

Astroparticule

3/3

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE
CEA-Saclay
Bénodet, décembre 2014

Astroparticule

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

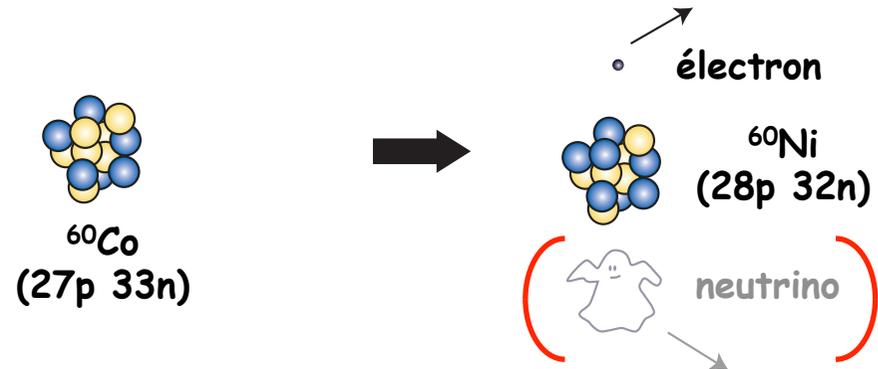
2) Approche **multi-messagers**
Astronomie neutrino
Ondes gravitationnelles



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

Rappel historique

- **Mystère de la désintégration β :**



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

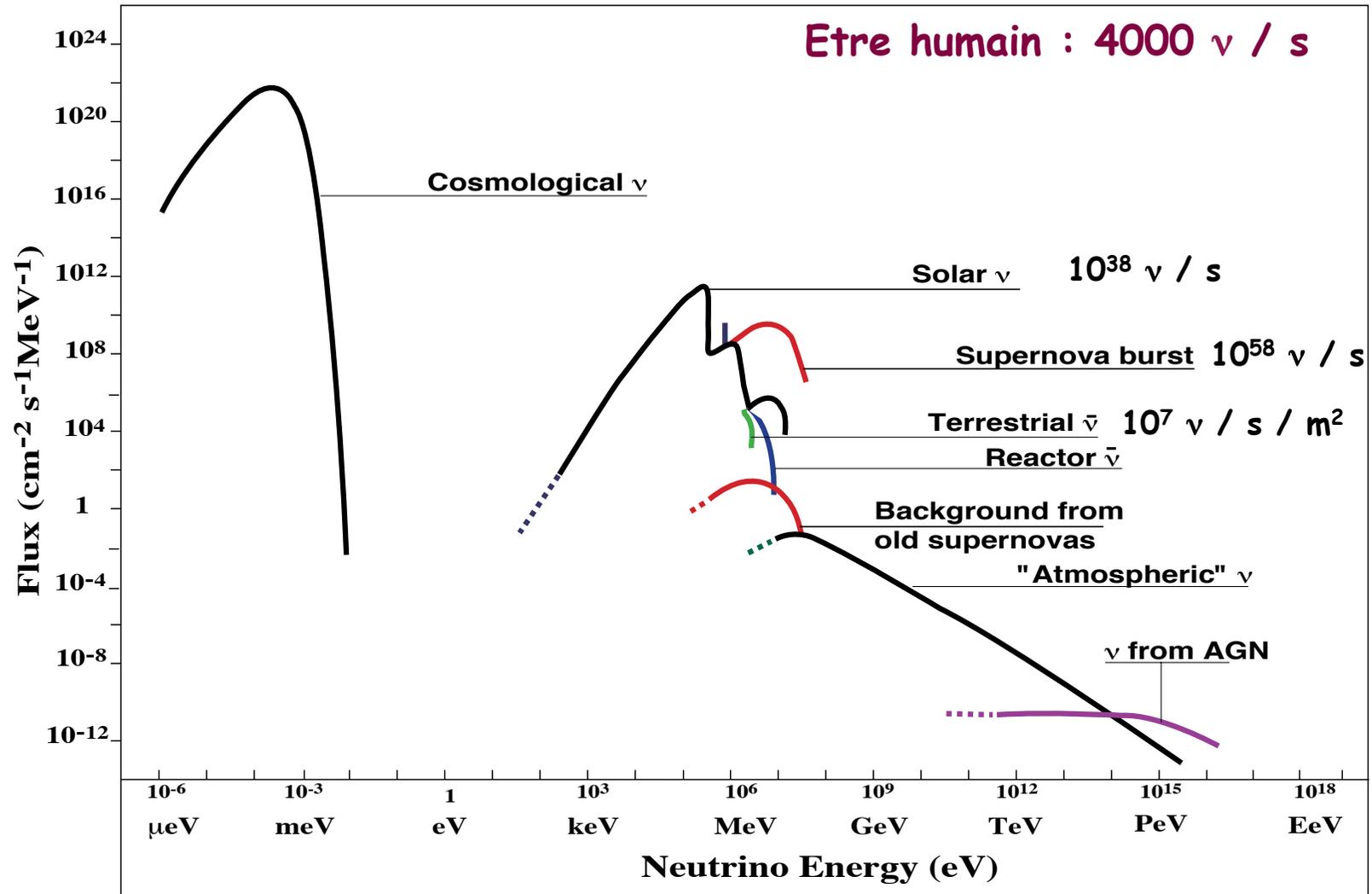
Bohr

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 β 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 de la cible

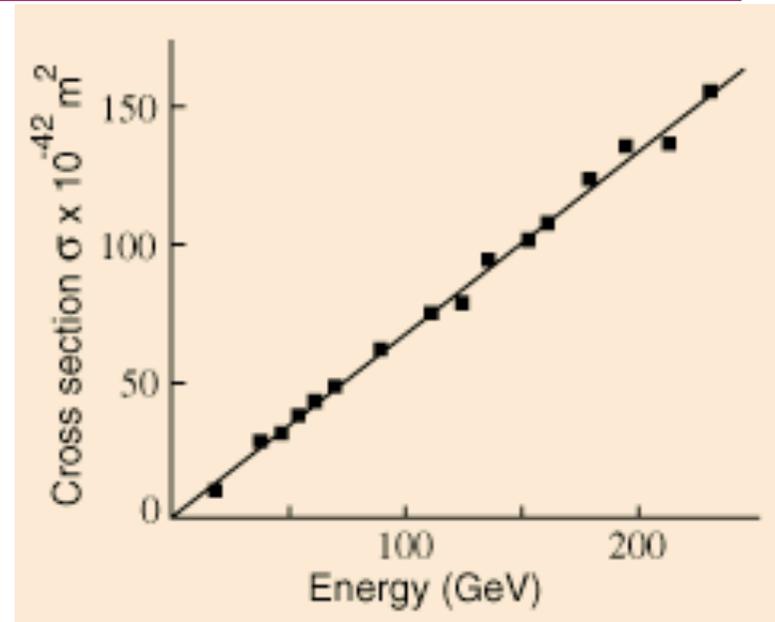
Libre parcours moyen $d = 1/N$

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

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

1 année-lumière ! 

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



Rappel historique

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

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

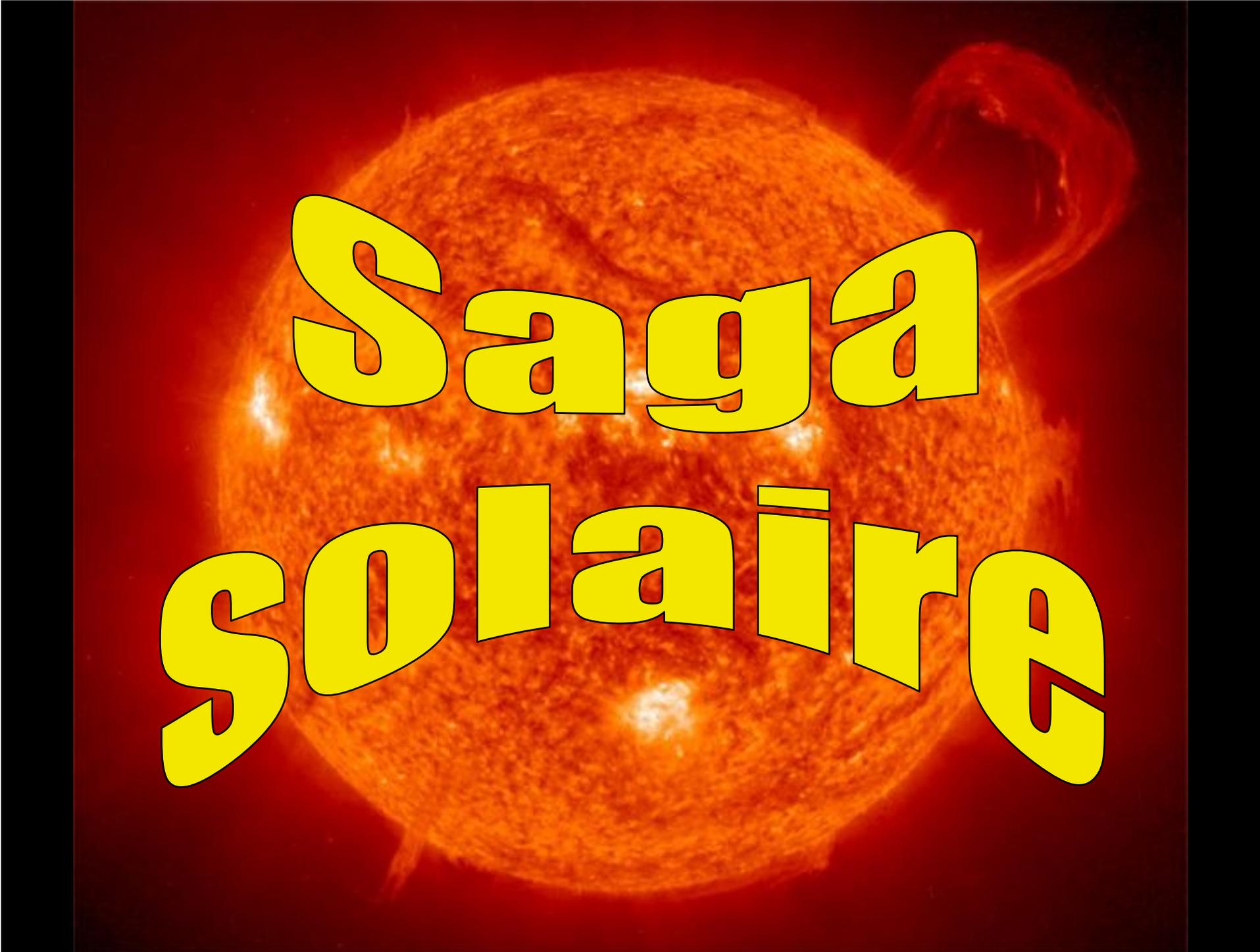
cuve 200l d'eau + cadmium
 $\bar{\nu} + \text{p} \rightarrow \text{n} + \text{e}^+$



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

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

« 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_{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: $t_{\text{Soleil}} \sim N_p \times E_p / L \sim 10^{57} \times 1 \text{ eV} / 3 \cdot 10^{26} \text{ W}$



$\sim 10\,000$ 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: $t_{\text{Soleil}} \sim U / L \sim (7.10^{-11})(2.10^{30})^2 / (7.10^8) / 3.10^{26} \text{ W}$



~ 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 $B \sim 1\text{MeV}$

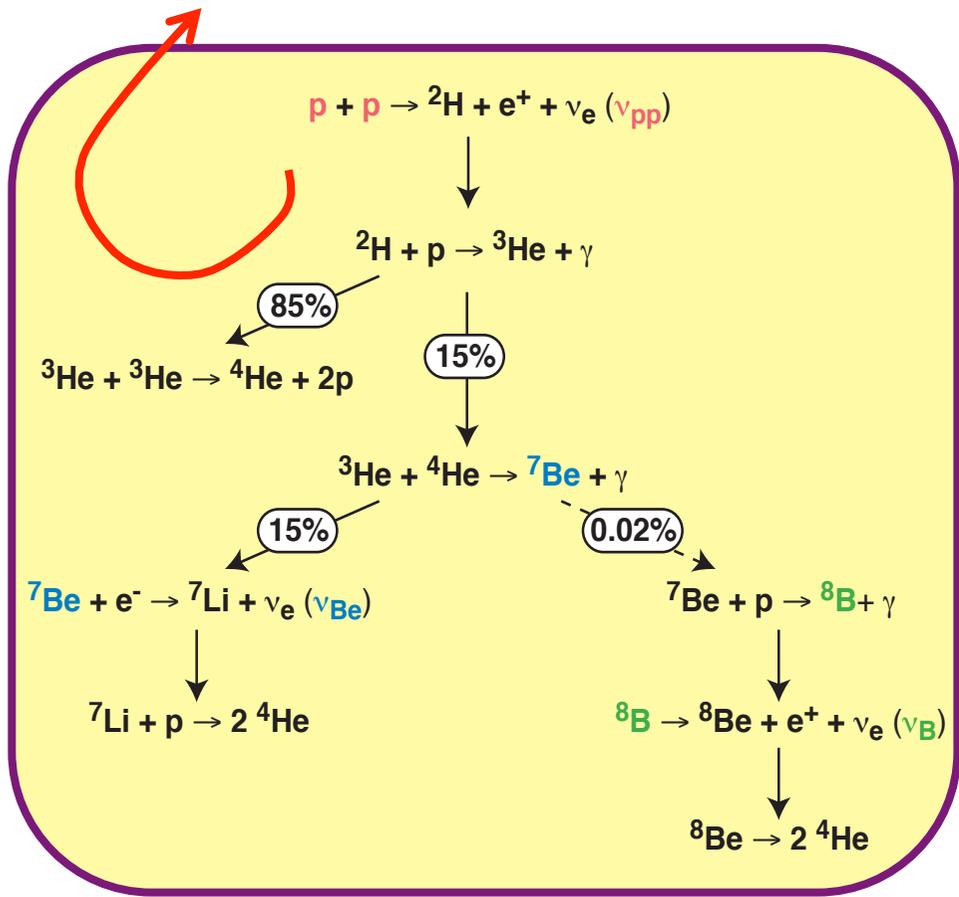
$$\text{Luminosité } L = 4\pi d^2 F$$
$$L \sim 3.10^{26}\text{W}$$

