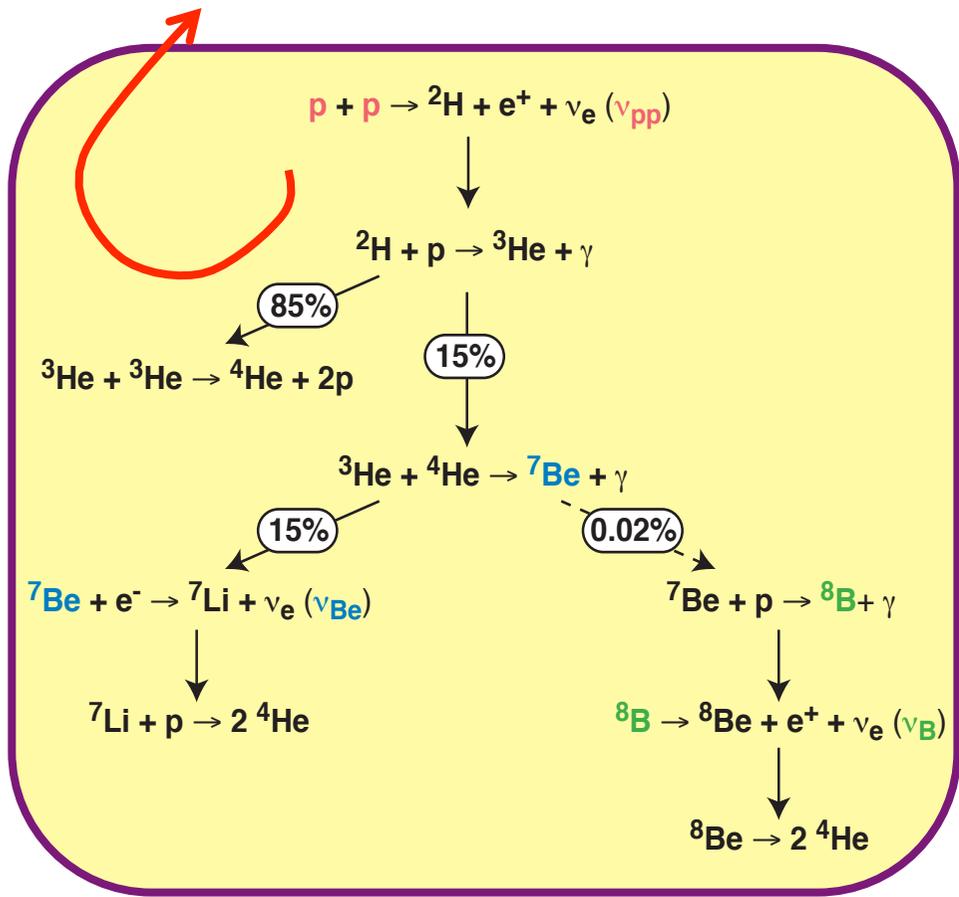
Luminosité  $L = 4\pi d^2 F$   
 $L \sim 3.10^{26}\text{W}$

durée de vie:  $t_{\text{Soleil}} \sim N_p \times B / L \sim 10^{57} \times 1\text{MeV} / 3.10^{26}\text{W}$

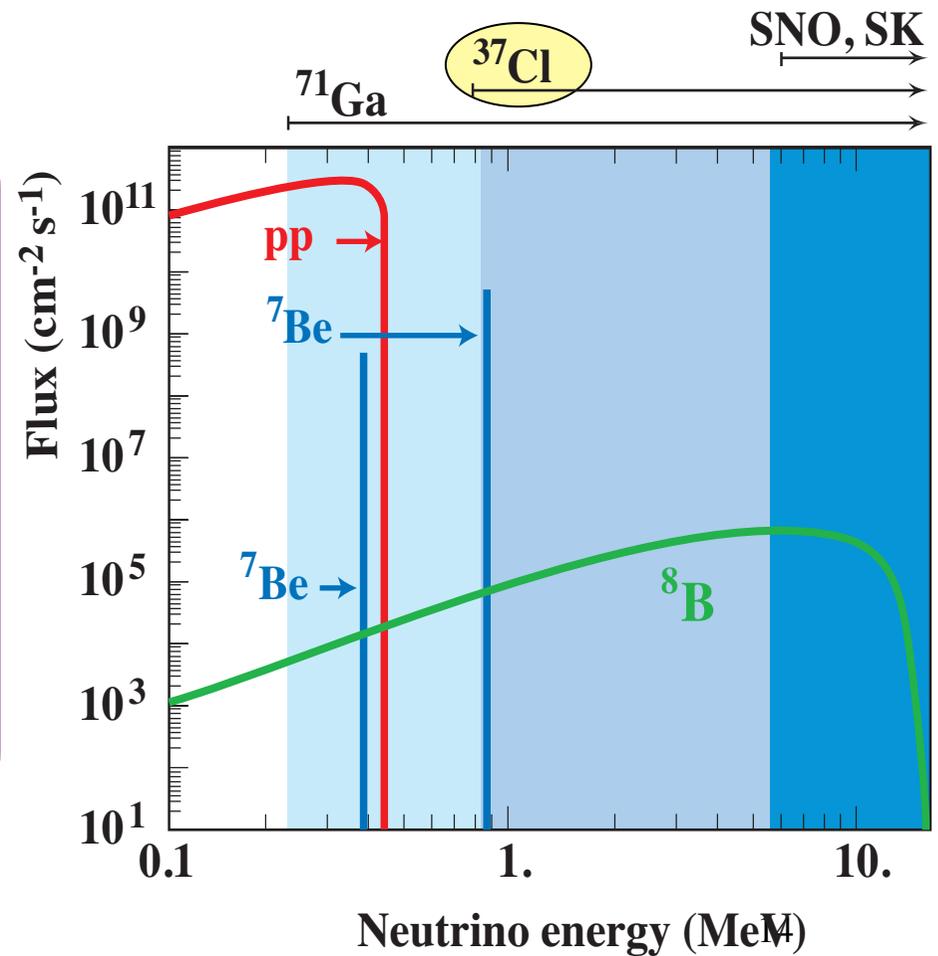


$\sim 10$  milliards d'années

# Neutrinos solaires



1960: Bahcall

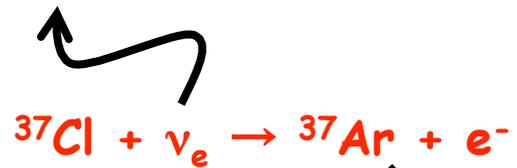


# Neutrinos solaires

Homestake  
Ray Davis

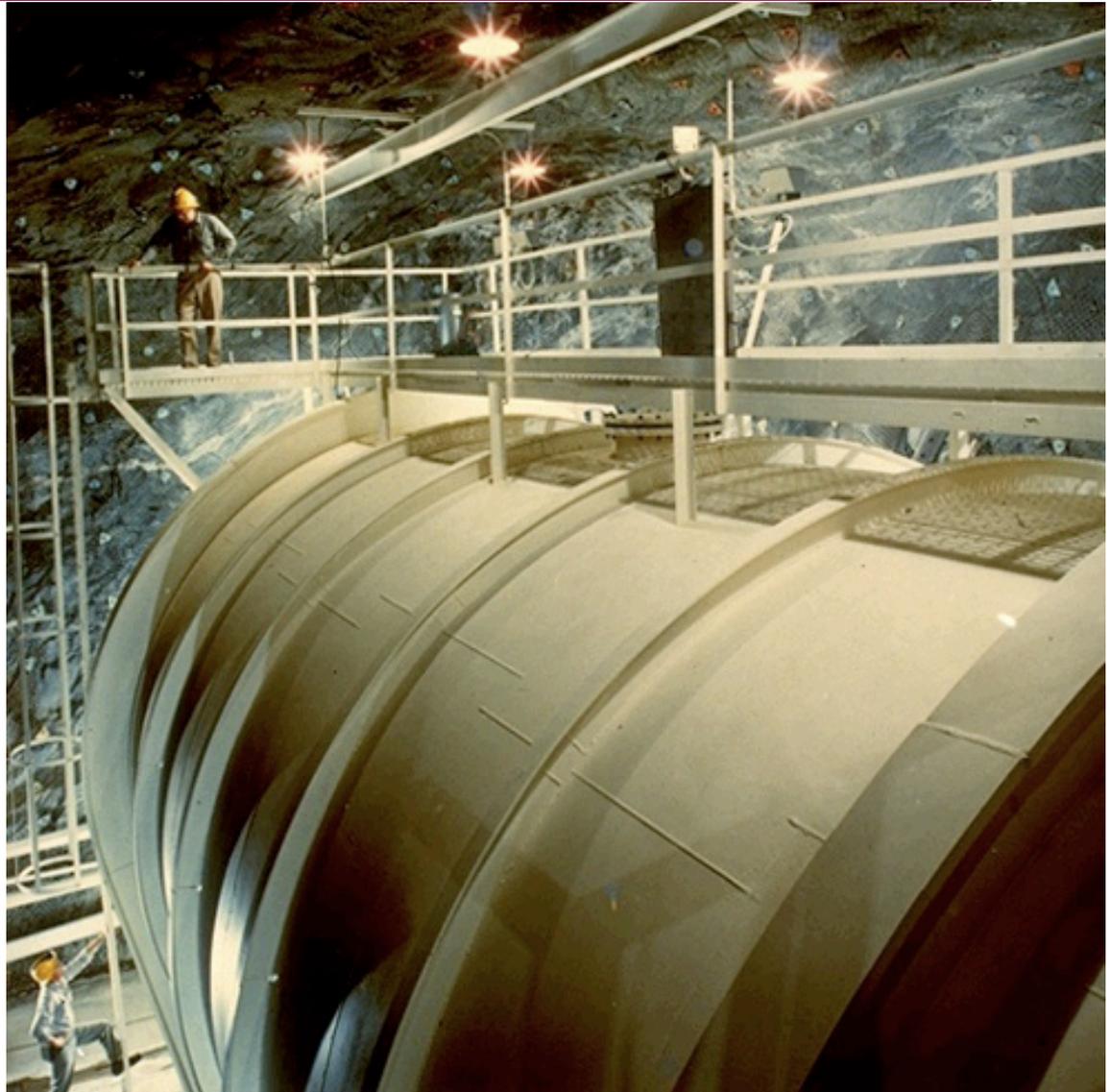
650 tonnes de  $C_2Cl_4$

1v/jr ( $10^{18}$  traversant cuve)