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

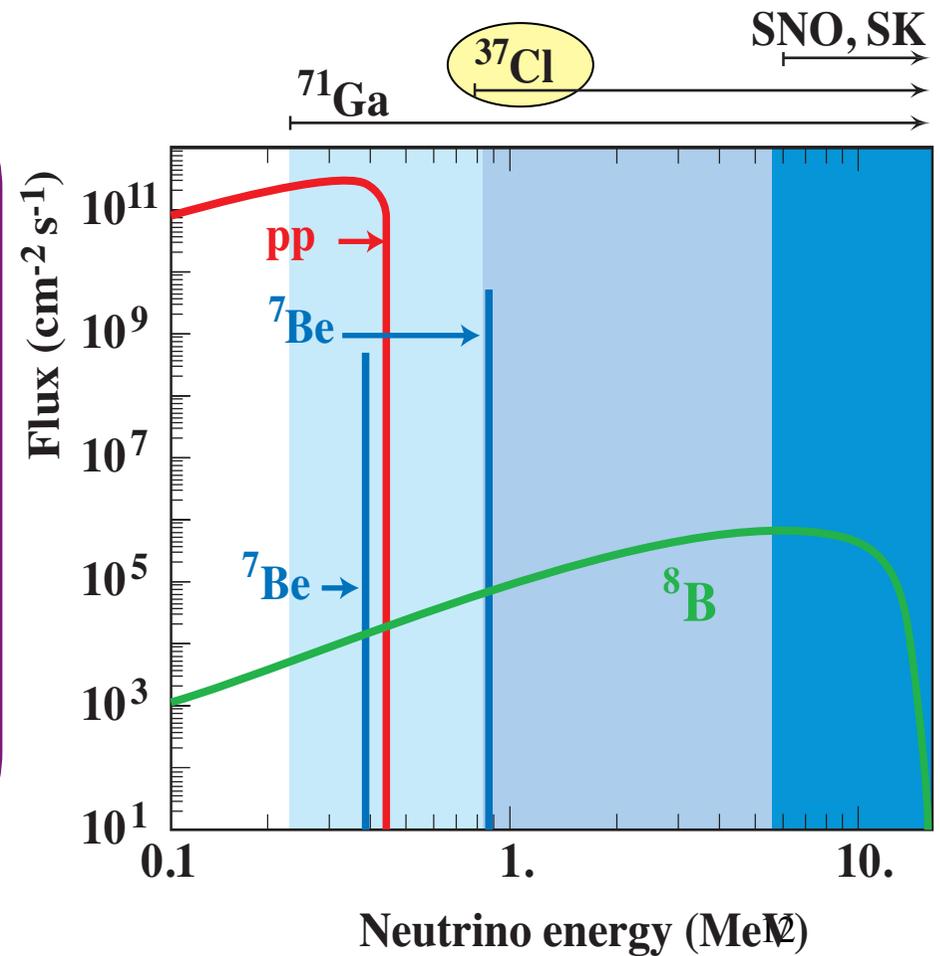


~ 10 milliards d'années

Neutrinos solaires



1960: Bahcall

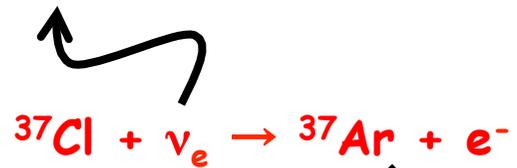


Neutrinos solaires

Homestake
Ray Davis

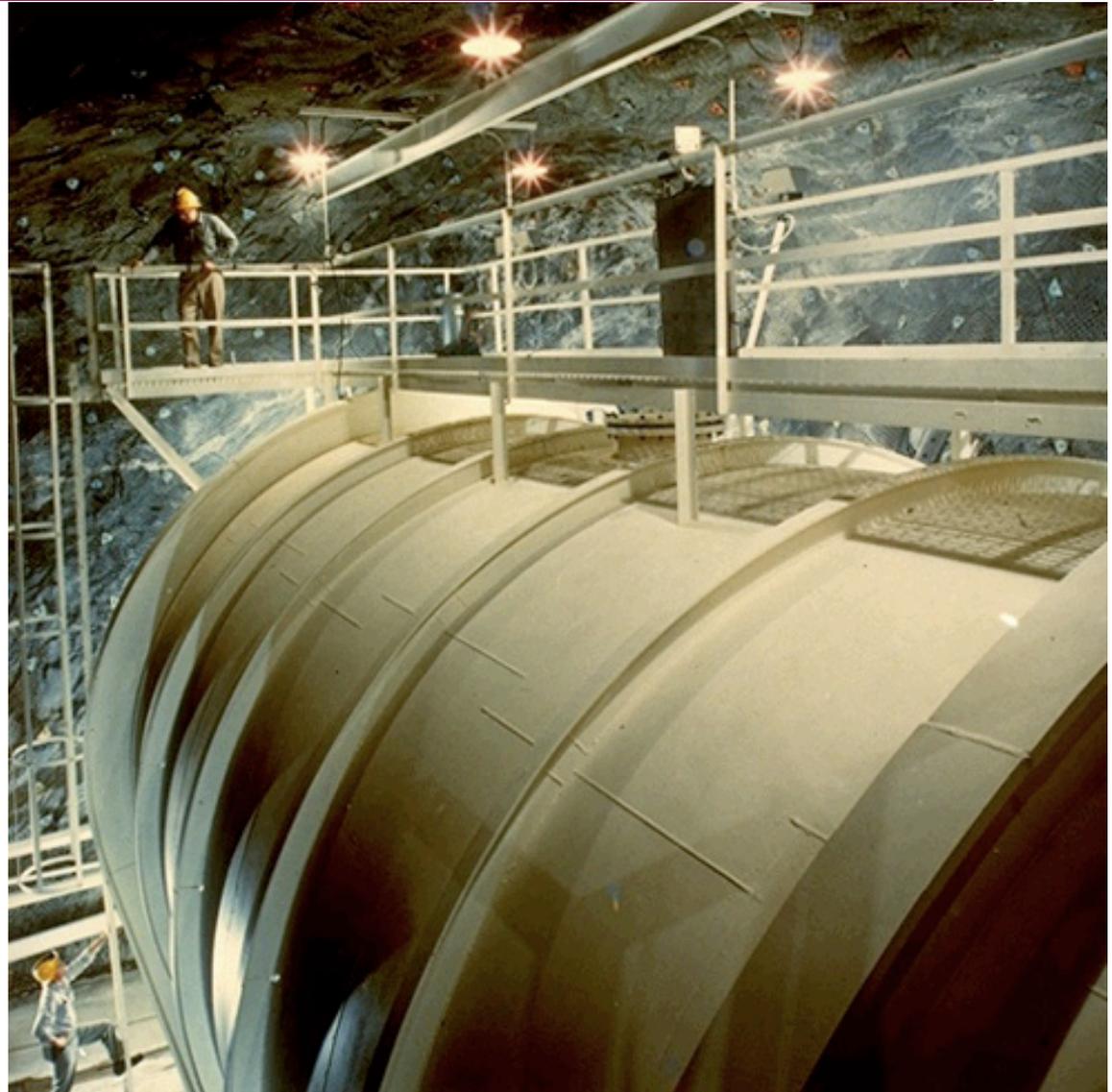
650 tonnes de C_2Cl_4

1 ν /jr (10^{18} traversant cuve)

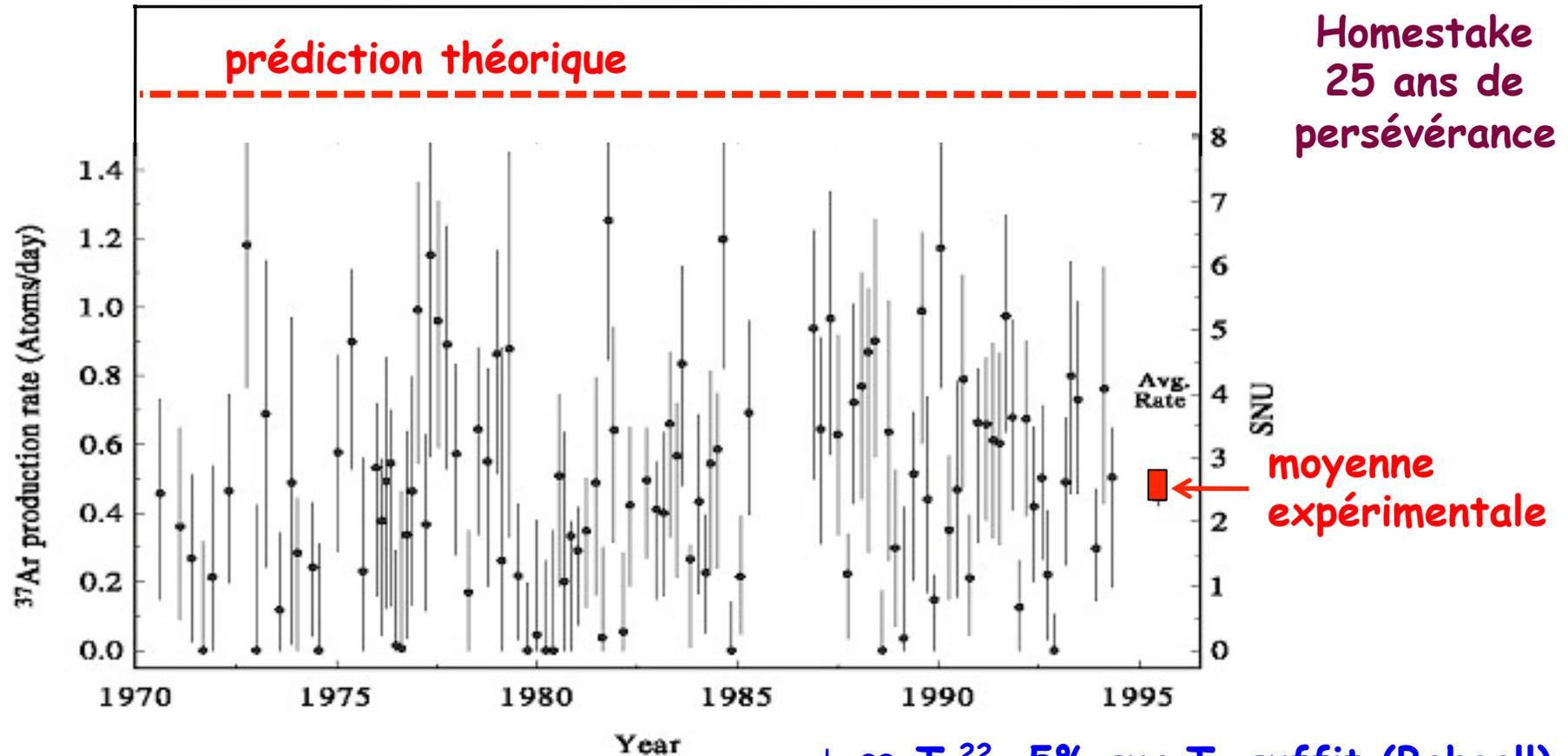


radioactif $\tau_{1/2} \sim 1$ mois

→ « Recherche de ν en provenance du Soleil » (1968)



Neutrinos solaires

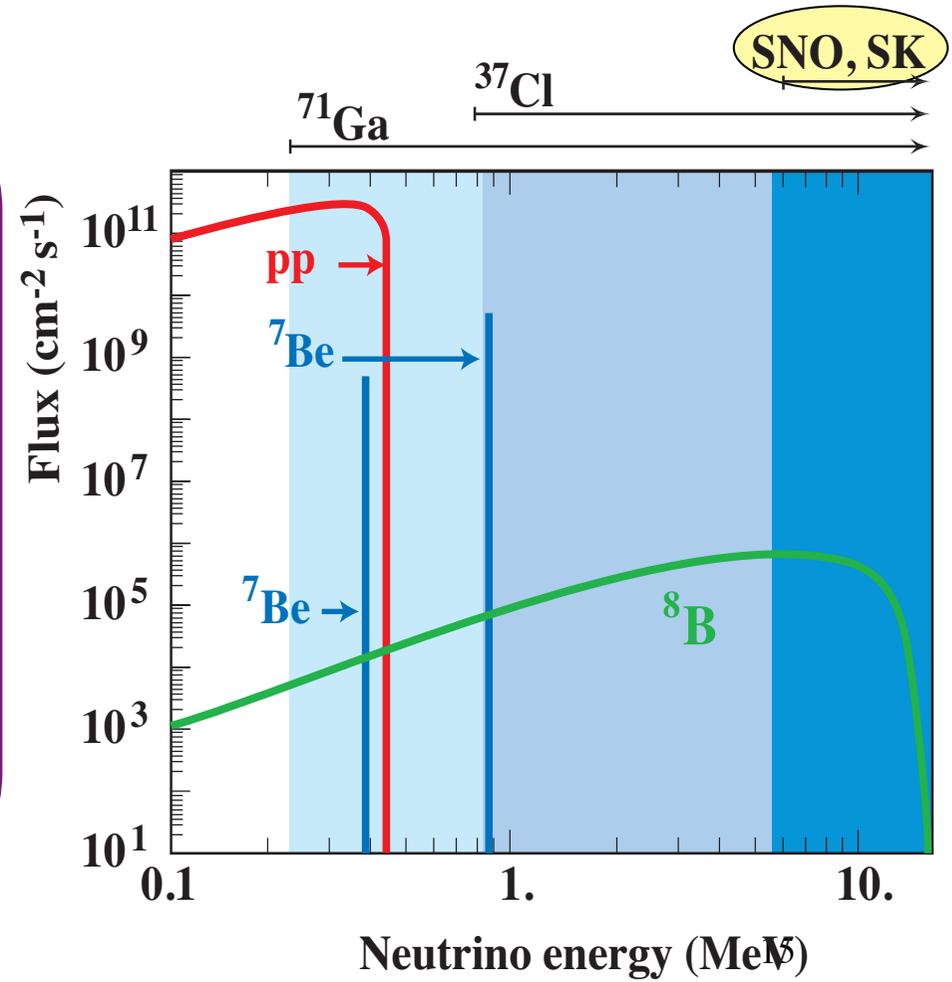
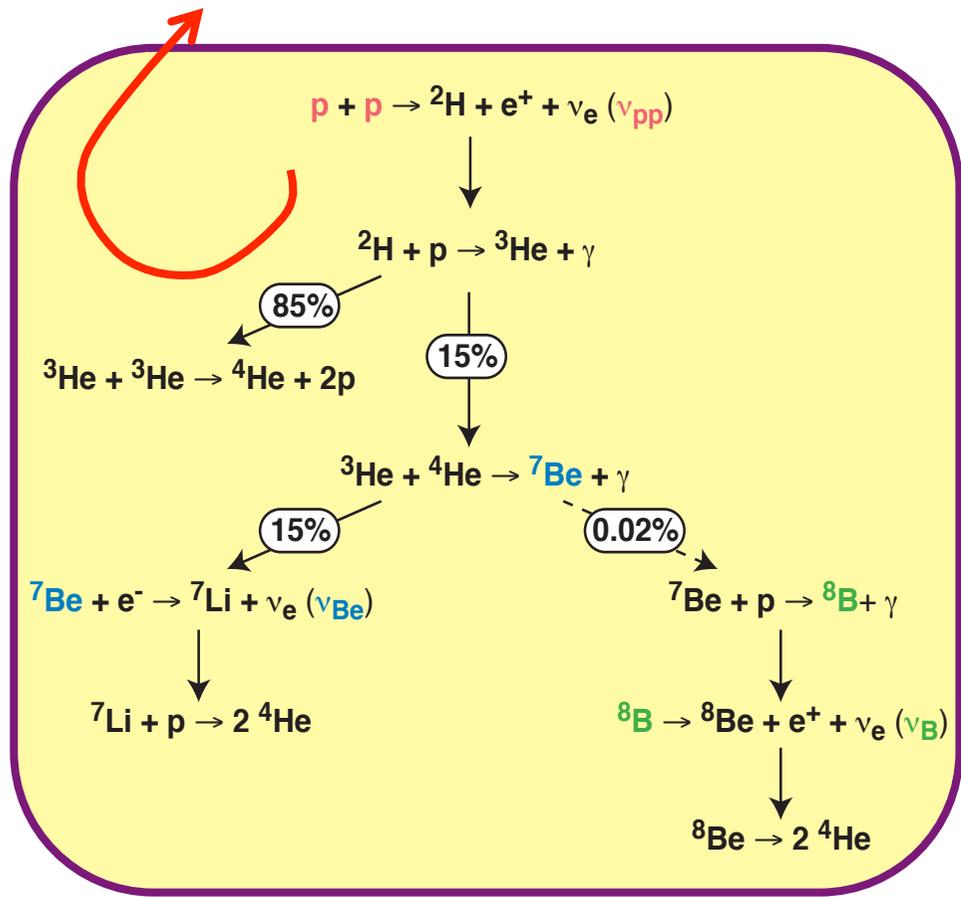


flux détecté = 30% flux prédit

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

pb expérimental? (Davis)

Neutrinos solaires



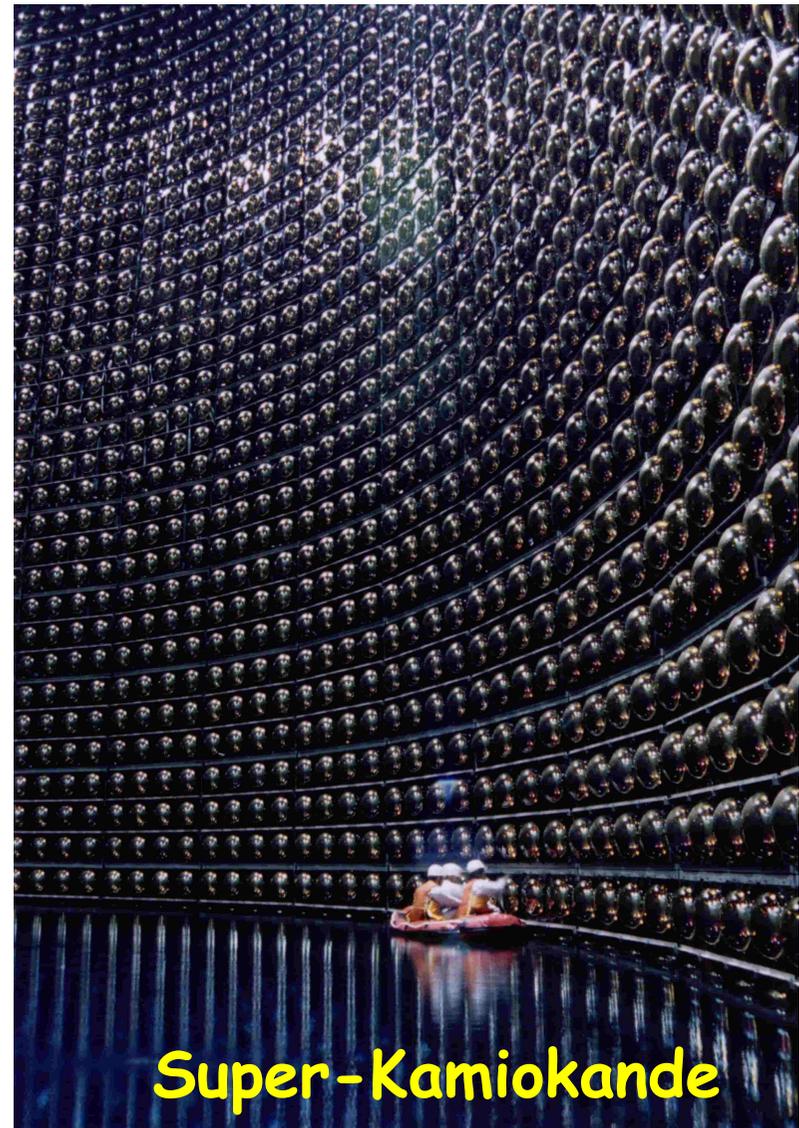
Neutrinos solaires

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



seuil = 6.5 MeV

(1986)

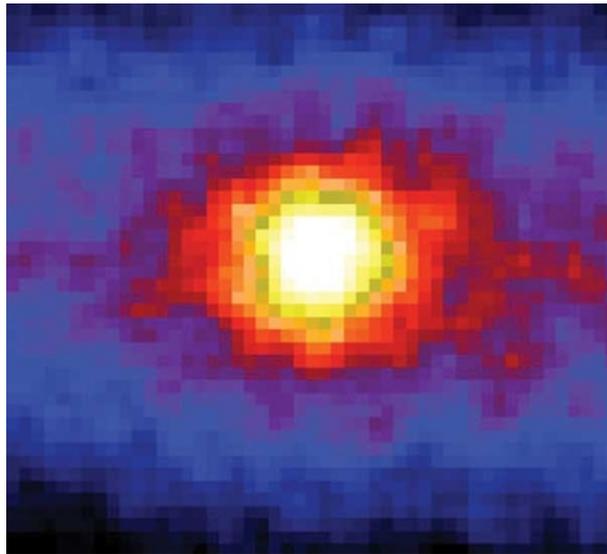


Super-Kamiokande

Neutrinos solaires

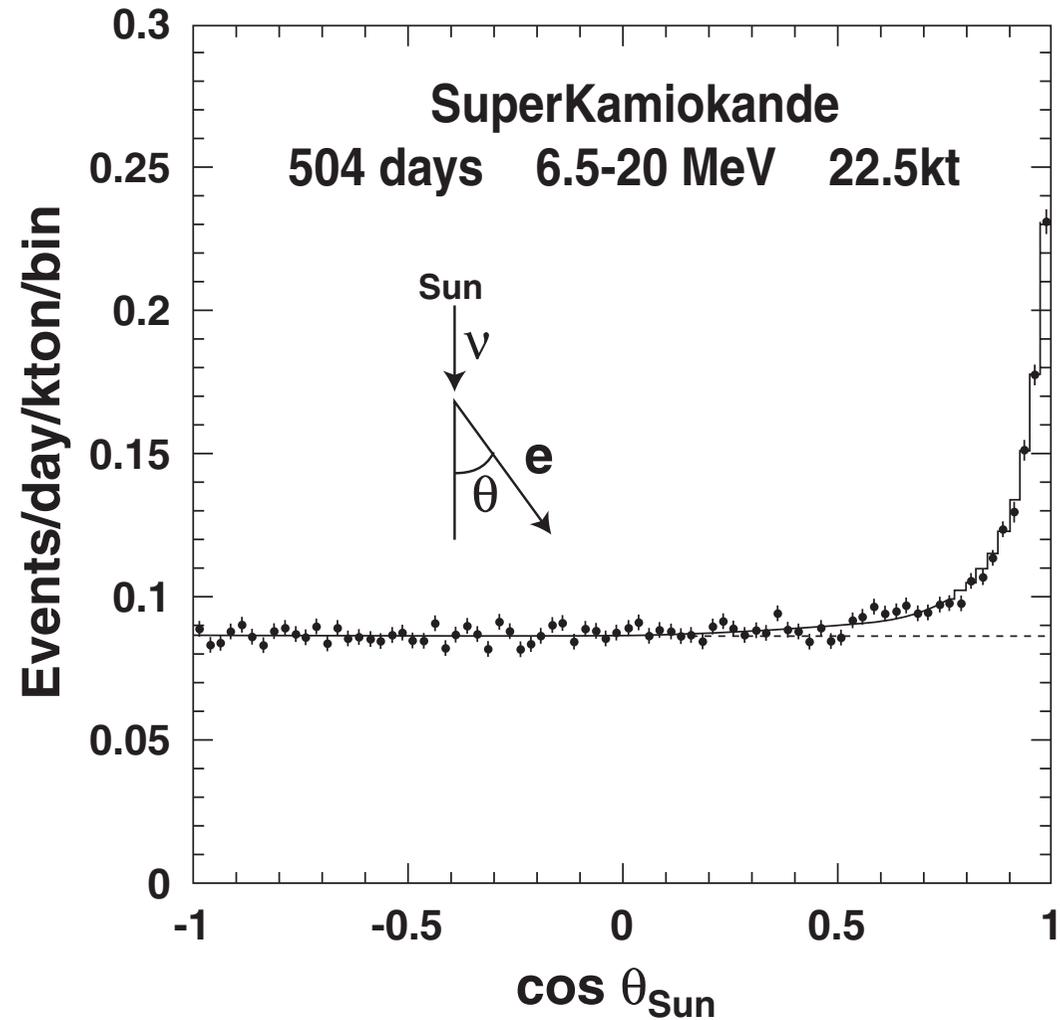
SuperKamiokande

-origine solaire confirmée



- déficit persistant

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



Neutrinos solaires: une piste

- 3 familles de neutrinos** (ν_e, ν_μ, ν_τ)
- LEP (largeur du boson Z)
 - Big Bang Nucleosynthesis

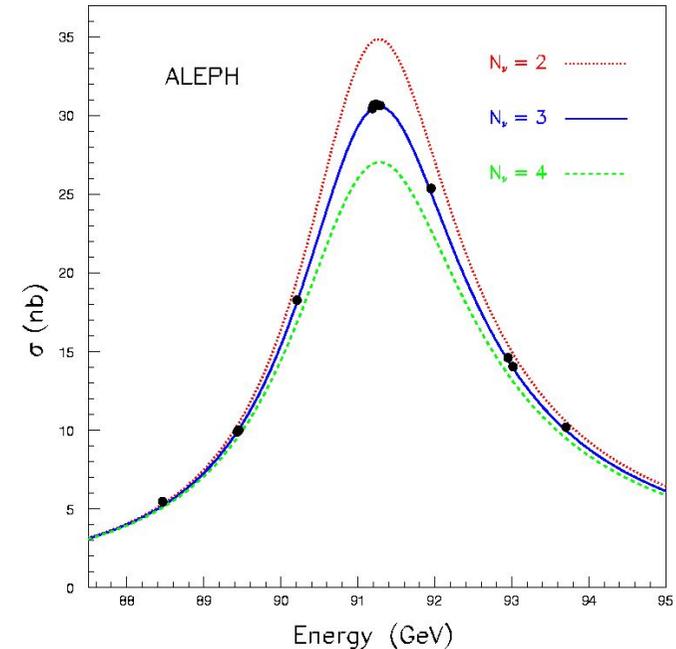
Etats propres (masse) \neq états propres (saveur)



propagation



détection



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

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

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

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 ν 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 ν_e émis par le Soleil soit encore un ν_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

- $|\nu_i(t)\rangle = |\nu_i(t=0)\rangle e^{-iE_i t}$ propagation état propre ($i=1,2$)
 - $E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p(1 + m_i^2 / 2p^2) \approx E + m_i^2 / 2E$ pour ν relativiste ($m \ll p \sim E$), au 1^{er} ordre en m_i^2
 - $|\nu(t)\rangle = e^{-iEt} \left(\cos\theta |\nu_1\rangle e^{-im_1^2 t/2E} + \sin\theta |\nu_2\rangle e^{-im_2^2 t/2E} \right)$ $|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$
 - $|\nu(t)\rangle = e^{-iEt - i(m_1^2 + m_2^2)t/4E} \left(\cos\theta |\nu_1\rangle e^{i\delta m^2 t/4E} + \sin\theta |\nu_2\rangle e^{-i\delta m^2 t/4E} \right)$
 - où $\delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$
 - Probabilité qu'un ν_e émis par le Soleil soit encore un ν_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

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

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

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

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

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

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

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

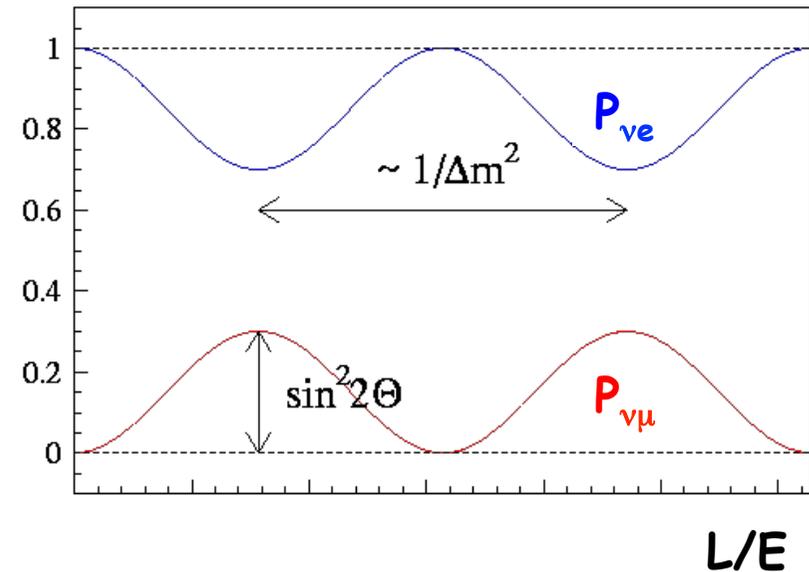
Pontecorvo 1958 :
« une piste pour réduire
le flux des ν solaires... »