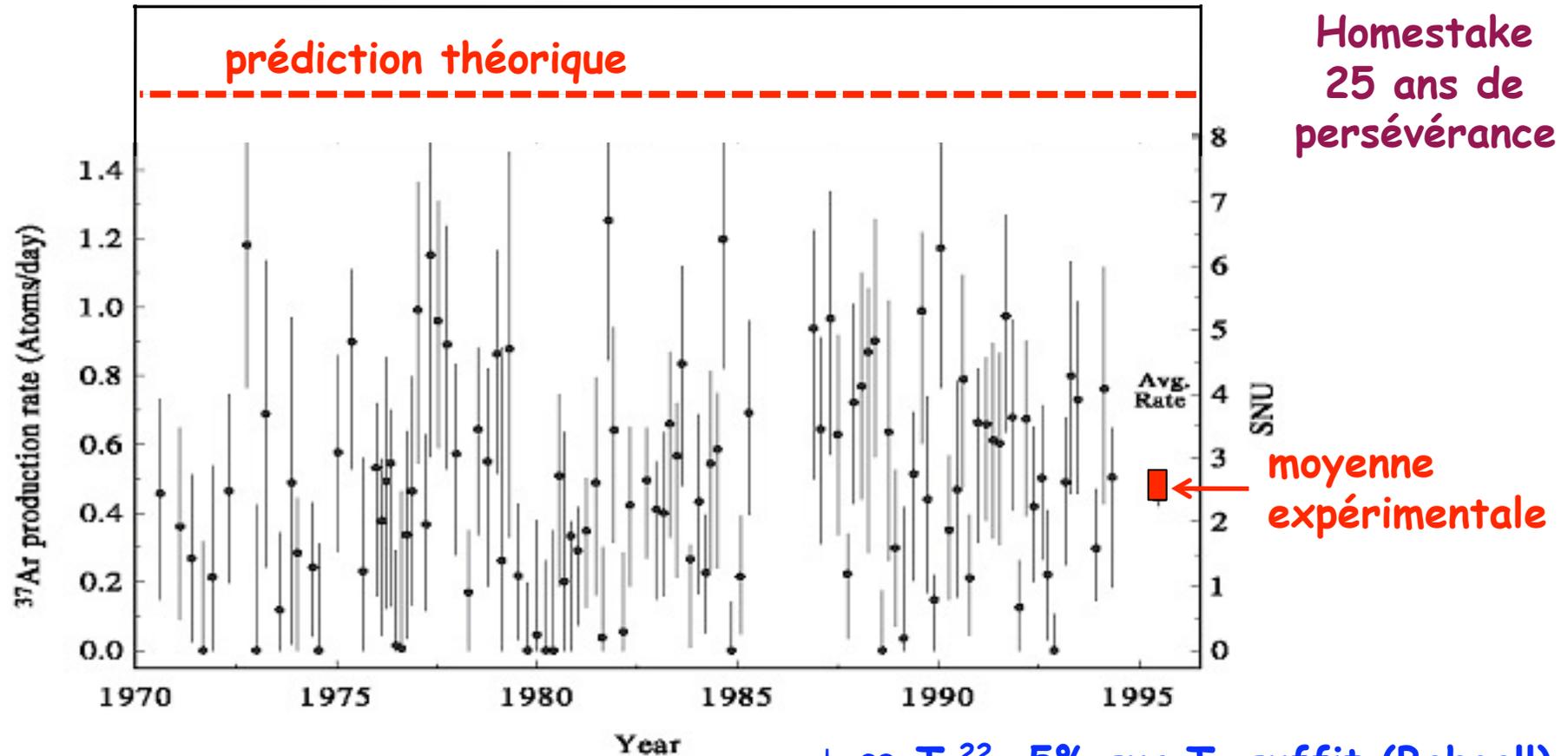


radioactif  $\tau_{1/2} \sim 1$  mois

→ « Recherche de  $\nu$  en provenance du Soleil » (1968)



# Neutrinos solaires

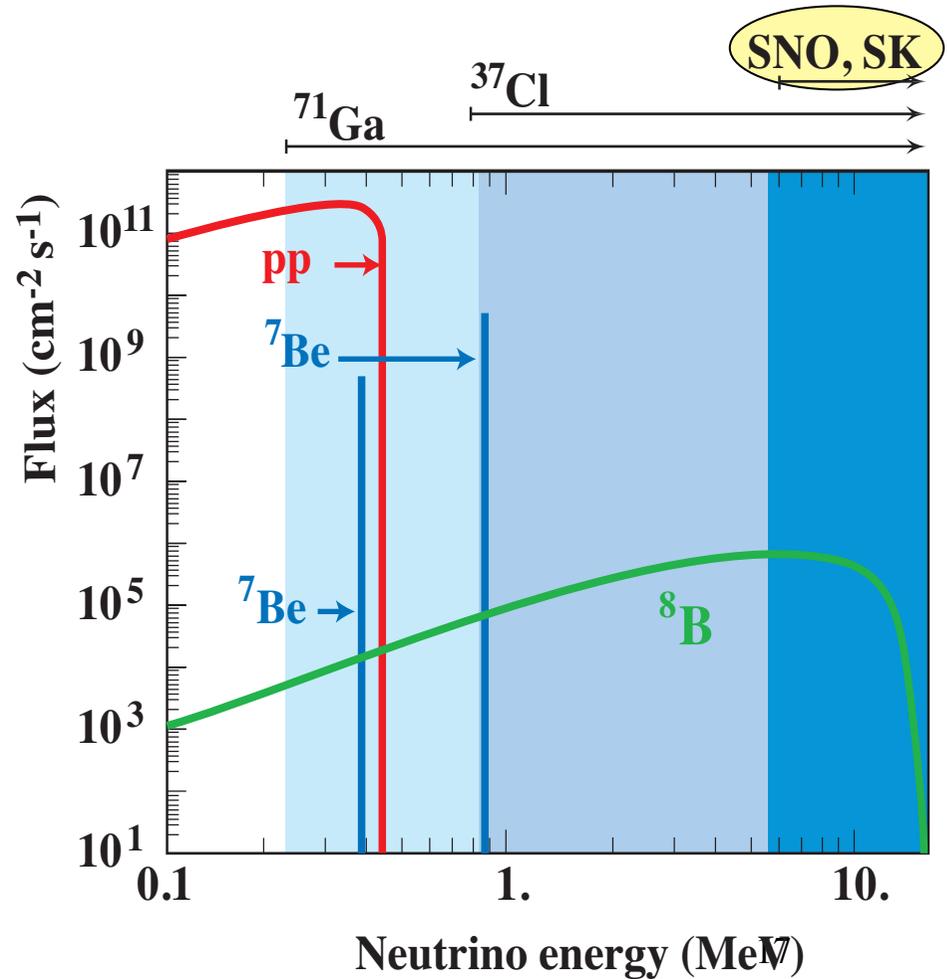
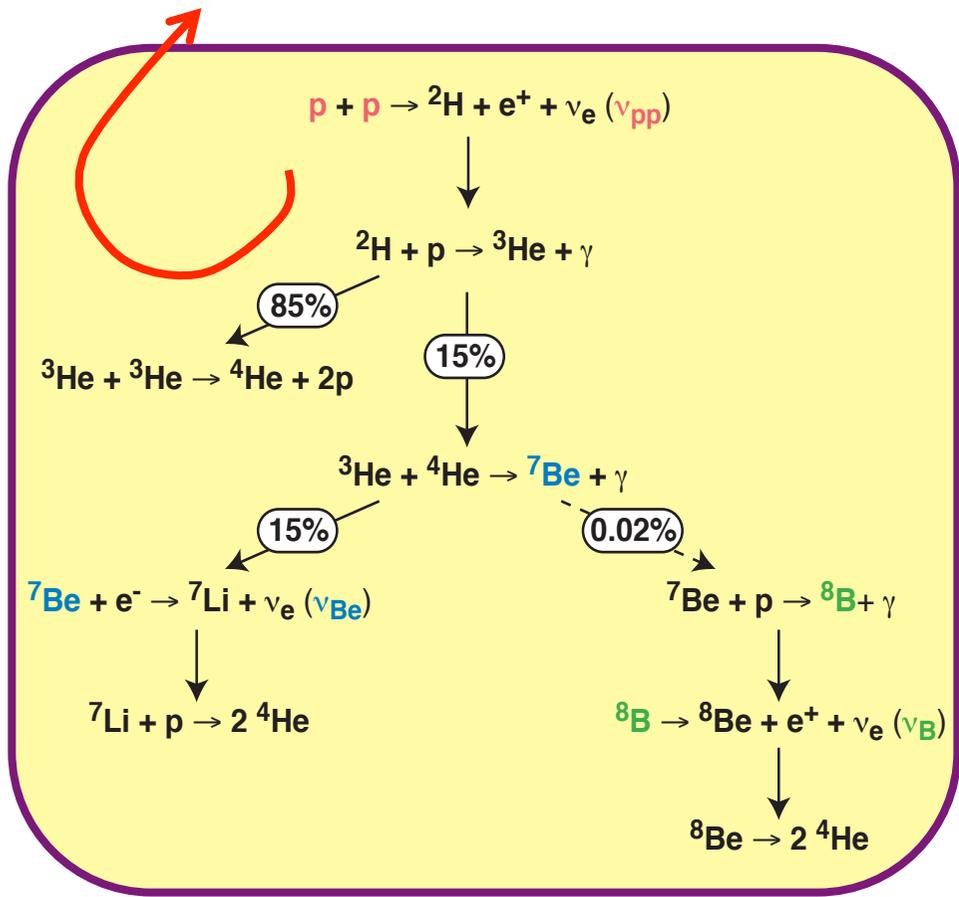


flux détecté = 30% flux prédit

$\phi \propto T_c^{22}$ , 5% sur  $T_c$  suffit (Bahcall)

pb expérimental? (Davis)

# Neutrinos solaires



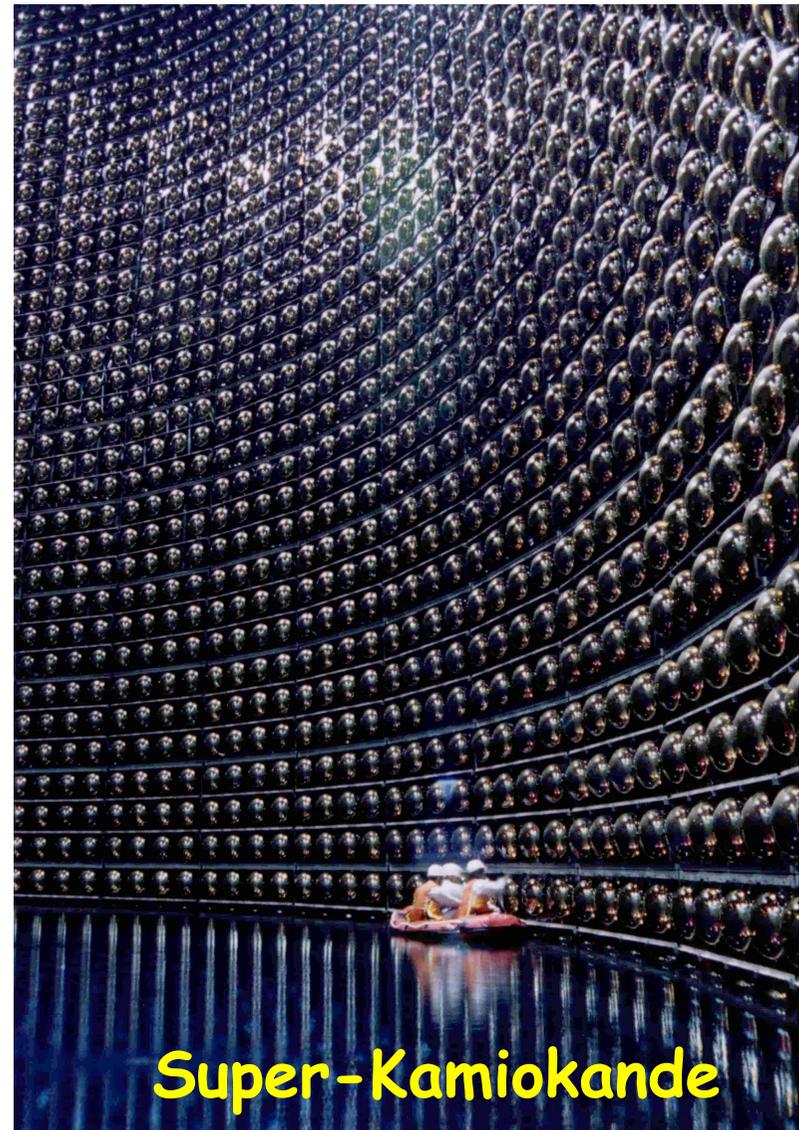
# Neutrinos solaires

- Expérience temps-réel et directionnelle:  
(Super) Kamiokande



seuil = 6.5 MeV

(1986)