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



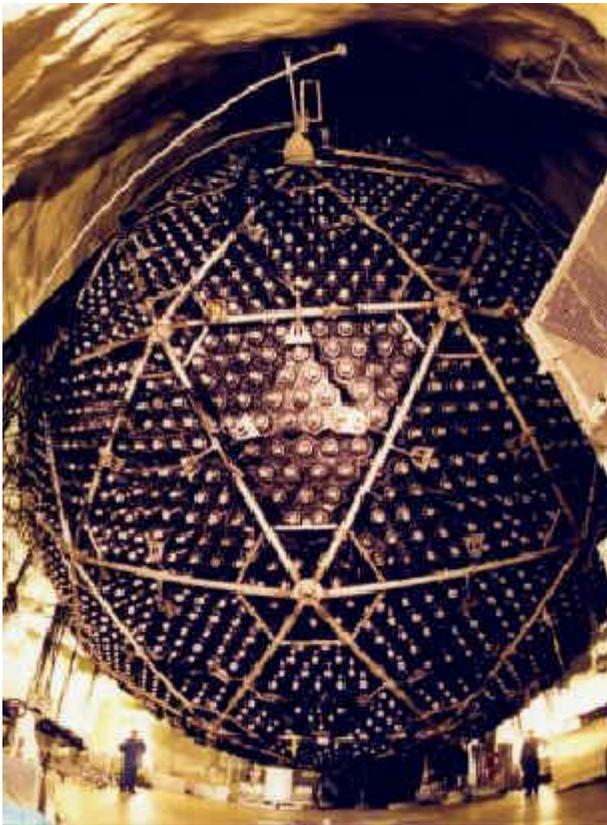
$\Rightarrow 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$
en moyenne si
 $L_{\text{Terre-Soleil}} \gg L_{\text{osc}} = 4\pi E / \delta m^2 \quad (= 4\pi \hbar c E / \delta m^2 c^4)$



Faut détecter les différents saveurs de ν !

Neutrinos solaires: énigme résolue

SNO: mille tonnes de D_2O \longrightarrow Sensibilité aux différents saveurs de ν



Diffusion élastique (DE)



Courant chargé (CC)



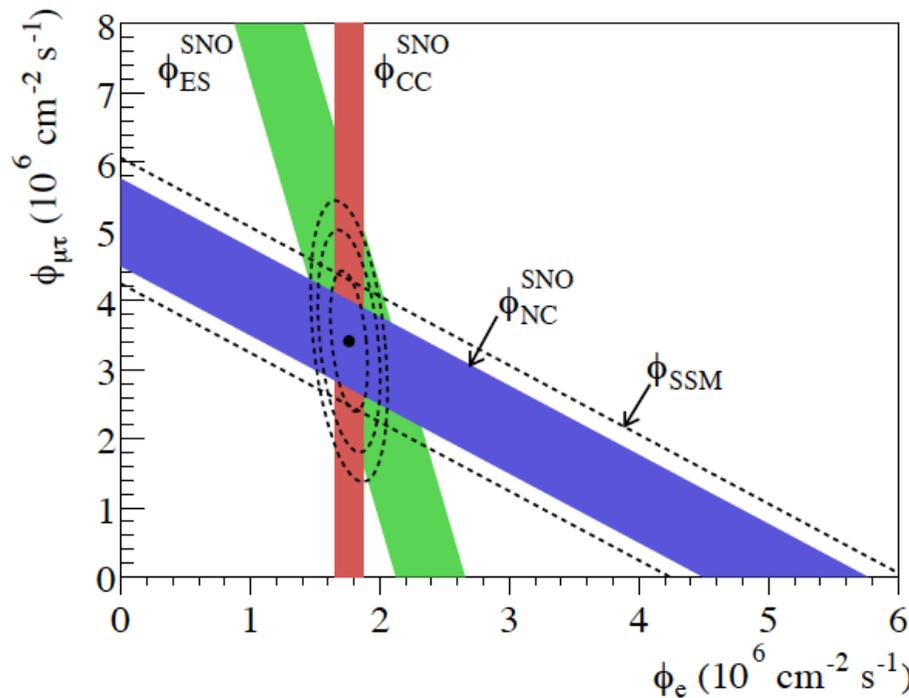
Courant neutre (CN)

Radiochimique : CC uniquement sur Cl ou Ga, ν_e

Cerenkov: DE avec sensibilité aux ν_μ et ν_τ
(taux $\nu_e = 6x$ taux ν_μ ou ν_τ)

2000m sous terre

Neutrinos solaires: énigme résolue



$\nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-$ Diffusion élastique (DE)

$\nu_e + d \rightarrow e^- + p + p$ Courant chargé (CC)

$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$ Courant neutre (CN)

Flux total (CN) en accord avec modèles solaires

Mais 2/3 des ν_e du Soleil

$\rightarrow \nu_\mu$ ou ν_τ lorsqu'ils atteignent la Terre

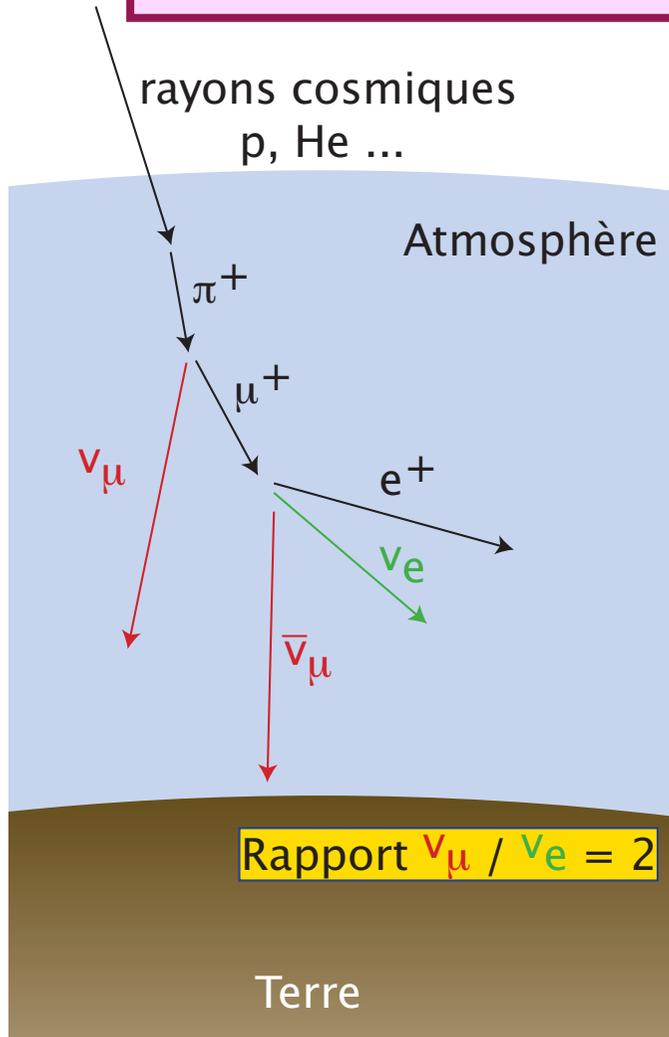
Oscillation $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu\tau}$

Nobel 2002 (Davis, Koshiba)