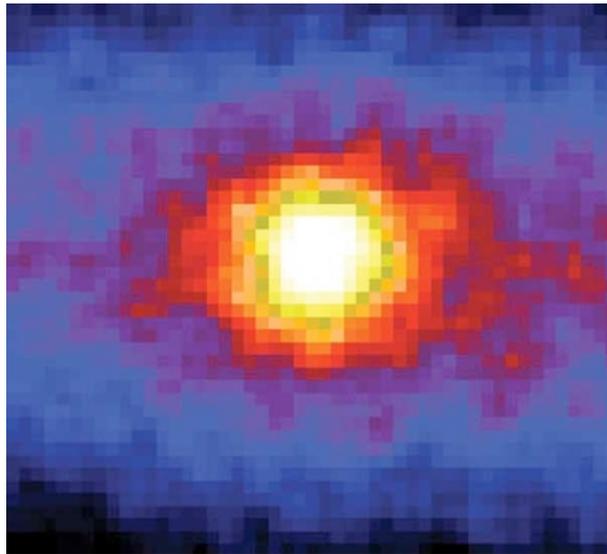


Super-Kamiokande

# Neutrinos solaires

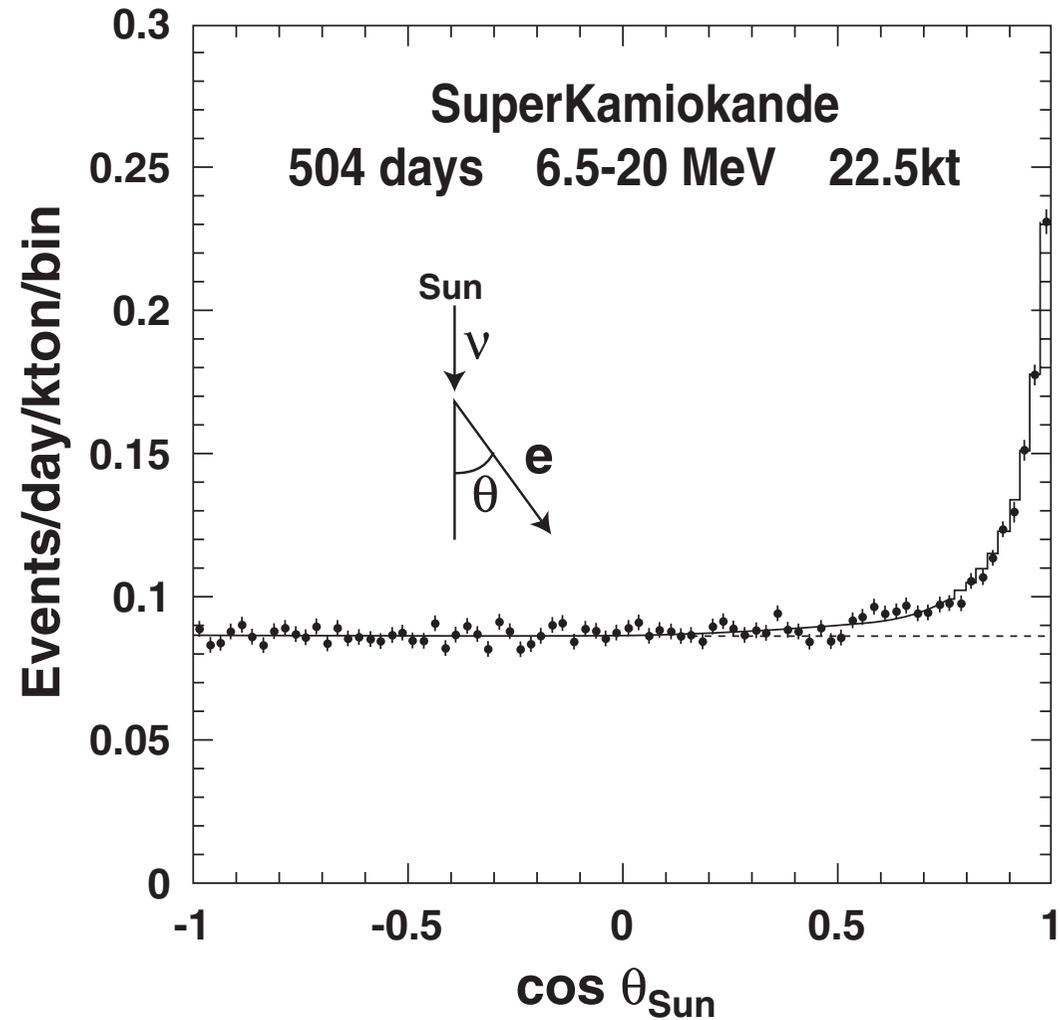
SuperKamiokande

-origine solaire confirmée



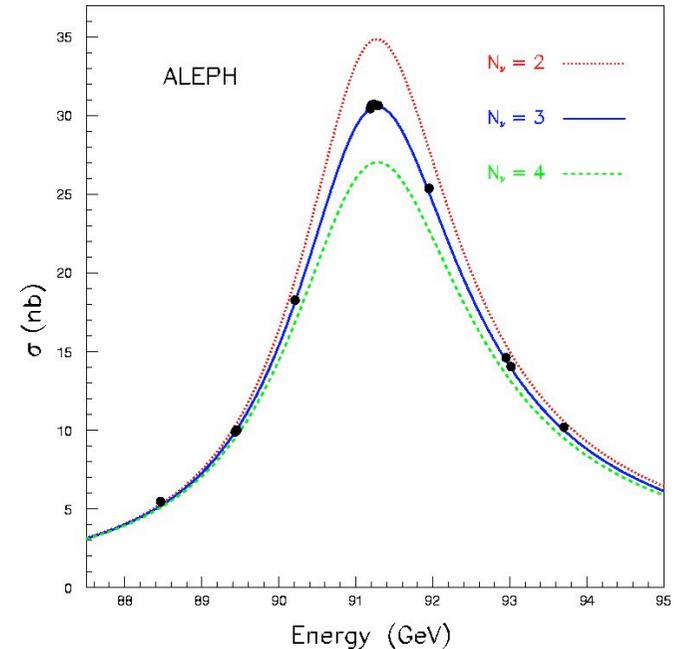
- déficit persistant

$$\frac{\text{data}}{\text{modèle}} = 0.4$$



# Neutrinos solaires: une piste

- 3 familles de neutrinos** ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )
- LEP (largeur du boson Z)
  - Big Bang Nucleosynthesis



Etats propres (masse)  $\neq$  états propres (saveur)



propagation



détection

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k V_{\alpha k} |\nu_k\rangle$$

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$$

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle$$

saveur

masse

cas simplifié à 2 familles  
 $m_1 \neq m_2$

# Neutrinos solaires: une piste

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle \end{aligned}$$

- $|\nu_i(t)\rangle = |\nu_i(t=0)\rangle e^{i(px-Et)}$  **propagation état propre**

- $E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + m_i^2 / 2E_i \approx p + m_i^2 / 2E$  **pour  $\nu$  relativiste ( $m \ll E$ )**

- $|\nu(t)\rangle = e^{i(px-Et)} \left( \cos\theta |\nu_1\rangle e^{-im_1^2 t / 2E} + \sin\theta |\nu_2\rangle e^{-im_2^2 t / 2E} \right)$

$$|\nu(t)\rangle = e^{i(px-Et-(m_1^2+m_2^2)t/4E)} \left( \cos\theta |\nu_1\rangle e^{i\delta m^2 t / 4E} + \sin\theta |\nu_2\rangle e^{-i\delta m^2 t / 4E} \right)$$

**où**  $\delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$

- **Probabilité qu'un  $\nu_e$  émis par le Soleil soit encore un  $\nu_e$  au niveau de la Terre**

$$P_{\nu_e}(t) = \left| \langle \nu_e | \nu(t) \rangle \right|^2 = \left| \cos^2\theta e^{i\delta m^2 L / 4E} + \sin^2\theta e^{-i\delta m^2 L / 4E} \right|^2$$

# Neutrinos solaires: une piste

- $P_{\nu_e}(t) = \left| \langle \nu_e | \nu(t) \rangle \right|^2 = \left| \cos^2 \theta e^{i\delta m^2 L / 4E} + \sin^2 \theta e^{-i\delta m^2 L / 4E} \right|^2$

$$P_{\nu_e}(t) = \left| e^{-i\delta m^2 L / 4E} + 2i \cos^2 \theta \sin \frac{\delta m^2 L}{4E} \right|^2$$

$$\begin{aligned} \sin^2 \theta &= 1 - \cos^2 \theta \\ \sin x &= (e^{ix} - e^{-ix}) / (2i) \end{aligned}$$

$$P_{\nu_e}(t) = \left| \cos \frac{\delta m^2 L}{4E} - i \sin \frac{\delta m^2 L}{4E} + 2i \cos^2 \theta \sin \frac{\delta m^2 L}{4E} \right|^2$$

$$P_{\nu_e}(t) = \cos^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} + \sin^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} \cos^2 2\theta$$

$$\cos 2\theta = 2\cos^2 \theta - 1$$

$$P_{\nu_e}(t) = 1 - \underbrace{\sin^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} \sin^2 2\theta}_{>0}$$

Pontecorvo 1958 :  
« une piste pour réduire  
le flux des  $\nu$  solaires... »

Note:  $\delta m=0 \rightarrow$  pas d'oscillation

# Neutrinos solaires: une piste

- $P_{\nu_e}(t) = 1 - \sin^2 \frac{\delta m^2 L}{4E} \sin^2 2\theta$

fréquence

amplitude

$$\Rightarrow 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$$

en moyenne si

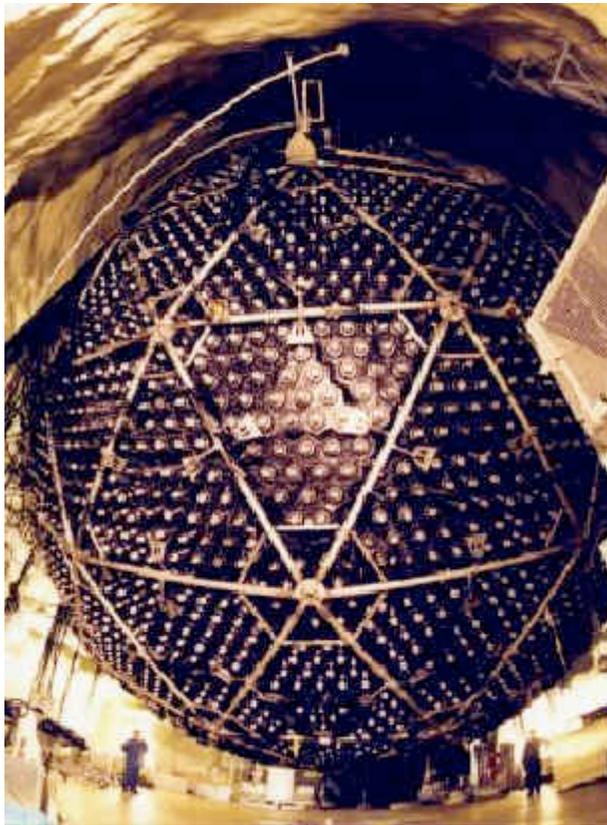
$$L_{\text{Terre-Soleil}} \gg L_{\text{osc}} = 4\pi E / \delta m^2 \quad (= 4\pi \hbar c E / \delta m^2 c^4)$$



Faut détecter les différents saveurs de  $\nu$  !