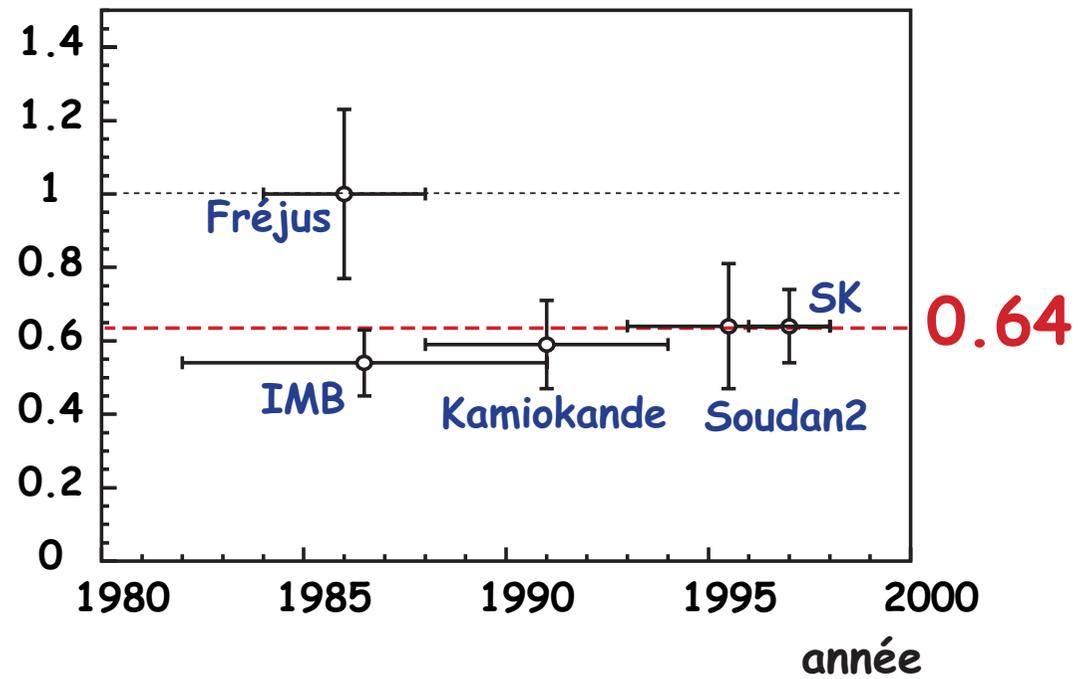


Autres oscillations

Neutrinos atmosphériques

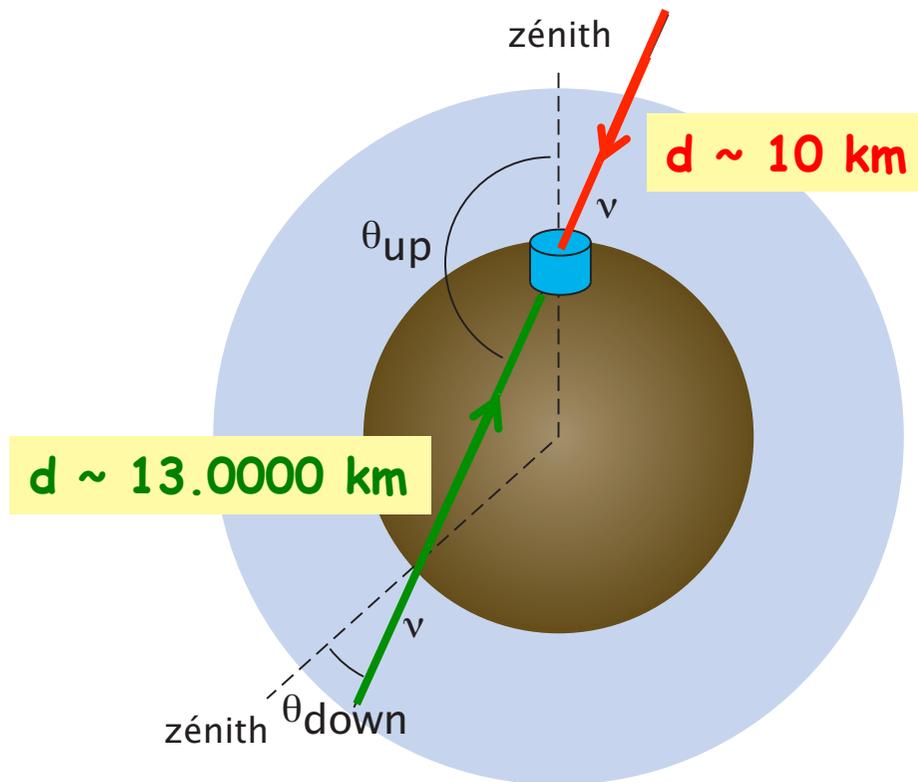


$\frac{(\mu / e) \text{ data}}{(\mu / e) \text{ MC}}$



Neutrinos atmosphériques

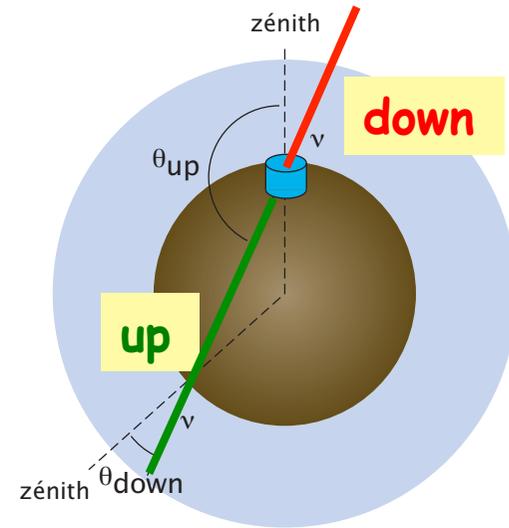
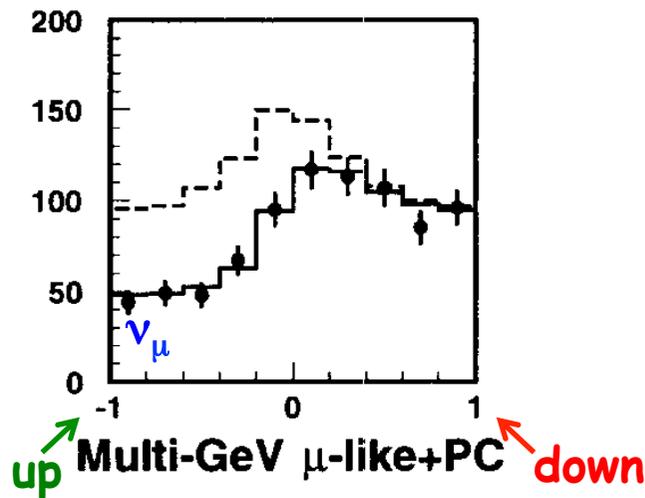
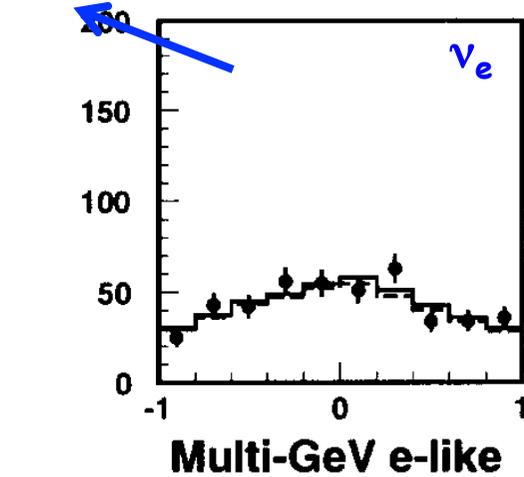
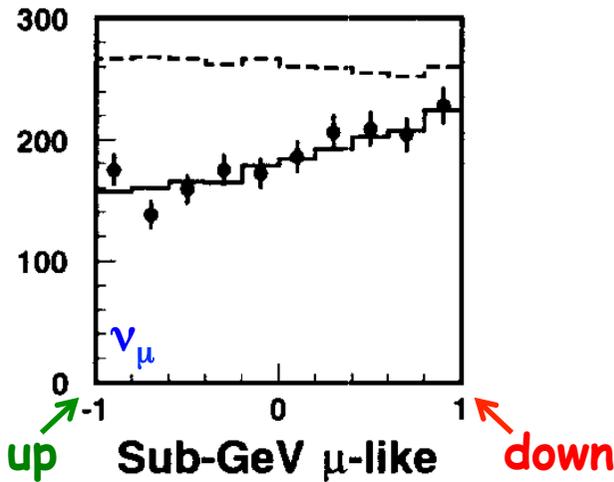
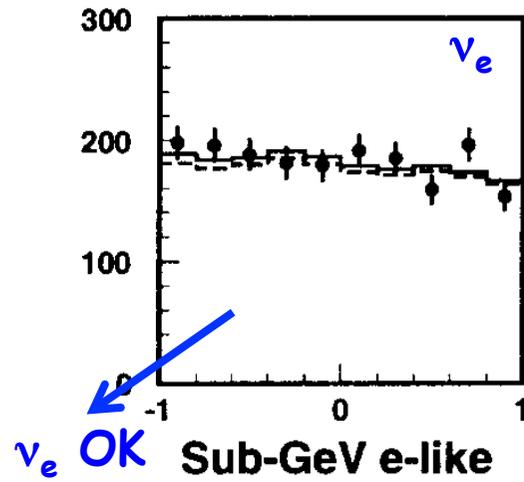
Dépendance angulaire
au niveau du détecteur



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

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

Toutes les facettes du neutrino

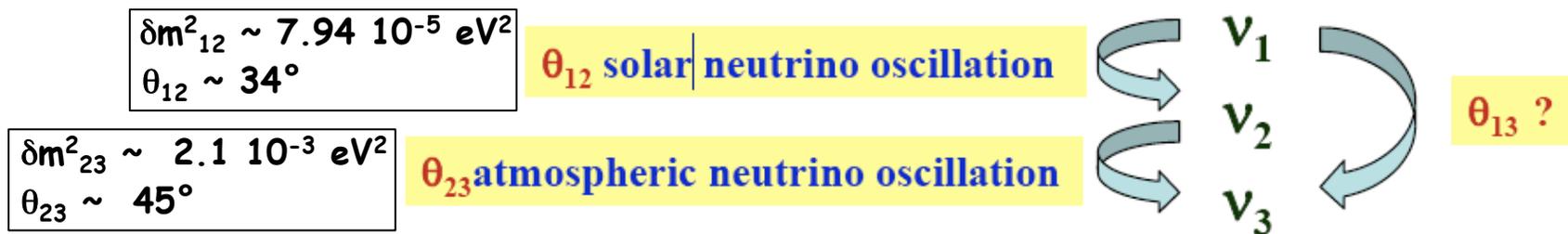
Matrice PMNS de mélange des neutrinos
(Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata)

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

Atmosphérique Solaire

Paramètres inconnus: θ_{13}, δ

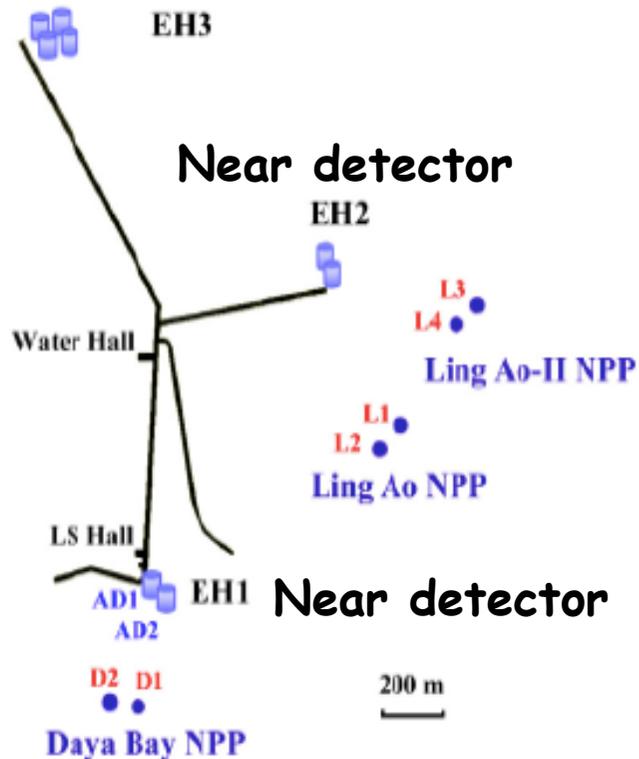
Une nouvelle oscillation?



Neutrinos de réacteurs: Daya Bay

(Mars 2012)

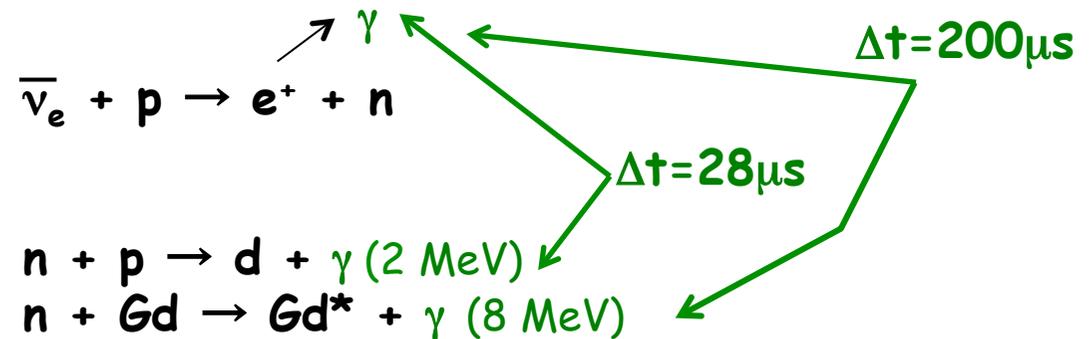
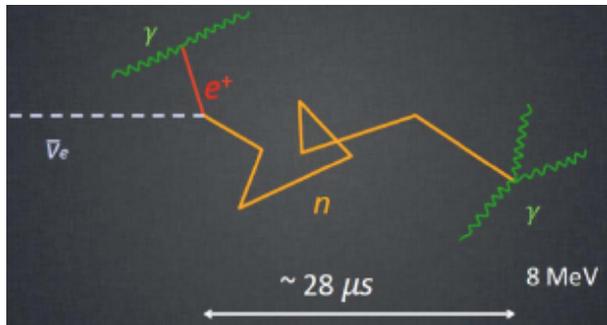
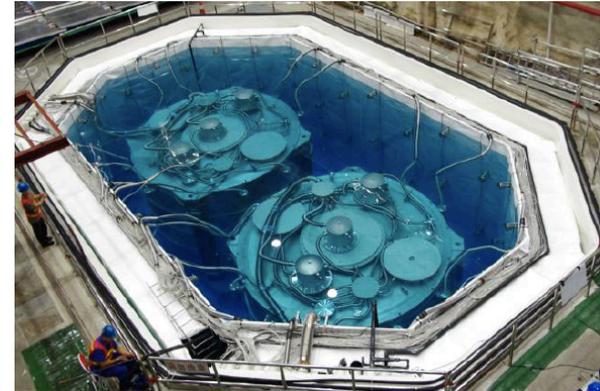
Far detector



- **6 réacteurs nucléaires**
- **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)

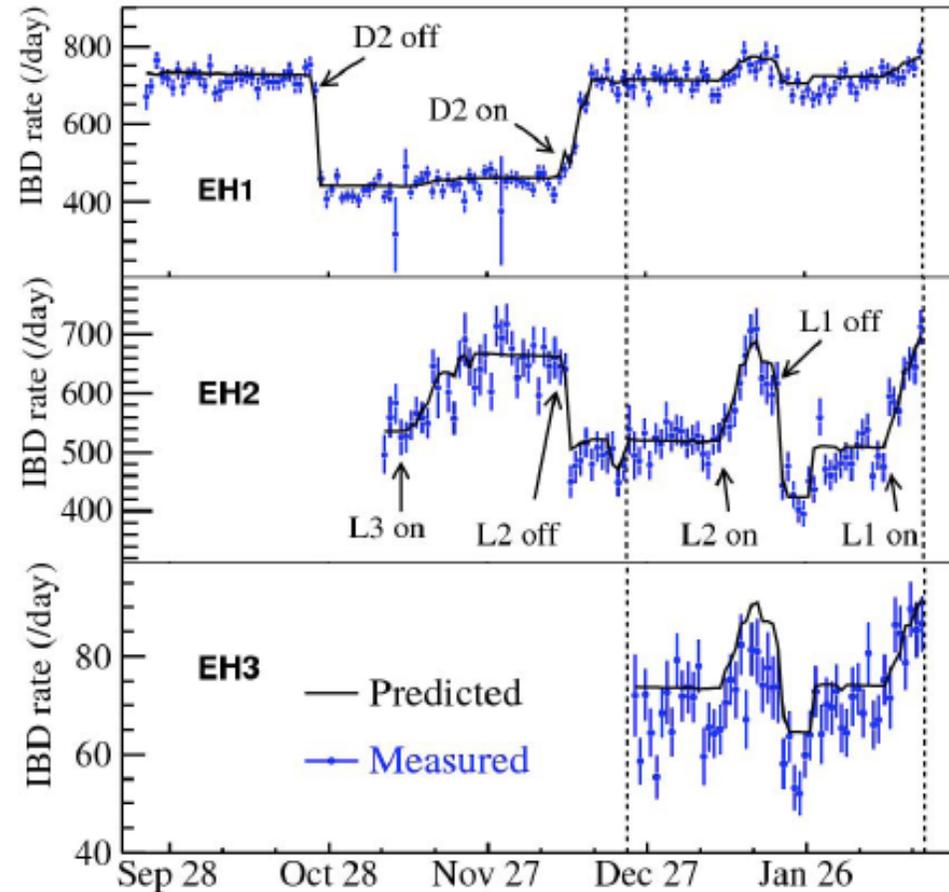
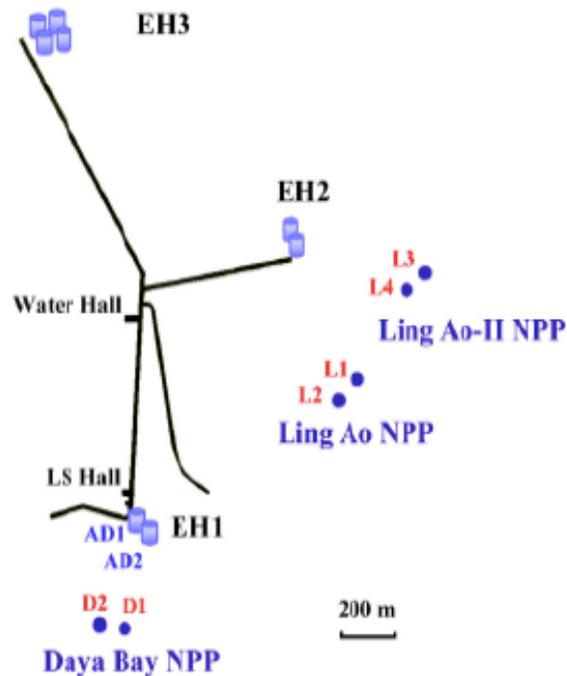
Neutrinos de réacteurs: Daya Bay

Scintillateurs liquides au Gd



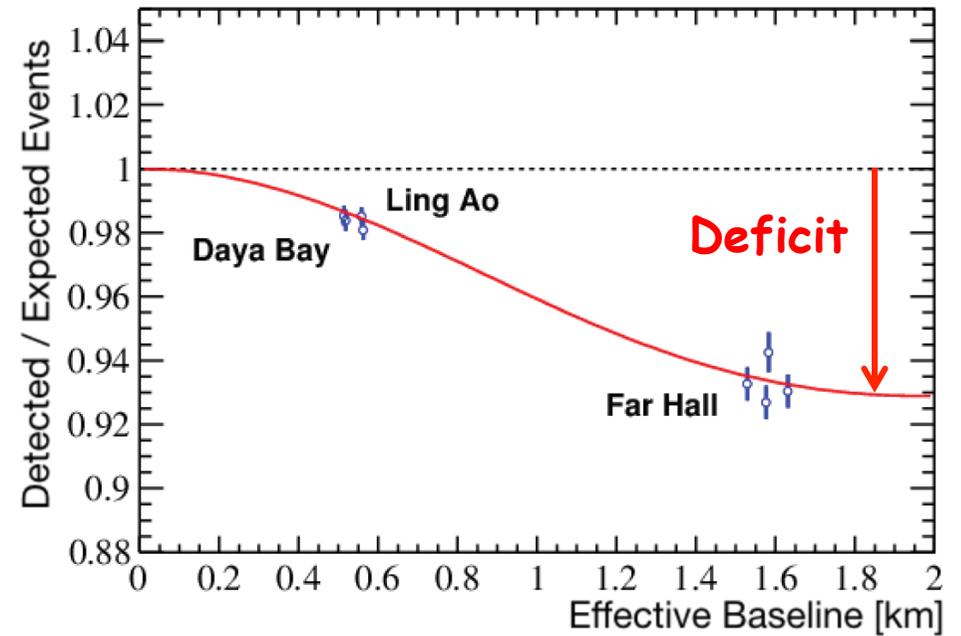
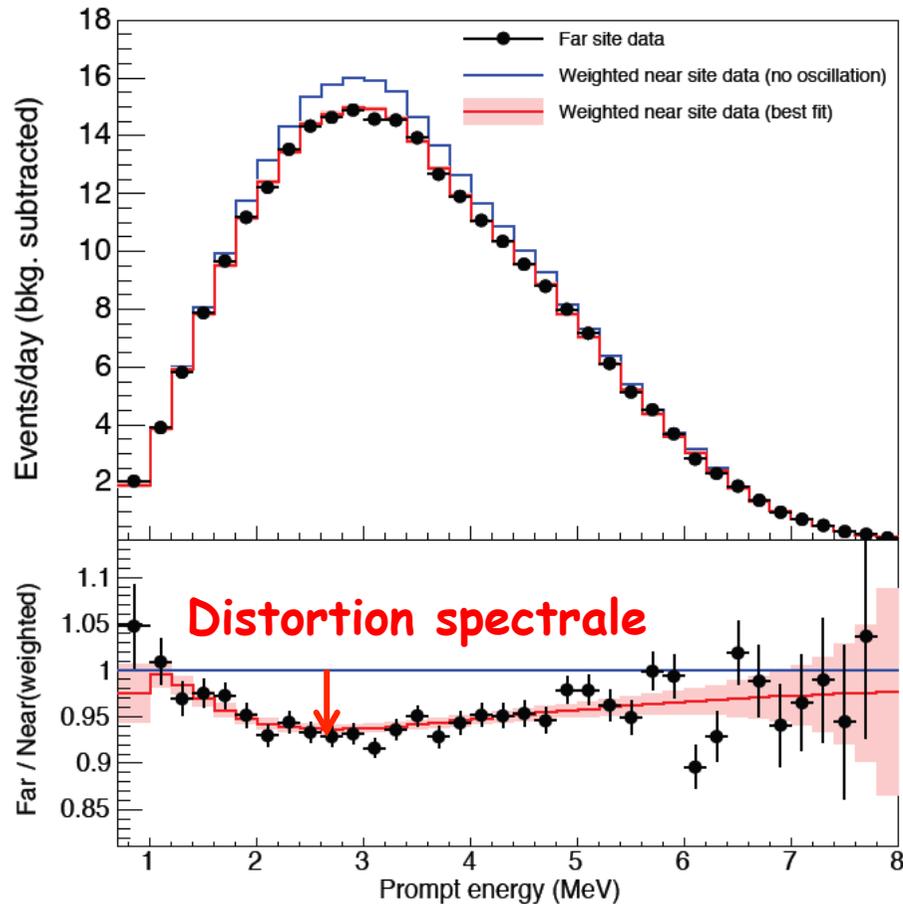
Détection des neutrinos :
Coïncidence en **temps**, **espace** et **énergie**

Neutrinos de réacteurs: Daya Bay



Mesures des flux sur détecteurs proches
Prédictions pour site lointain

Neutrinos de réacteurs: Daya Bay



→ Oscillation à 3 neutrinos

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

- Mesure la plus précise de θ_{13} :

$$\begin{aligned} \sin^2 2\theta_{13} &= 0.084 \pm 0.005 \\ \chi^2 / \text{NDF} &= 135 / 146 \end{aligned}$$



Bilan sur les neutrinos

Bilan oscillations des ν

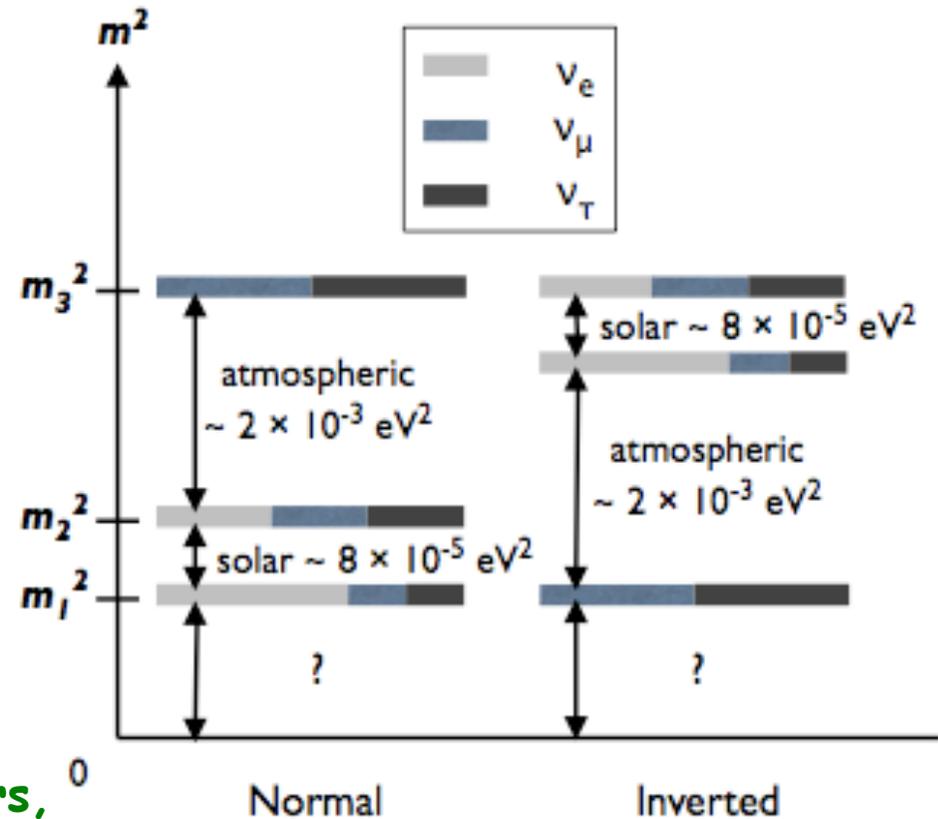
- m_ν non nulle (oscillations)
- Mesure δm^2 et non m
→ 2 scénarios de hiérarchie des m
- ν atmosphériques \Rightarrow
>1 ν à $m > 0.05 \text{ eV}$ ($=\text{sqrt}(\delta m^2_{23})$)

Limites en laboratoire
(désintégration β du Tritium):

$$m(\nu_e) < \sim 2 \text{ eV}$$

$$\text{KATRIN} \rightarrow 0.2 \text{ eV}$$

- 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 ν ($n_\nu m_\nu$) serait de
l'ordre de la masse totale des étoiles !

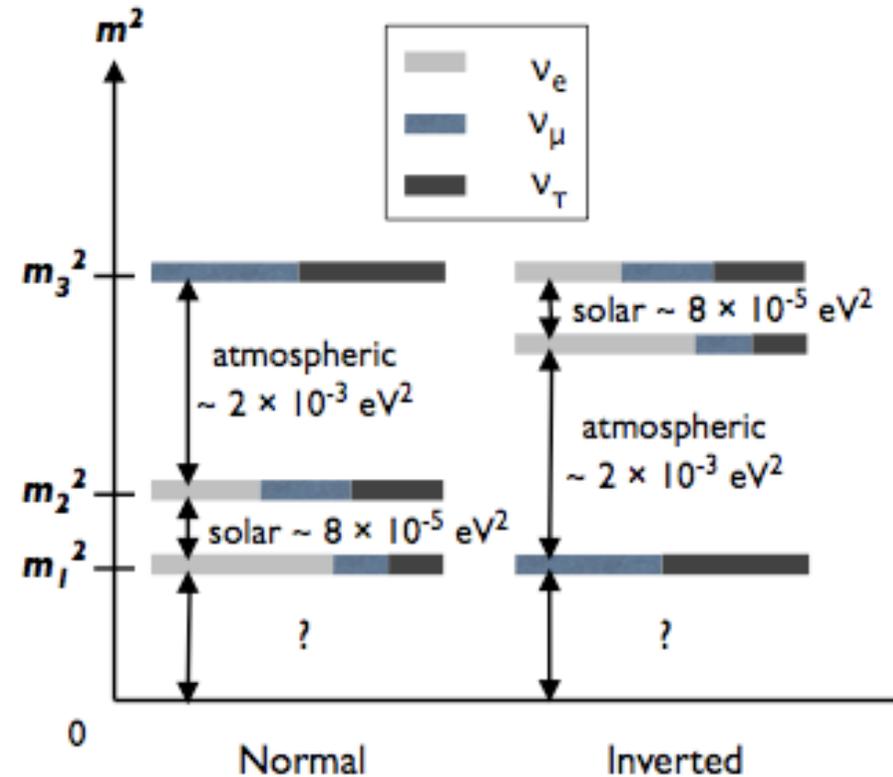


Bilan oscillations des ν

- m_ν non nulle (oscillations)

- Mesure δm^2 et non m

→ 2 scenarios de hiérarchie des masses



- 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 ν ($n_\nu m_\nu$) serait de l'ordre de la masse totale des étoiles !

Bilan oscillations des ν

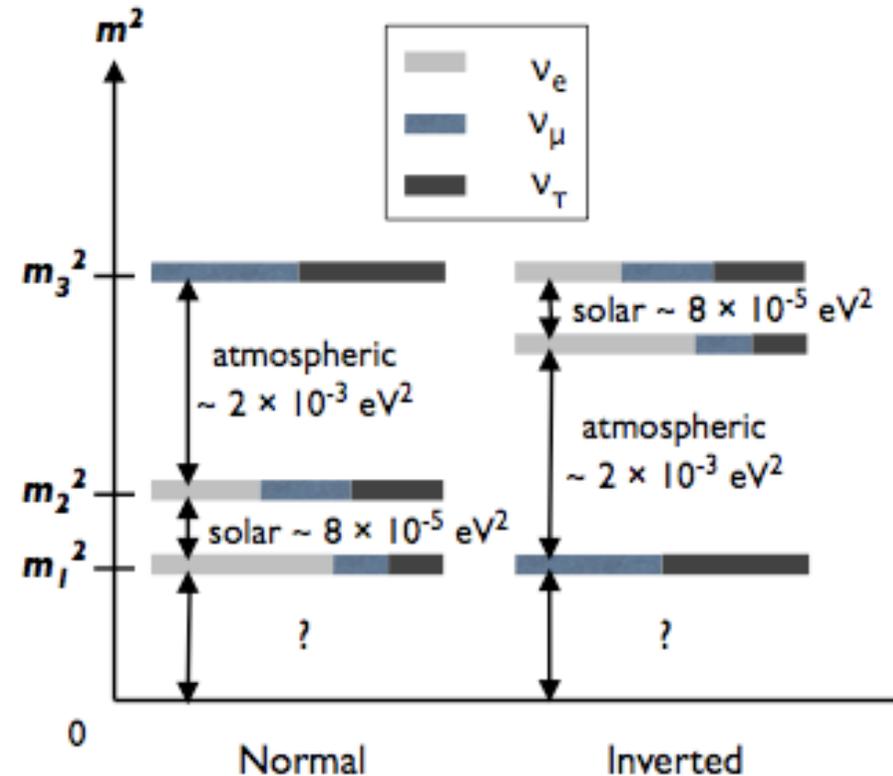
Mesure des masses ?

- ν atmosphériques $\Rightarrow m_{\min} = \sqrt{\delta m_{23}^2}$
au moins 1ν à $m > 0.05 \text{ eV}$
- Limites en laboratoire
(désintégration β du Tritium):
 $m(\nu_e) < 2 \text{ eV}$ (KATRIN $\rightarrow 0.2 \text{ eV}$)

$$\rightarrow 0.06 \text{ eV} < \Sigma m_\nu < 6 \text{ eV}$$

δm^2 oscillations

β -decay



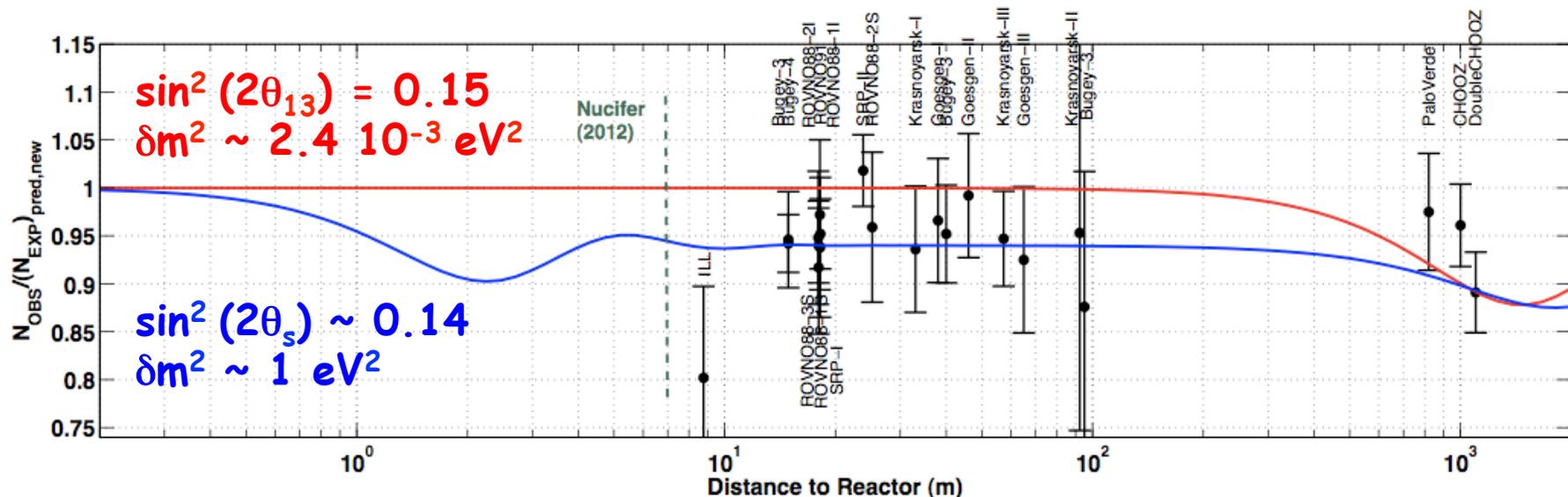
Un neutrino stérile?