# Neutrinos solaires: énigme résolue

**SNO**: mille tonnes de  $D_2O$   $\longrightarrow$  Sensibilité aux différents saveurs de  $\nu$



2000m sous terre



Diffusion élastique (DE)



Courant chargé (CC)



Courant neutre (CN)

Radiochimique : CC uniquement sur Cl ou Ga,  $\nu_e$

Cerenkov: DE avec sensibilité aux  $\nu_\mu$  et  $\nu_\tau$   
(taux  $\nu_e = 6x$  taux  $\nu_\mu$  ou  $\nu_\tau$ )

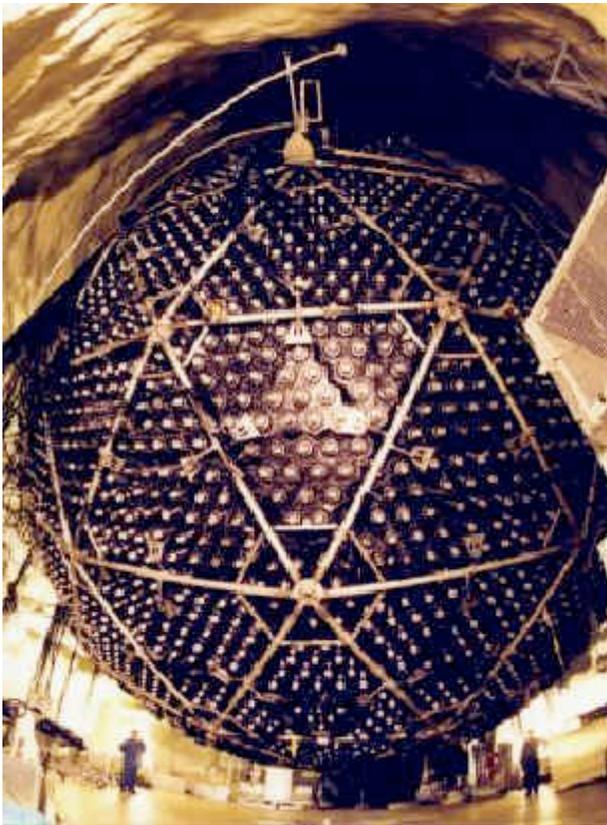
18 juin 2001:

Flux total (CN) en accord avec modèles solaires

Mais 2/3 des  $\nu_e$  du Soleil  $\rightarrow \nu_\mu$  ou  $\nu_\tau$  lorsqu'ils atteignent la Terre

Nobel 2002 (Davis, Koshiba)

# Neutrinos solaires: énigme résolue



Oscillation neutrinos solaires

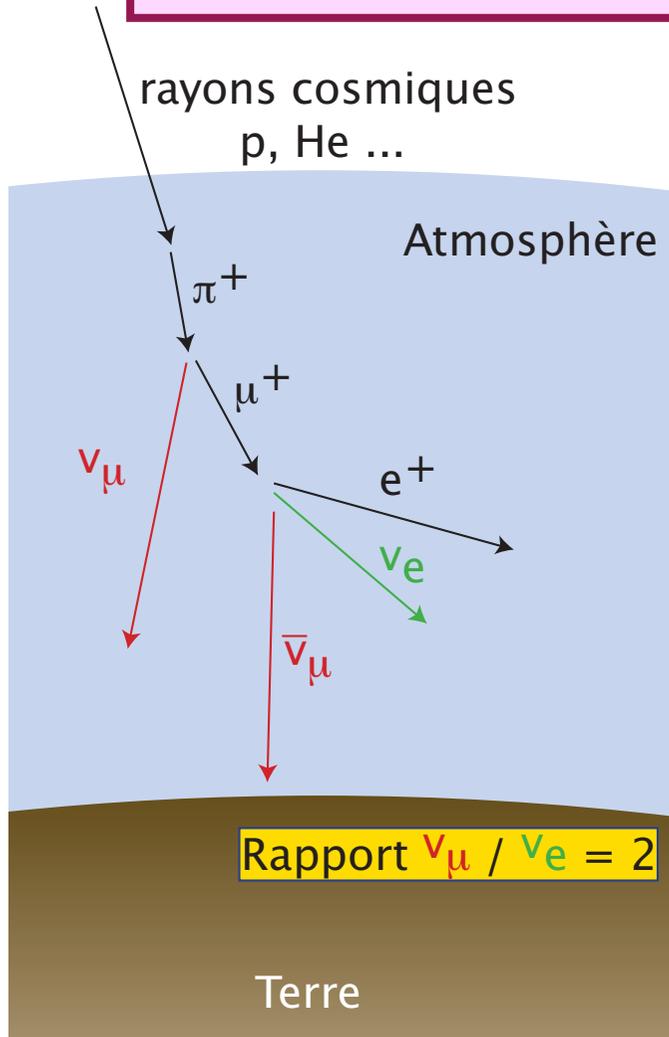
$$\delta m_{12}^2 \sim 7.94 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{12} \sim 34^\circ$$

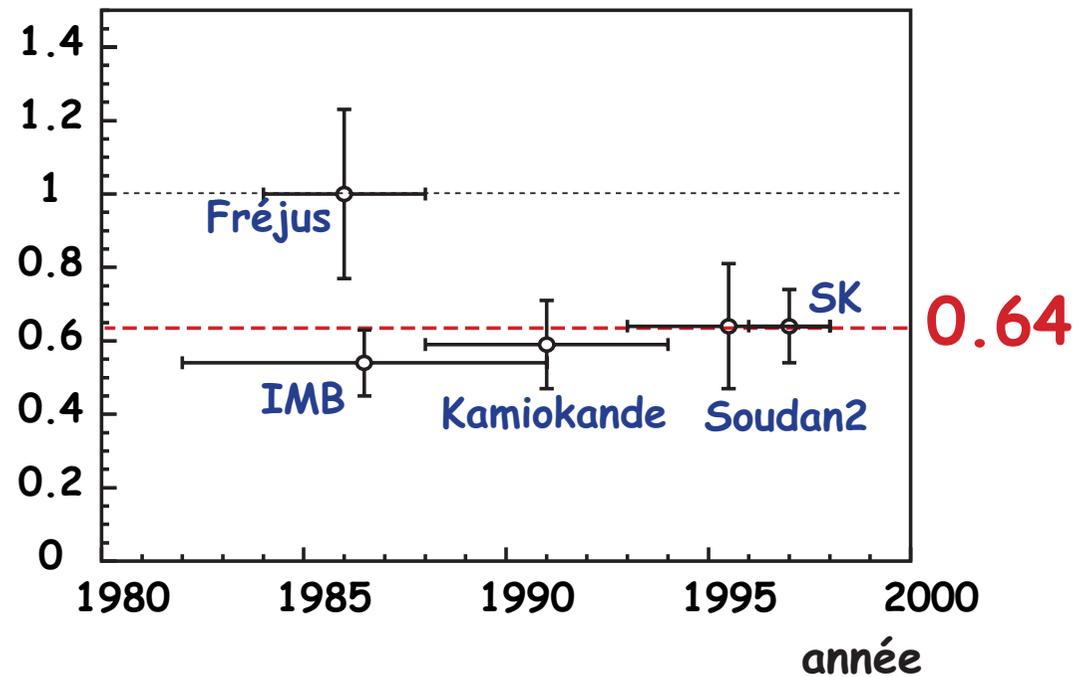


# Autres oscillations

# Neutrinos atmosphériques

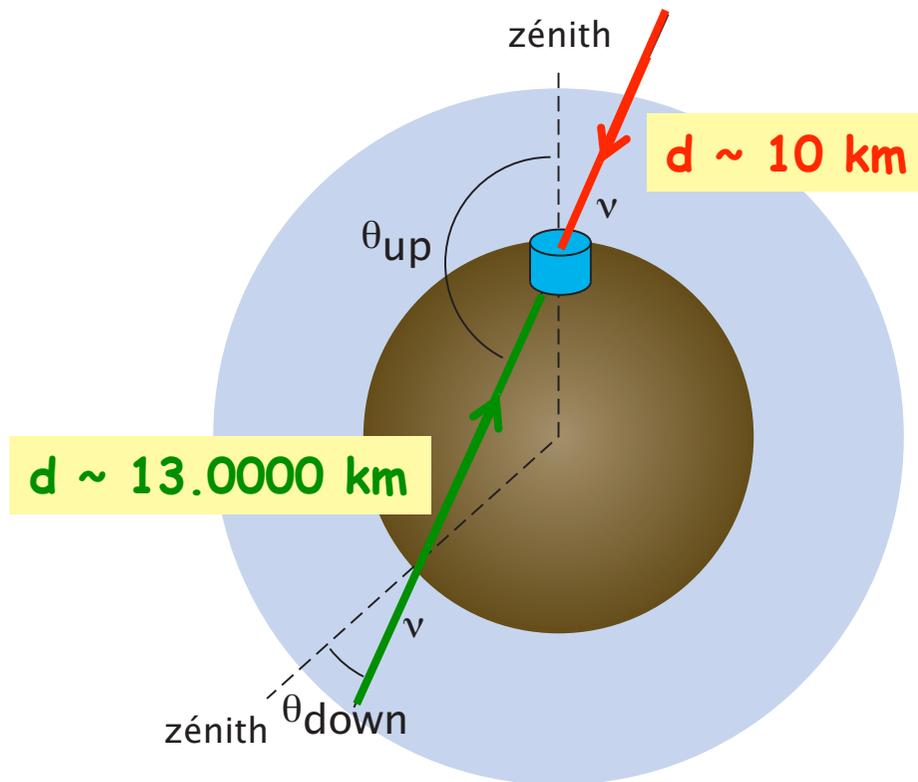


$\frac{(\mu / e) \text{ data}}{(\mu / e) \text{ MC}}$



# Neutrinos atmosphériques

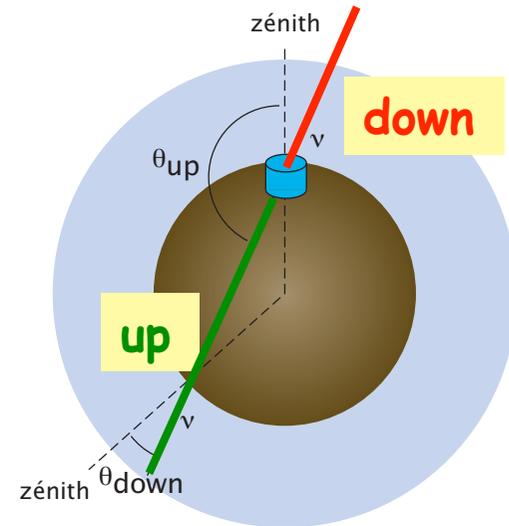
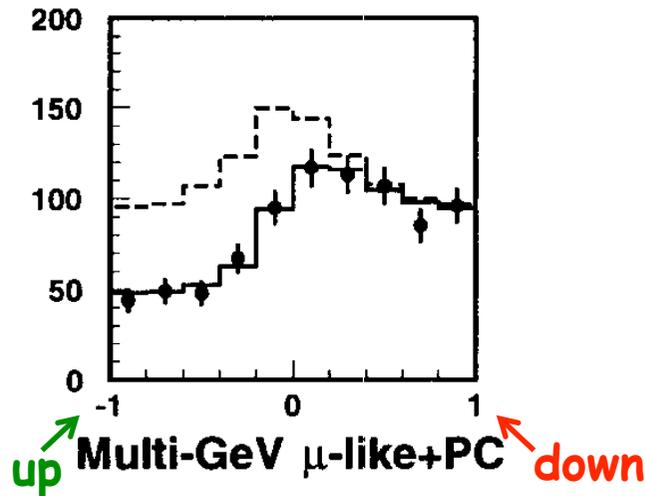
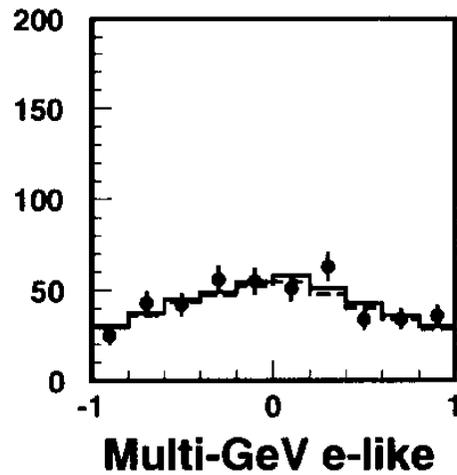
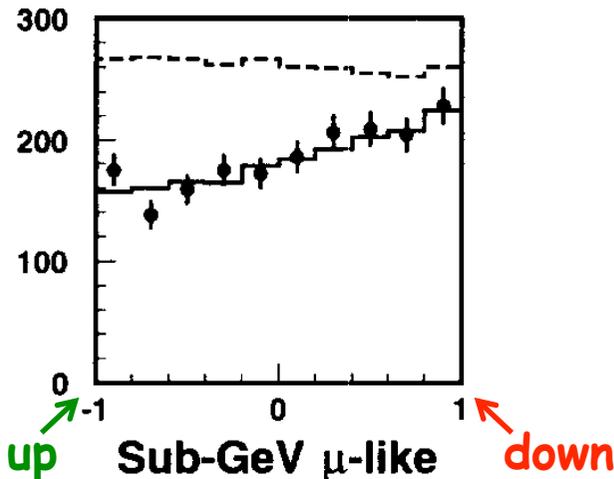
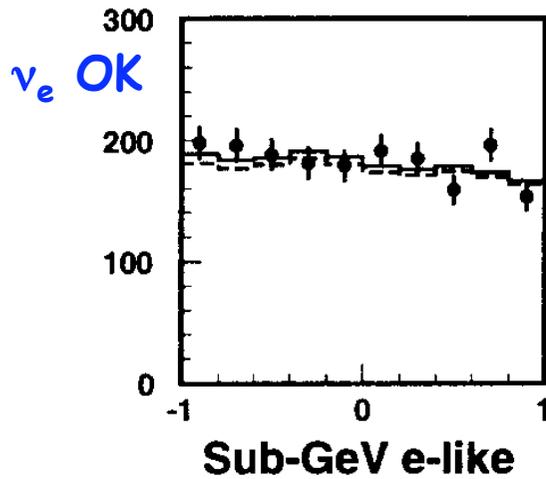
Dépendance angulaire  
au niveau du détecteur