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

→ augmentation de $\sim 3\%$ des flux de ν prédits

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

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



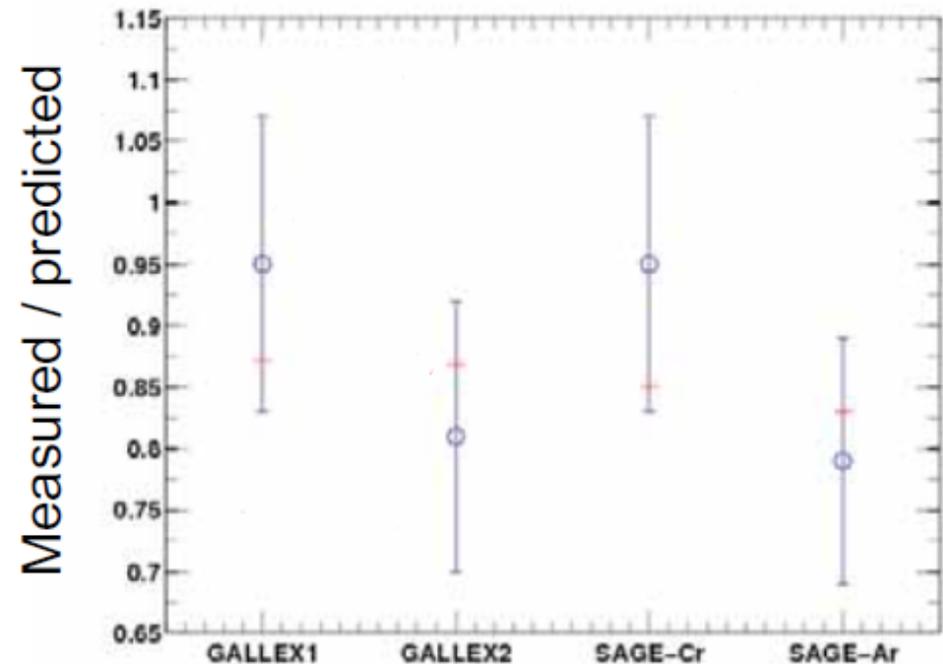
Un neutrino stérile?

"L'anomalie Gallium"

Sources radioactives intenses de ν_e
(^{51}Cr et ^{37}Ar) dans GALLEX, SAGE

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

Mesures systématiquement
inférieures aux prédictions (2.7σ)
→ compatible avec n stérile
de masse ~ 1 eV



A quel point maîtrisons-nous les efficacités des méthodes radiochimiques?

The background of the slide is a dark, deep blue space filled with stars and a prominent galaxy. The galaxy's spiral arms are visible, glowing with a mix of purple, blue, and red light. Several bright stars are scattered throughout the scene, with one particularly bright star in the lower-left quadrant showing a distinct four-pointed diffraction pattern.

Neutrinos
Dans l'Univers

Evolution stellaire

Combustion cœur de l'étoile

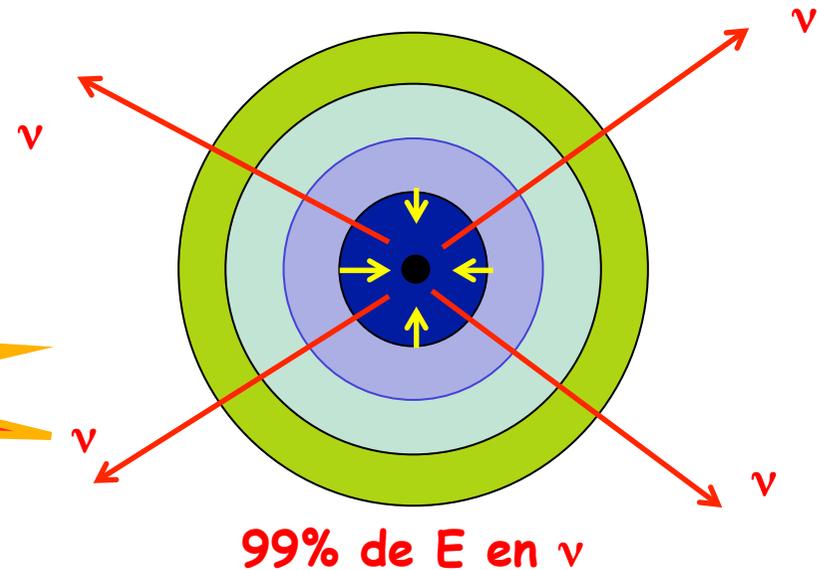
→ Augmentation masse du cœur de Fe
(vs. pression de dégénérescence des e^-)

Masse cœur > 1.4 Msoleil

→ Effondrement catastrophique
(stoppé par dégénérescence des n)

Onde de choc

Emission de ν par
capture électronique: $p + e^- \rightarrow n + \nu$



galaxie
lointaine



© Anglo-Australian Observatory



SN 1987A

© Anglo-Australian Observatory

1987A

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

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

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

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

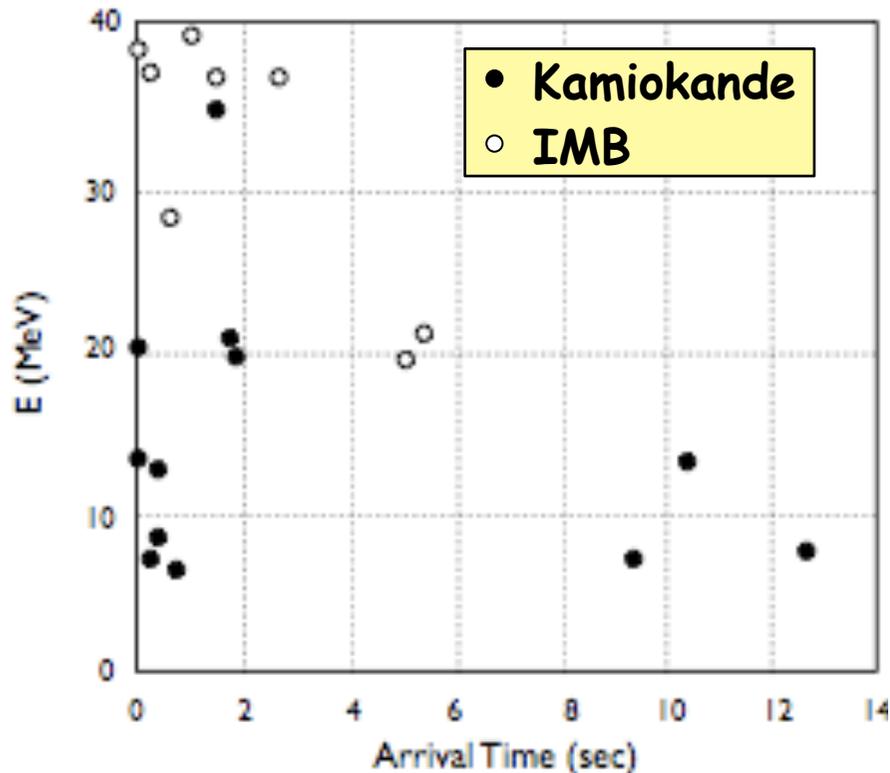
Donc contrainte sur m_ν à partir de $\Delta t / \Delta E$:

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

1987A

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

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



$d = 160.000 \text{ a.l.} \sim 5 \cdot 10^{21} \text{ m}$

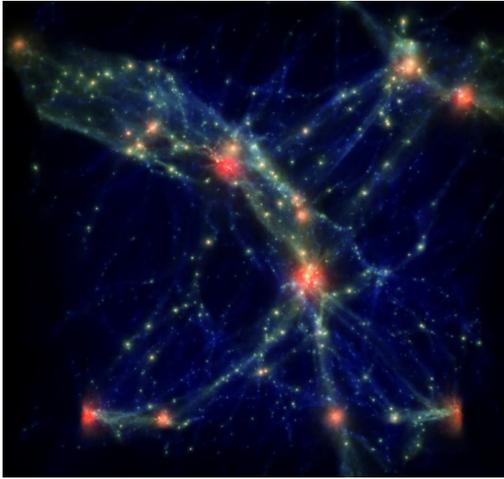
$E \sim 20 \text{ MeV} \sim \Delta E$

$\Delta t < 12s$

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

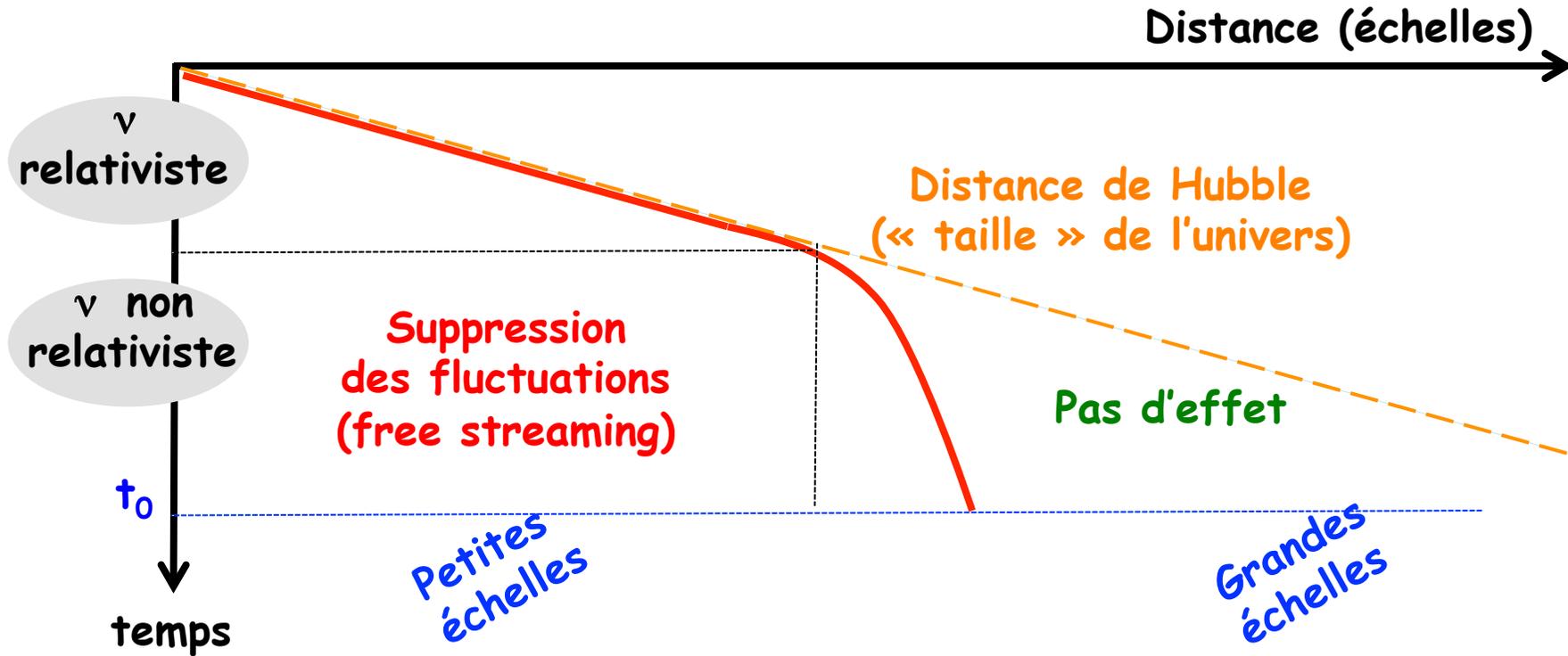
SN dans galaxie

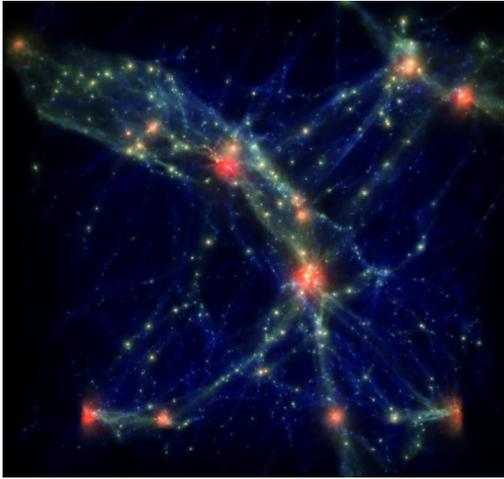
→ contraintes $\sim \text{eV}$ sur $m(\nu)$



Neutrinos et cosmologie

- Neutrinos massifs mais m_ν petit
- relativistes durant essentiel de histoire de l'Univers
- $\delta_\nu \sim 0$ à grand z (free streaming)