Détection possible d'oscillations  
si  $L_{osc}$  ( $= 4\pi\hbar c E / \delta m^2 c^4$ )  
du même ordre de grandeur que  
diamètre  $\Phi$  de la Terre

Note: pour  $E \sim 1 \text{ GeV}$  et  
 $\delta m^2_{12} \sim 7.94 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ ,  
 $L_{osc} \gg \Phi_{terre}$   
donc condition non remplie  
pour cas « solaire »

# Neutrinos atmosphériques



Déficit de  $\nu_\mu$   
ayant traversé la Terre

oscillation  
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

# Toutes les facettes du neutrino

## Matrice de mélange des neutrinos

$$V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & e^{-i\delta} & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Atmosphérique

Paramètres inconnus:  $\theta_{13}, \delta$

Solaire

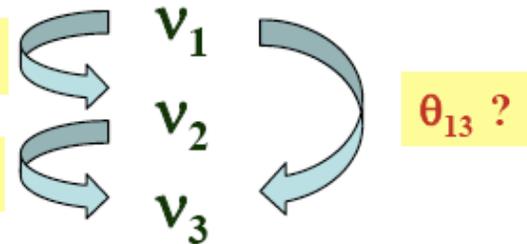
## Une nouvelle oscillation?

$$\begin{aligned} \delta m_{12}^2 &\sim 7.94 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \\ \theta_{12} &\sim 34^\circ \end{aligned}$$

$\theta_{12}$  solar neutrino oscillation

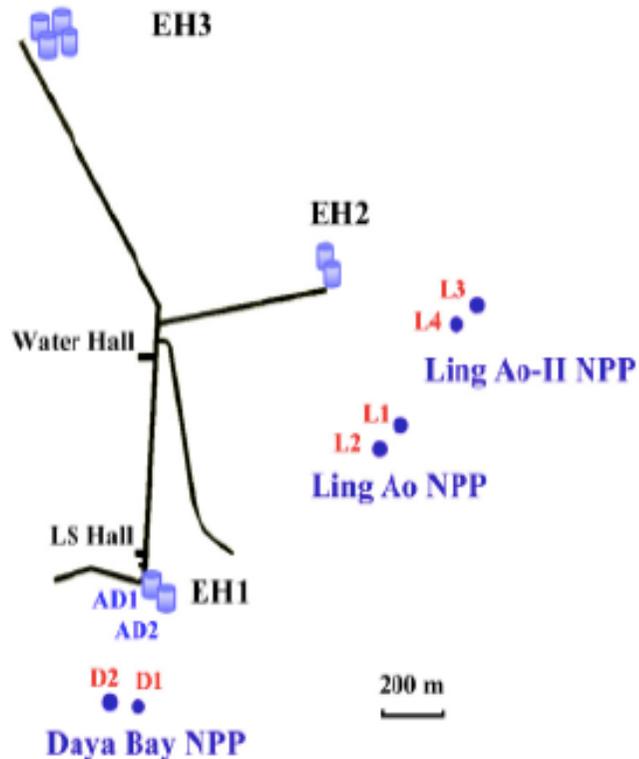
$$\begin{aligned} \delta m_{23}^2 &\sim 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \\ \theta_{23} &\sim 45^\circ \end{aligned}$$

$\theta_{23}$  atmospheric neutrino oscillation



# Neutrinos de réacteurs: Daya Bay

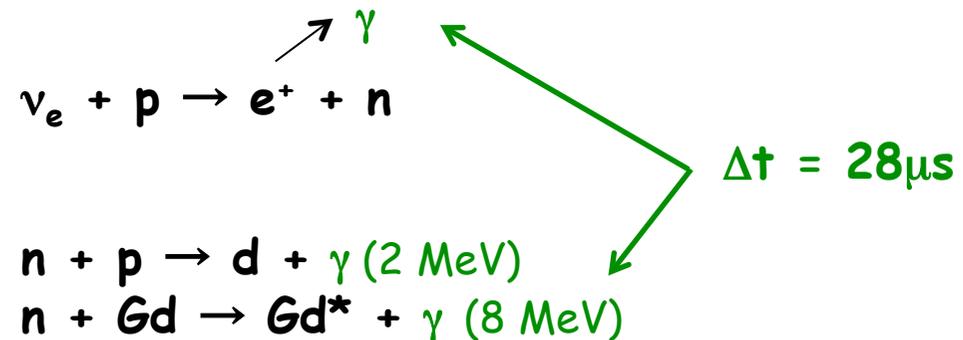
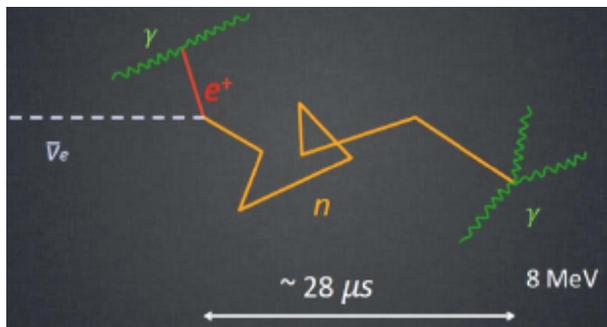
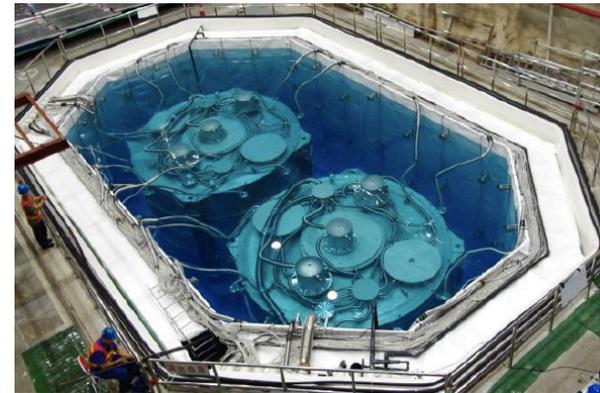
(Mars 2012)



- **6 réacteurs**
- **Mesures relatives** pour réduire les systématiques corrélées (2 sites proches, 1 site lointain)
- **Détecteurs multiples** sur chaque site pour réduire systématiques non corrélées (2 par site proche, 4 sur site lointain)

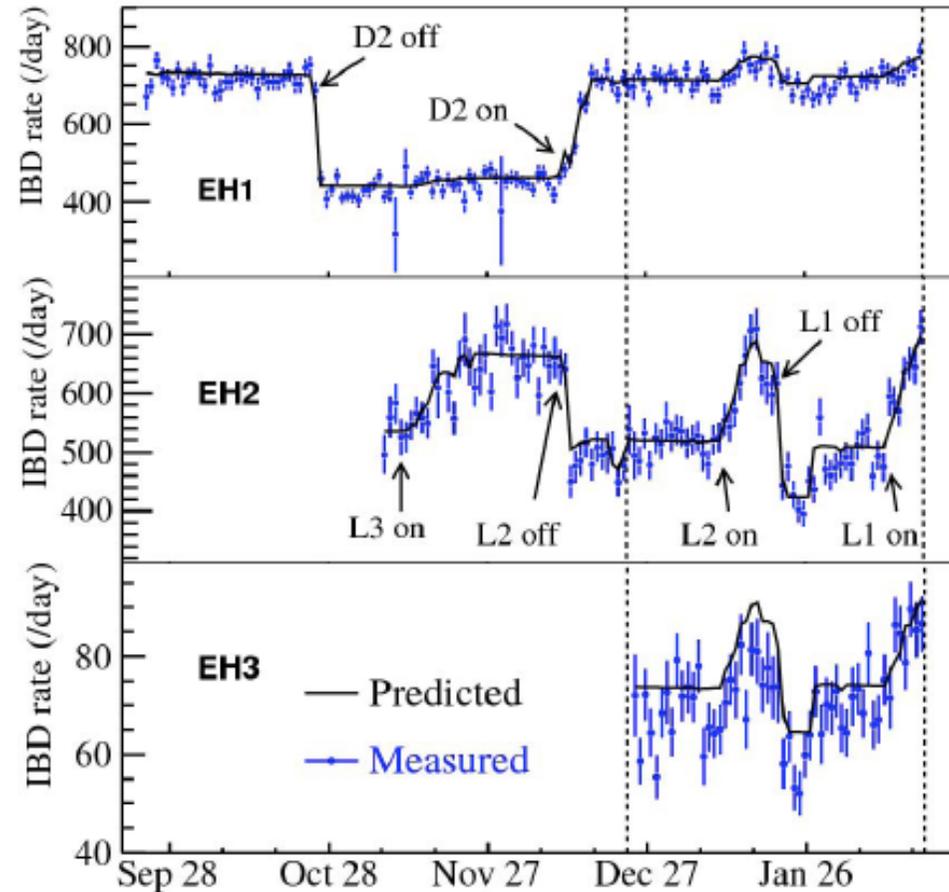
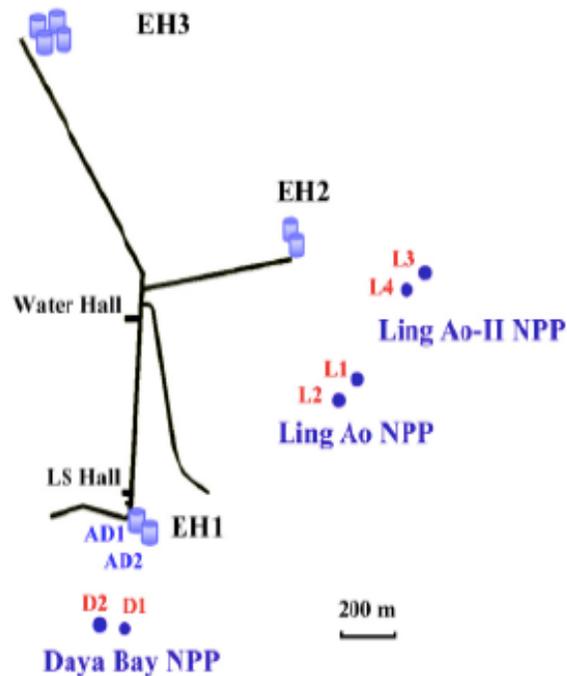
# Neutrinos de réacteurs: Daya Bay

Scintillateurs liquides au Gd



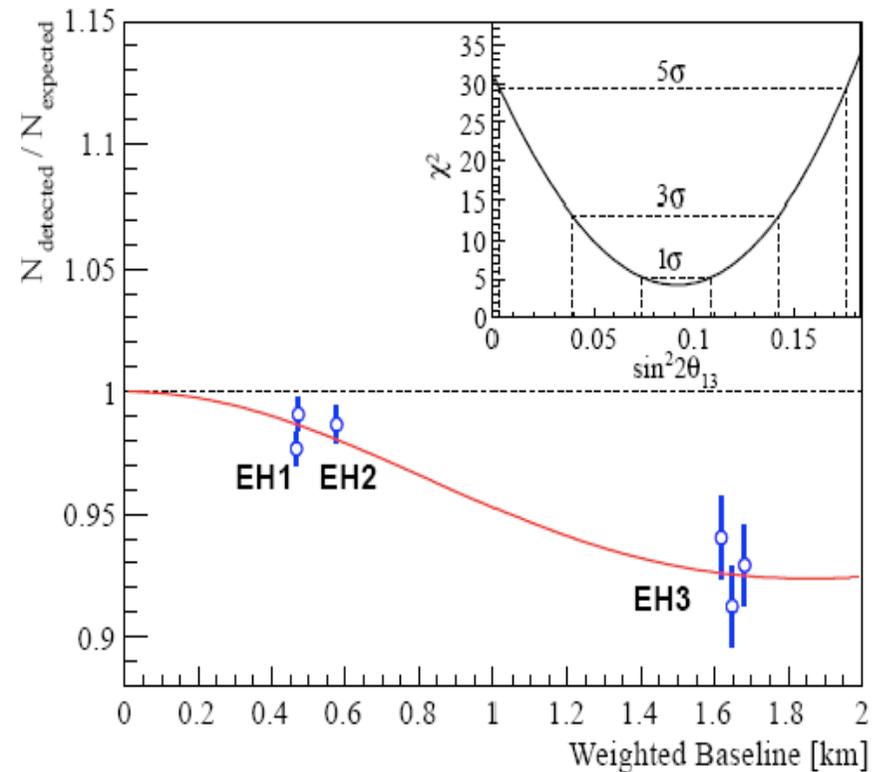
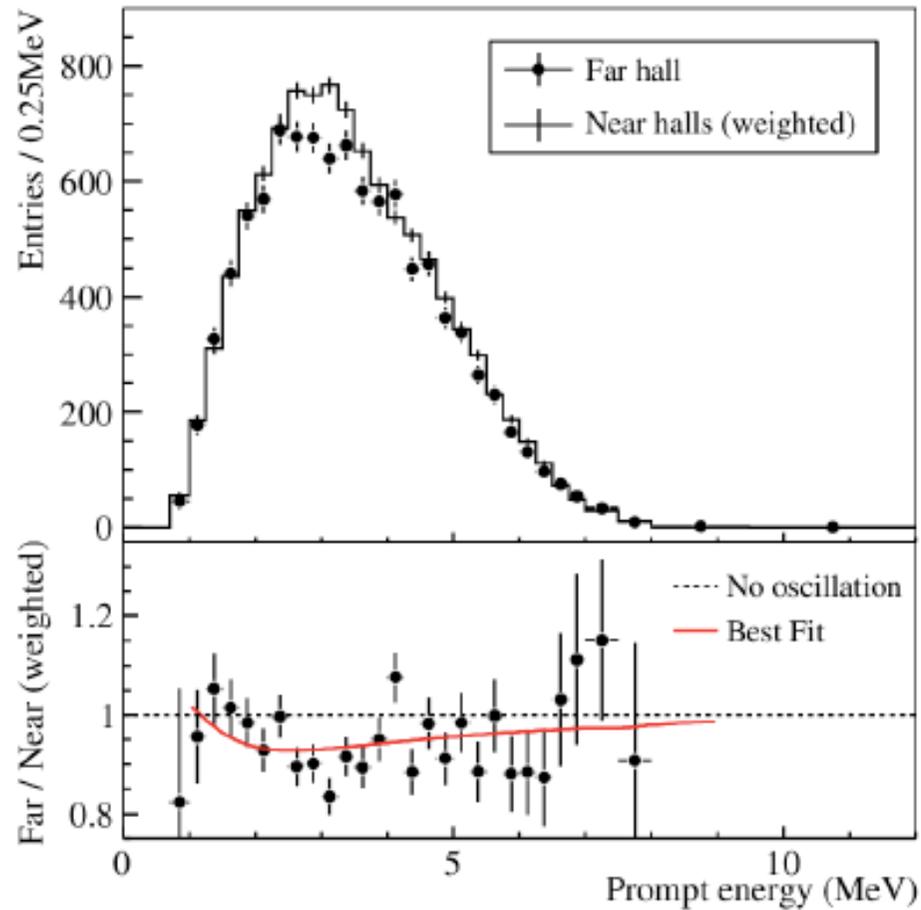
Détection des neutrinos :  
Coïncidence en **temps**, **espace** et **énergie**

# Neutrinos de réacteurs: Daya Bay



Mesures des flux sur détecteurs proches  
Prédictions pour site lointain

# Neutrinos de réacteurs: Daya Bay



# Neutrinos de réacteurs: Daya Bay

- ◆ **Electron anti-neutrino disappearance is observed at Daya Bay,**

$$R = 0.940 \pm 0.011 \text{ (stat)} \pm 0.004 \text{ (syst)},$$

**together with a spectral distortion**

- ◆ **A new type of neutrino oscillation is thus discovered**

$$\mathbf{\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (syst)}}$$

$$\mathbf{\chi^2/\text{NDF} = 4.26/4}$$

$$\mathbf{5.2 \sigma \text{ for non-zero } \theta_{13}}$$

**A venir en France: Double-Chooz**



# Bilan sur les neutrinos

# Bilan oscillations des $\nu$

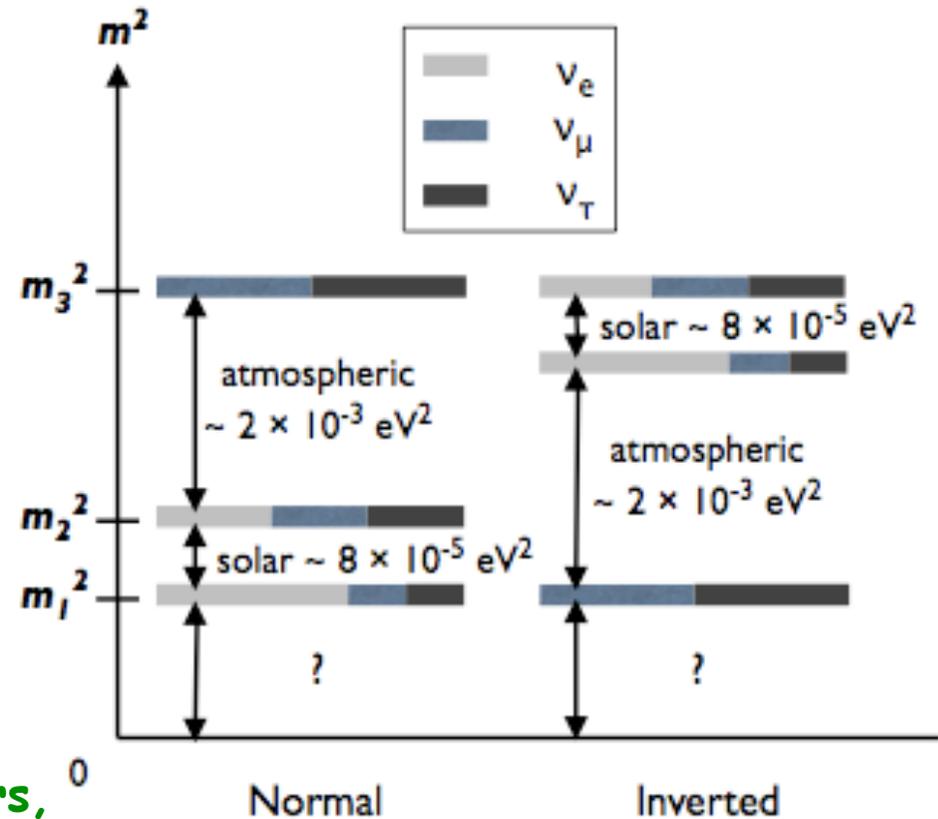
- $m_\nu$  non nulle (oscillations)
- Contraintes sur  $\delta m^2$  et non sur  $m$

$\nu$  atmosphériques  $\Rightarrow$   
 $> 1\nu$  à  $m > 0.05 \text{ eV}$  ( $=\text{sqrt}(\delta m^2_{23})$ )

$$(\delta m^2_{23} \sim \delta m^2_{13})$$

Limites en laboratoire  
 (désintégration  $\beta$  du Tritium):  
 $m(\nu_e) < \sim 2 \text{ eV}$

- Or  $n_\nu \sim n_\gamma \sim 3 \cdot 10^9 n_p$  dans l'Univers,  
 donc pour  $m_\nu \sim 0.1 \text{ eV} = 10^{-10} m_p$   
 la masse totale des  $\nu$  ( $n_\nu m_\nu$ ) serait de  
 l'ordre de la masse totale des étoiles !

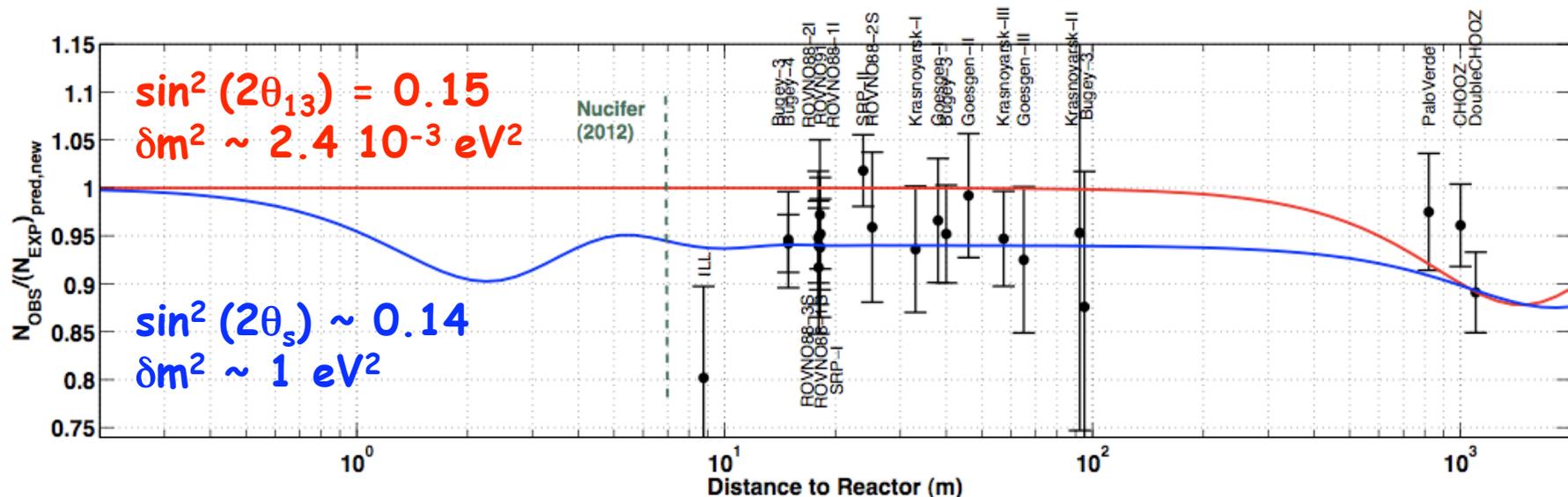


# Un neutrino stérile?

2011: Nouveau calcul du flux  $\bar{\nu}_e$  des réacteurs  
 (à partir de mesure des spectres de  $e^-$  provenant de  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ )  
 → augmentation de  $\sim 3\%$  des flux de  $\nu$  prédits

→ Observation d'un déficit ("anomalie réacteurs")

→ Neutrino sterile avec  $\Delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$  pour réduire flux à  $L \sim 10\text{-}100 \text{ m}$  ?



# Un neutrino stérile?

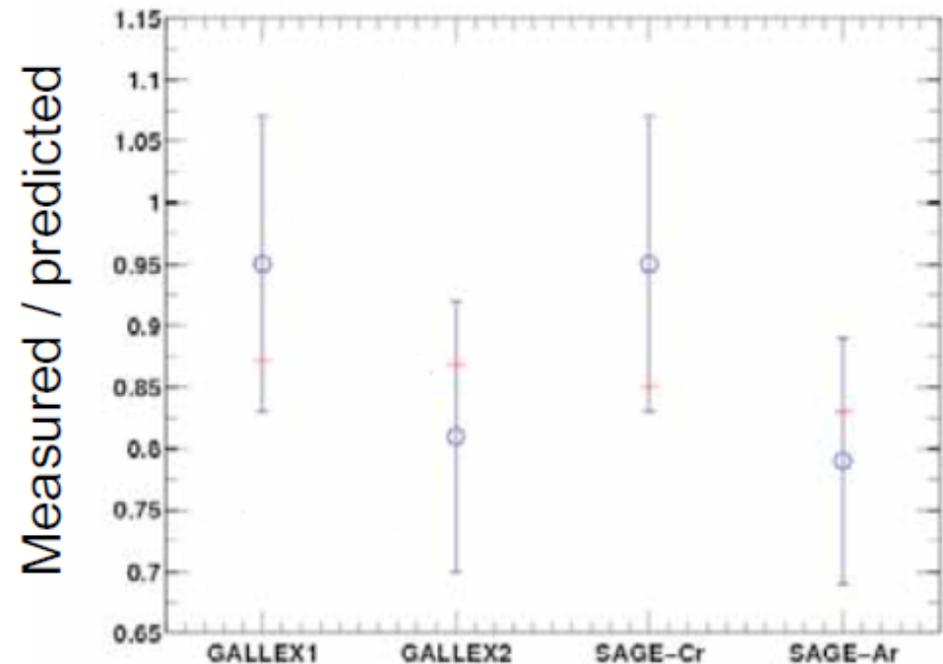
## "L'anomalie Gallium"

Sources radioactives intenses de  $\nu_e$   
( $^{51}\text{Cr}$  et  $^{37}\text{Ar}$ ) dans GALLEX, SAGE

Détection des  $\nu_e$  par  
 $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$

Mesures systématiquement  
inférieures aux prédictions ( $2.7\sigma$ )

**Question:** à quel point maîtrisons-nous les efficacités des méthodes radiochimiques?



# Physique des neutrinos

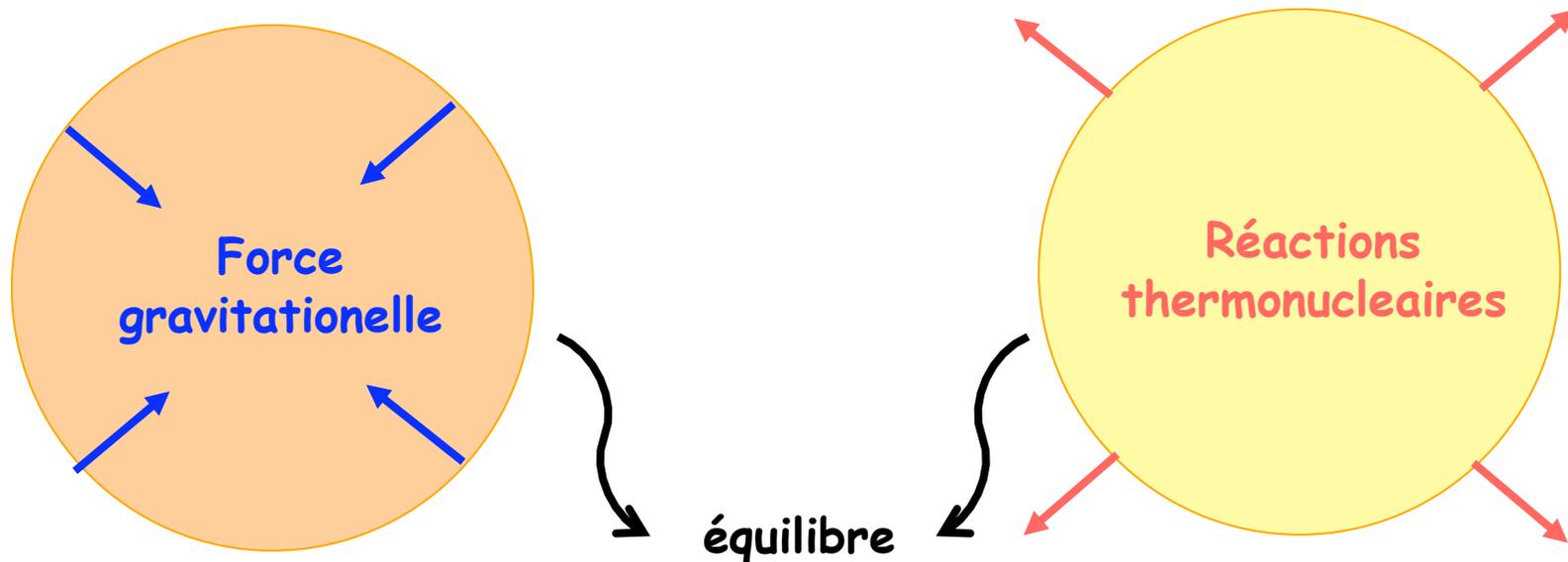
- **Mesure masses**
- **Contrainte/exclusion neutrino stérile**
  - anomalies Gallium et réacteurs compatibles:  
 $\nu_e \rightarrow \nu_s$  ou  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_s$
  - mais pas avec excès de  $\nu_e$  dans LSND  
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_s \rightarrow \nu_e$
- **Violation de CP?**  
comparaison  $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$  et  $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

**Certaines réponses dans exp. terrestres,  
mais astro neutrino apporte environnement unique  
pour sonder les propriétés fondamentales des neutrinos.**

The background is a dark blue space scene. A galaxy with a bright core and colorful arms (red, orange, and blue) is visible, stretching diagonally across the frame. Several bright stars are scattered throughout, with one prominent star in the lower-left quadrant showing a four-pointed diffraction pattern.

**Neutrinos  
et supernovae**

# Evolution stellaire

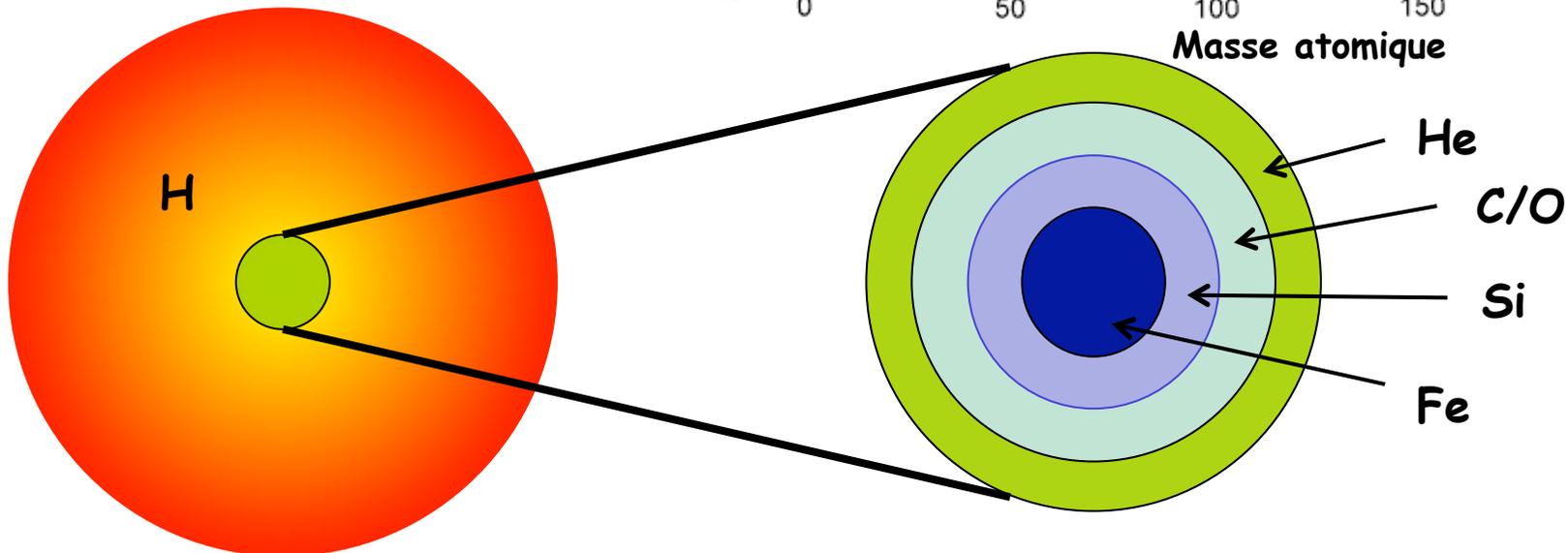
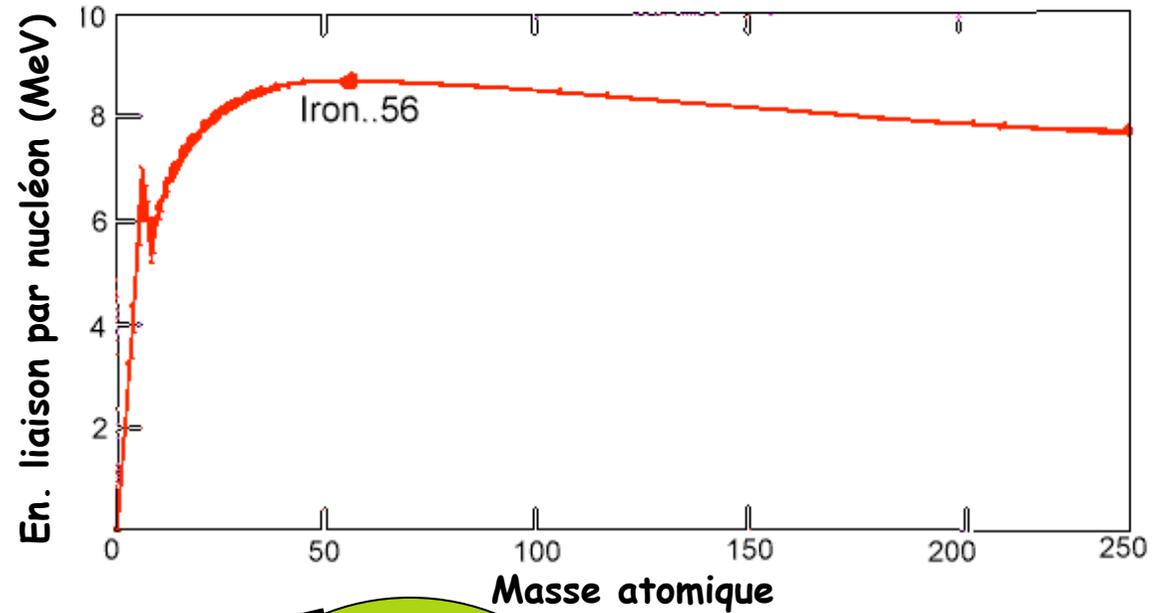
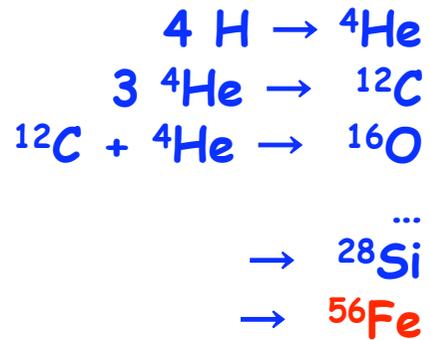


Disparition du carburant

- compression du cœur
- T augmente
- Déclenchement réaction suivante (si masse suffisante pour atteindre la température nécessaire)

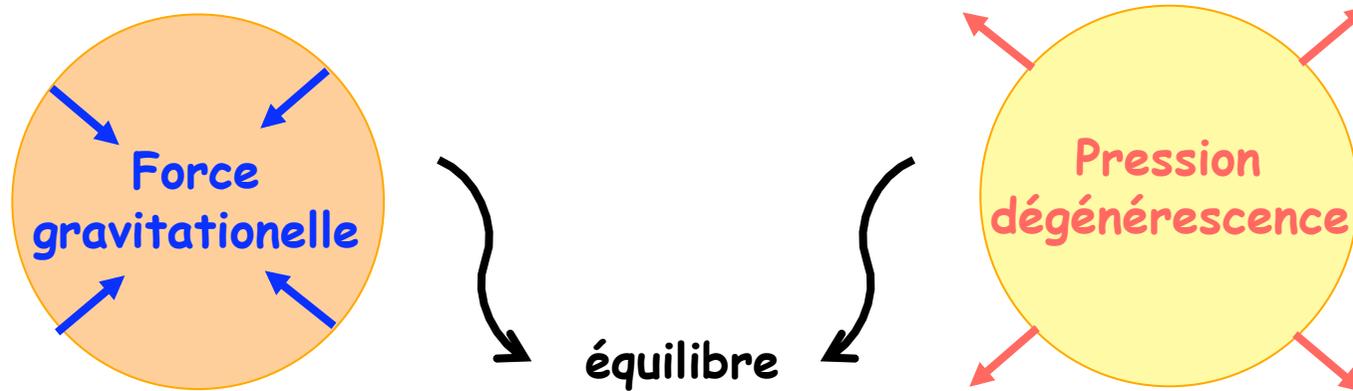
# Evolution stellaire

Etoiles de masse initiale  
> 8 masses solaires

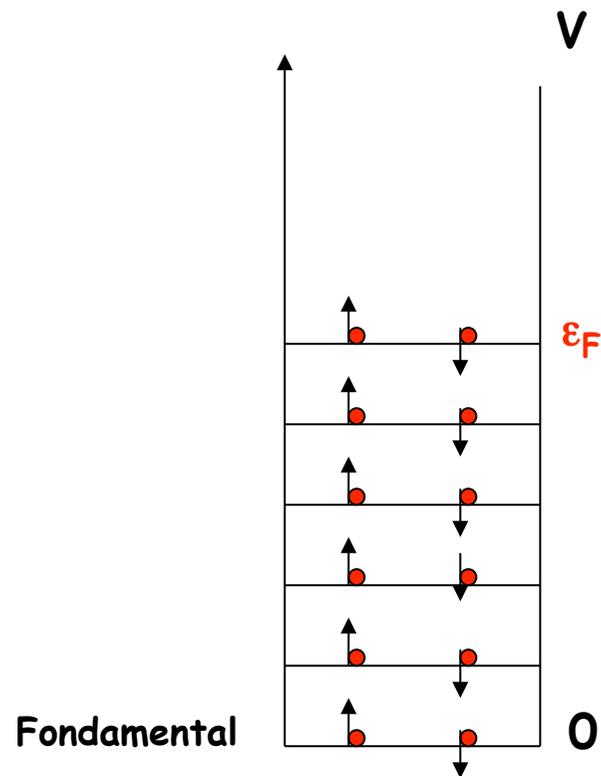


# Evolution stellaire

En l'absence de réaction nucléaire, pression de dégénérescence quantique



# Evolution stellaire



Principe d'exclusion de Pauli:  
deux fermions ne peuvent pas  
se trouver dans le même état

« énergie incompressible »

$$\varepsilon_F \sim n^{2/3} / m$$

donc d'abord

pression de dégénérescence  
due aux électrons

puis pression de dégénérescence  
due aux neutrons

# Evolution stellaire

Combustion de Si → augmentation masse du cœur de Fe  
(pression de dégénérescence des  $e^-$ )  
→ augmentation densité

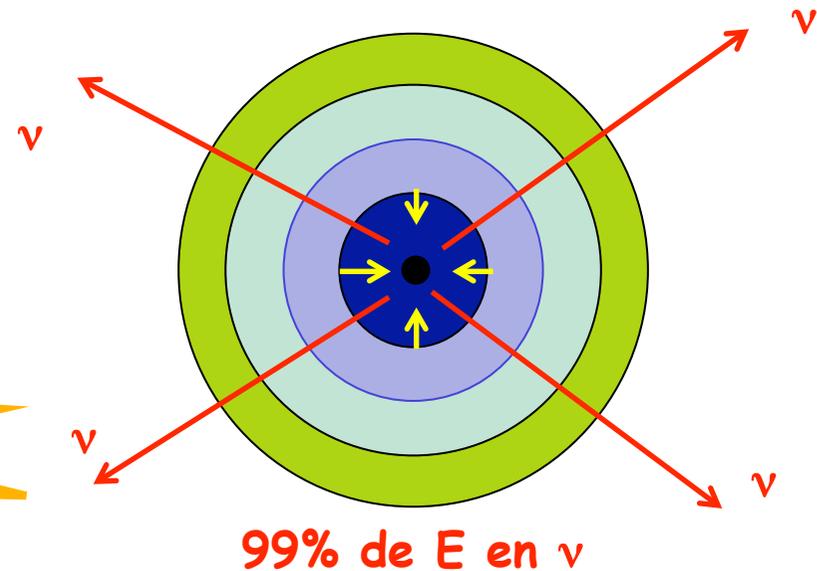
Capture électronique:  $p + e^- \rightarrow n + \nu$

Diminution de pression de dégénérescence ( $\varepsilon_F$ ) des  $e^-$

Effondrement du cœur de l'étoile

Arrêt brutal ( $\varepsilon_F$  des neutrons)  
Onde de choc et émission de  $\nu$

**Supernova**



galaxie  
lointaine

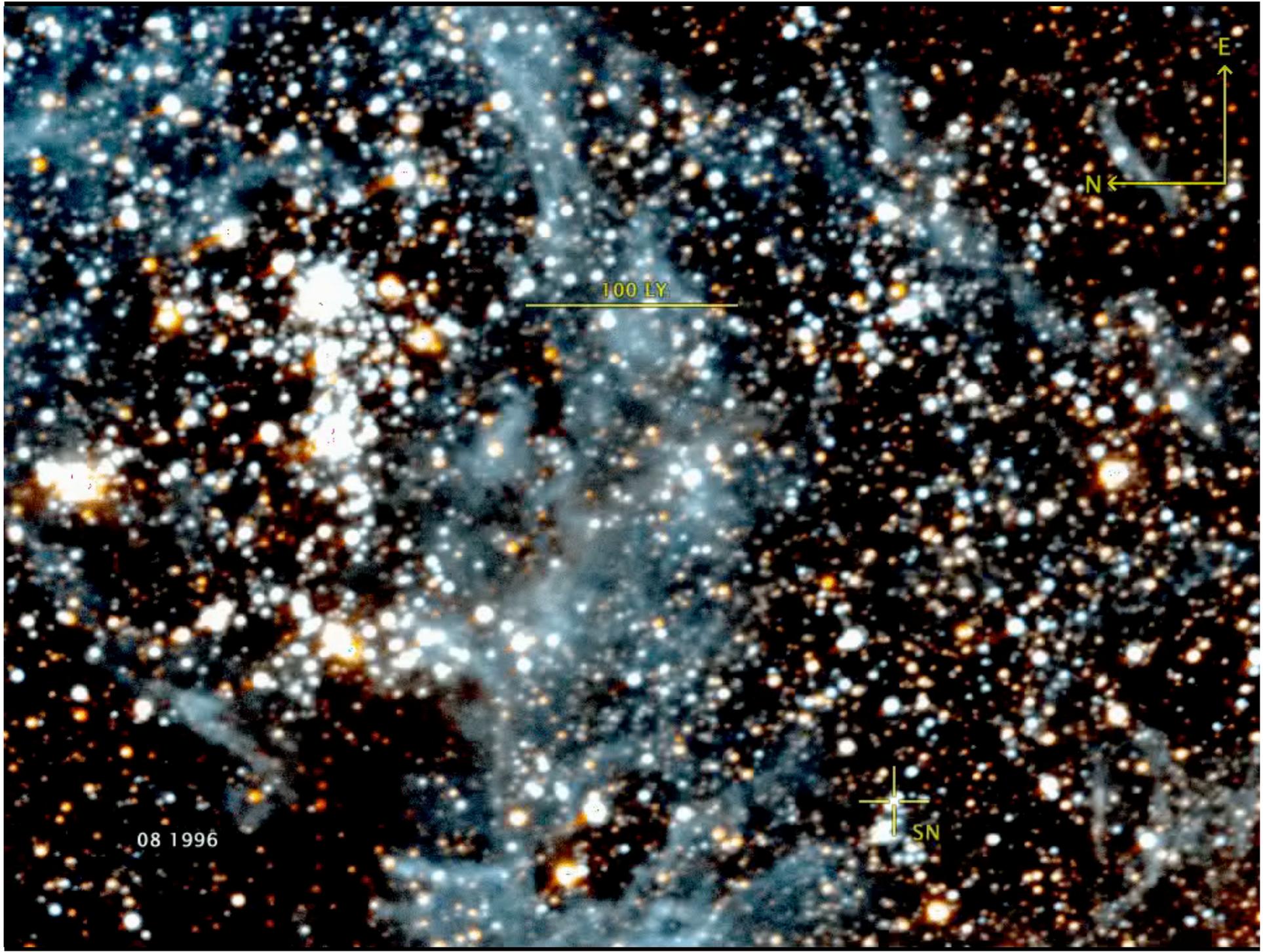


© Anglo-Australian Observatory



SN 1987A

© Anglo-Australian Observatory



100 LY

N

E

SN

08 1996

# 1987A

23 février 1987: ~20 neutrinos en provenance de SN1987A en  $\Delta t=10s$   
dans les détecteurs Kamiokande et IMB

Or  $E = \gamma mc^2$  où  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (V/c)^2}}$

donc vitesse  $V$  des  $\nu$  d'énergie  $E$  :  $V = c\sqrt{1 - (mc^2/E)^2}$

et durée  $t$  du trajet :  $t = \frac{d}{V} \approx \frac{d}{c} \left( 1 + \frac{1}{2} (mc^2/E)^2 \right)$

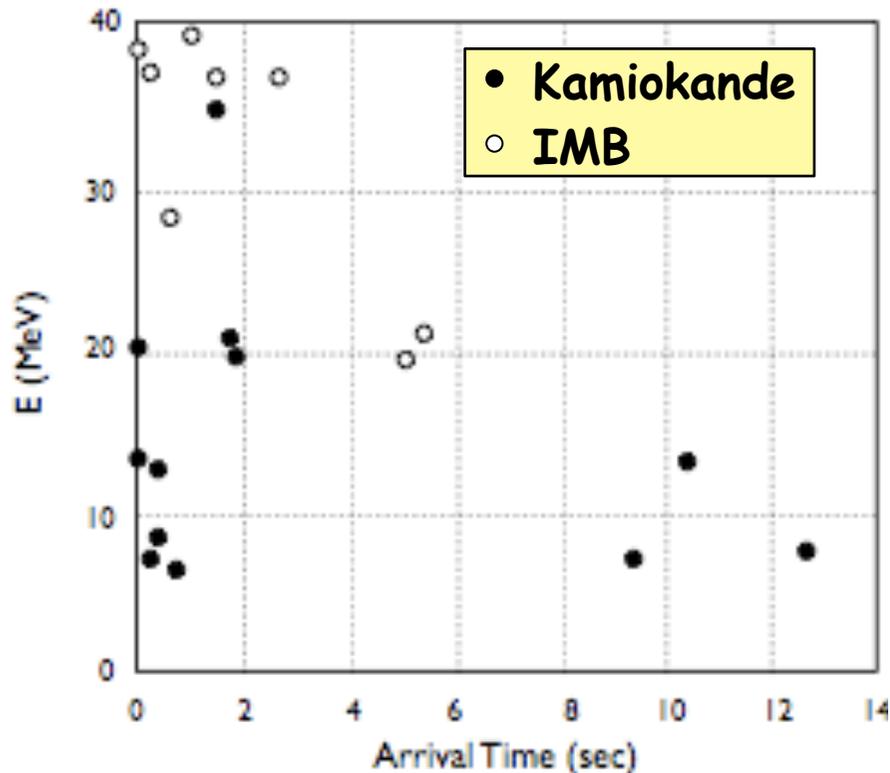
Donc contrainte sur  $m_\nu$  à partir de  $\Delta t/\Delta E$  :

$$\frac{dt}{dE} = \frac{d}{c} \left( \frac{mc^2}{E} \right) \left( \frac{-mc^2}{E^2} \right) = -\frac{1}{E} \frac{d}{c} \left( \frac{mc^2}{E} \right)^2$$

# 1987A

23 février 1987: ~20 neutrinos en provenance de SN1987A en  $\Delta t=10s$  dans les détecteurs Kamiokande et IMB

Donc contrainte sur  $m_\nu$  à partir de  $\Delta t/\Delta E$  : 
$$\Delta t = -\frac{\Delta E}{E} \frac{d}{c} \left( \frac{mc^2}{E} \right)^2$$



$d = 160.000 \text{ a.l.} \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ m}$   
 $E \sim 20 \text{ MeV} \sim \Delta E$   
 $\Delta t < 12s$

→  $m(\nu_e) < 13 \text{ eV}$  (compétitif en 87)

$d$  galactic → contraintes  $\sim \text{eV}$   
sur  $m(\nu_e, \nu_\mu \text{ et } \nu_\tau)$  !