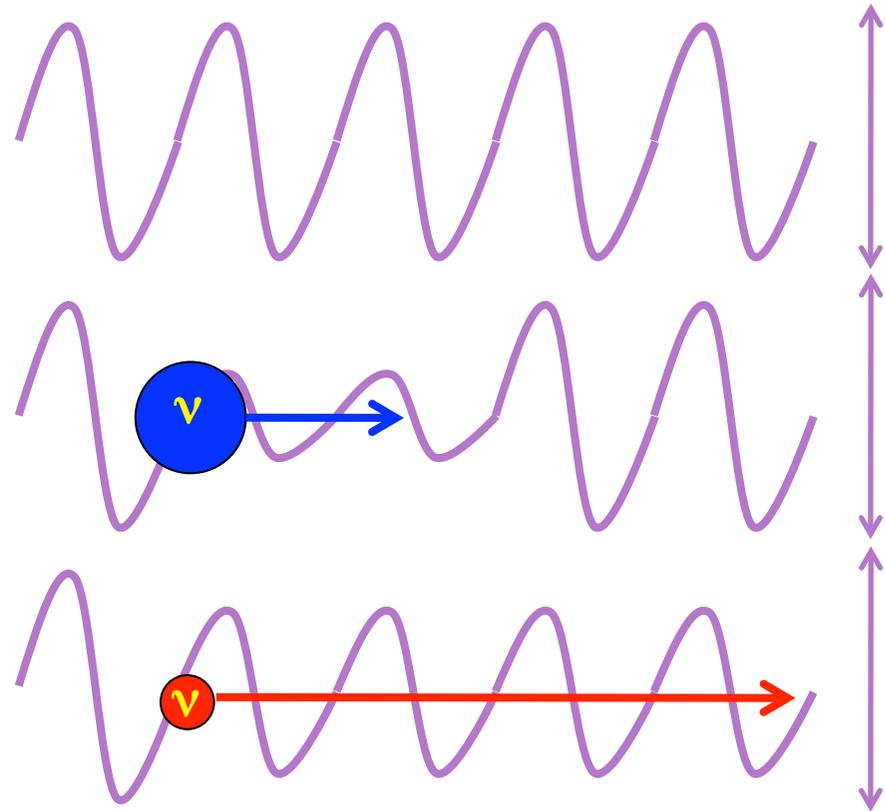
Neutrinos et cosmologie

Neutrinos massifs mais m_ν petit

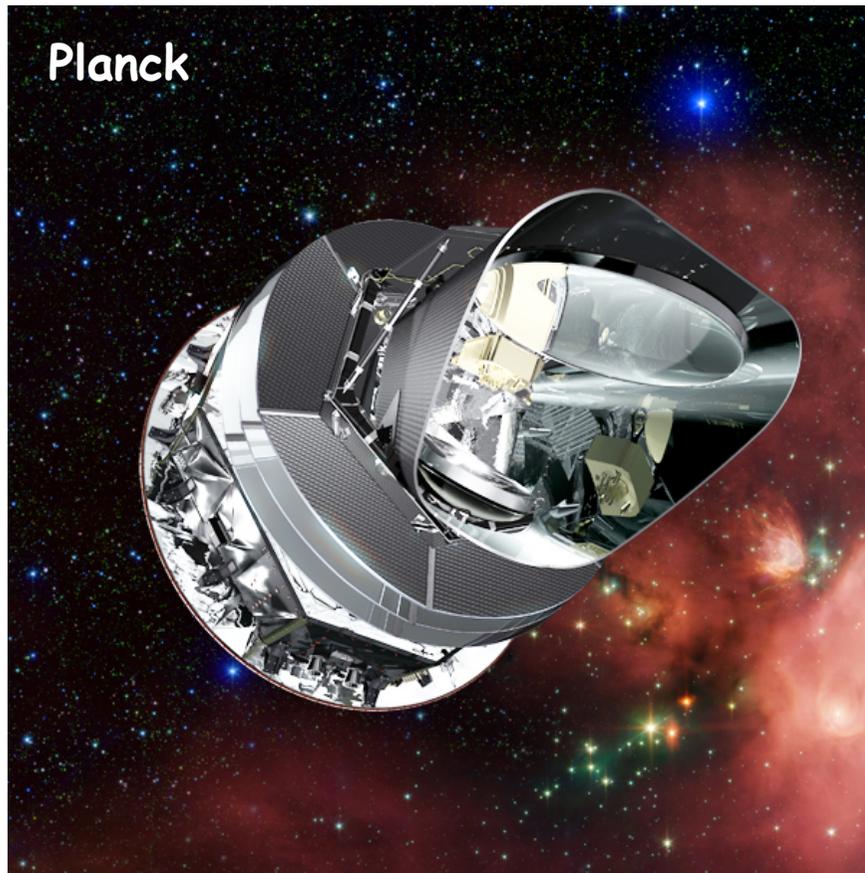
→ relativistes durant essentiel de histoire de l'Univers

→ $\delta_\nu \sim 0$ à grand z (free streaming)

- Croissance des structures (sous effet du potentiel gravitationnel) réduite par diffusion des ν (free-streaming)
- Si neutrinos lourds:
Forte suppression
($\Delta P/P = -8 \Omega_\nu / \Omega_m$)
sur petites échelles
- Si neutrinos légers:
Légère suppression
sur échelles plus grandes



Neutrinos et cosmologie



Planck

$z = 1100$
 $t = 380.000$ ans

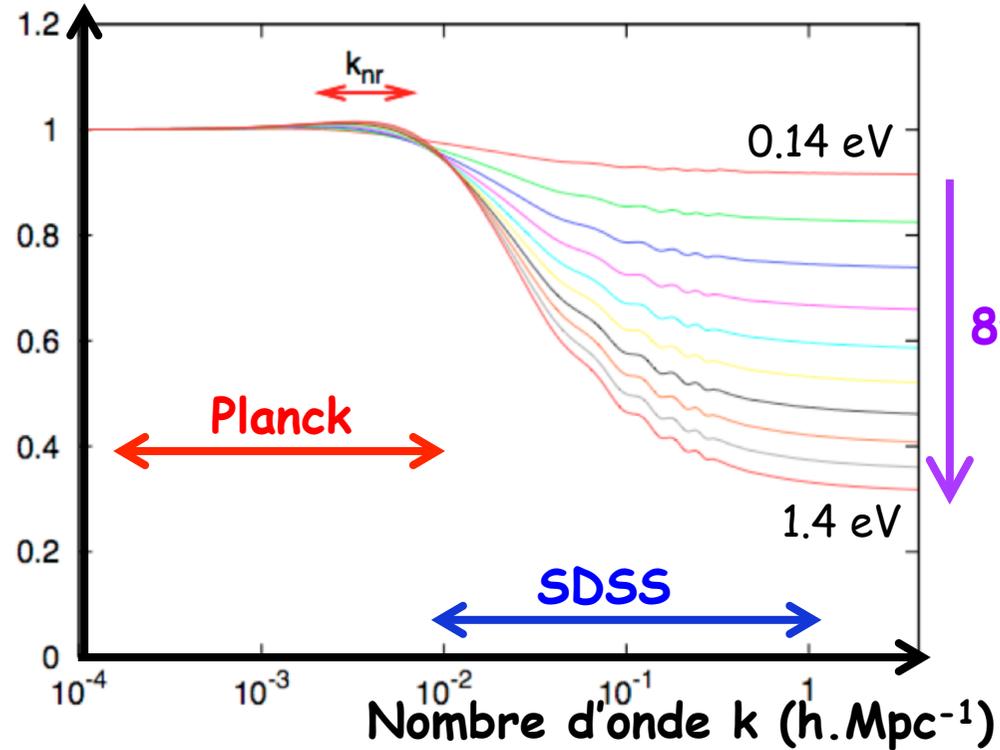


SDSS
(BOSS)

$z = 0 - 5$
 $t = 13.8$ milliards d'années
- 1.1 milliards d'années

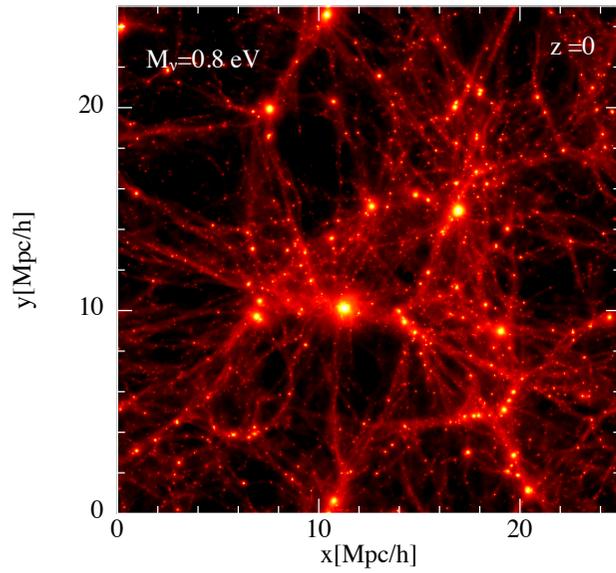
Neutrinos et cosmologie

$P(k)$ avec ν massifs / $P(k)$ sans ν

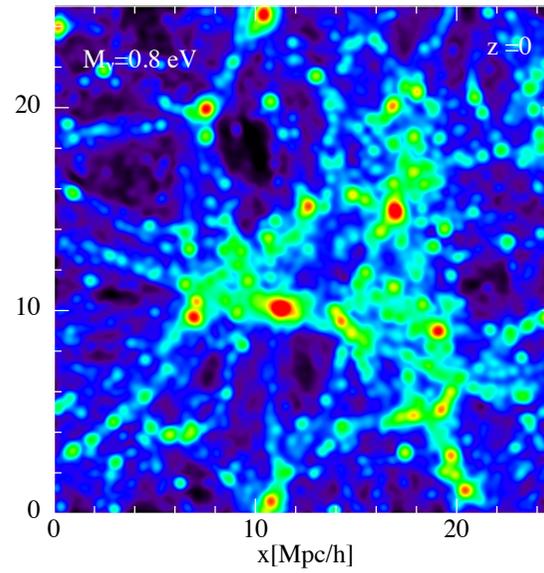


Grandes
échelles

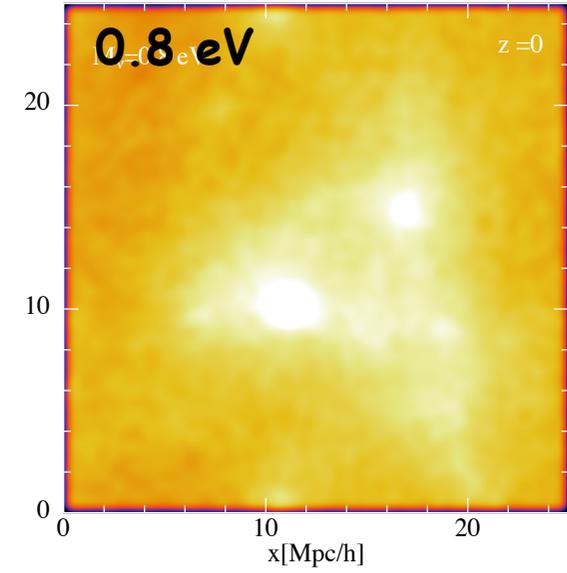
Petites
échelles



Baryons

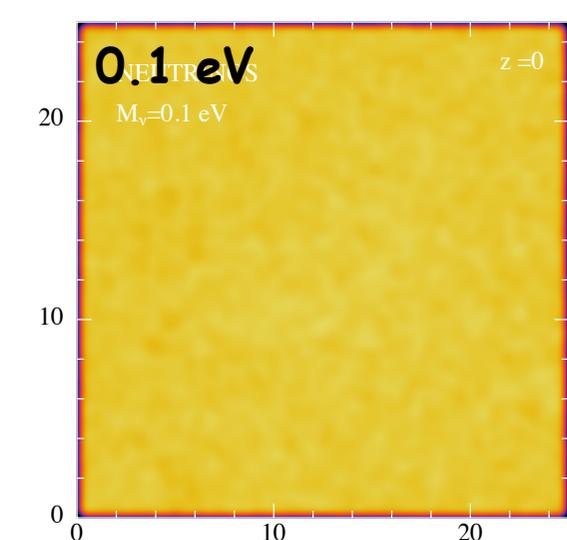
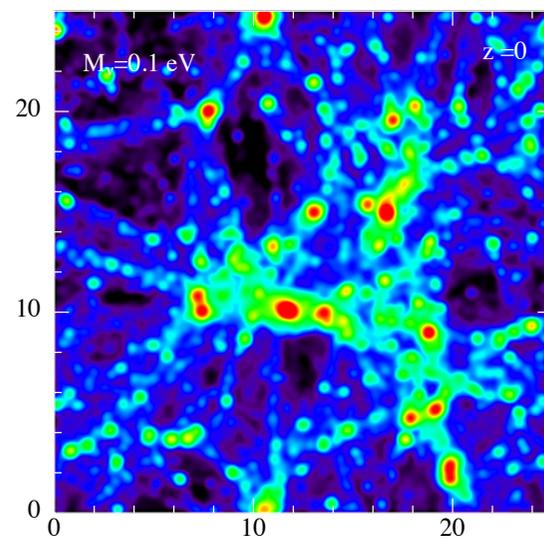
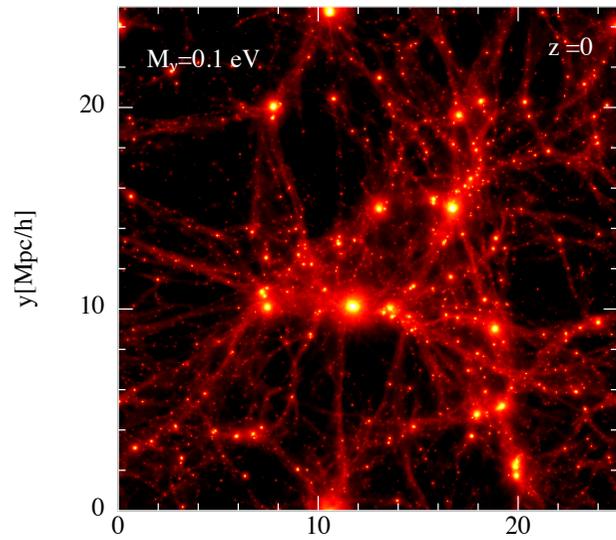


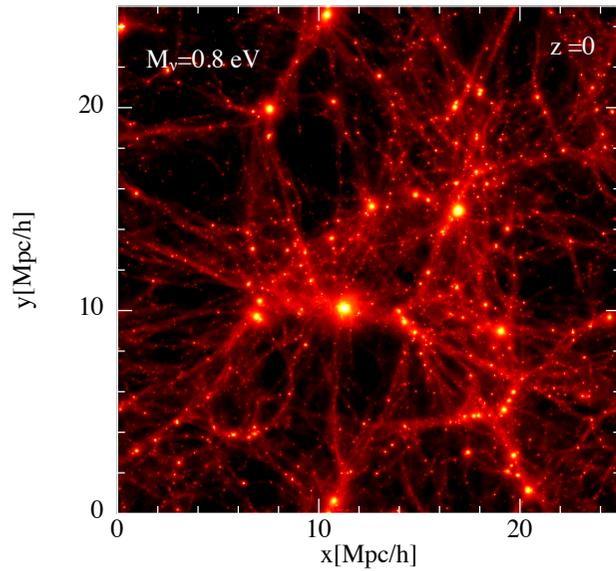
Matière noire



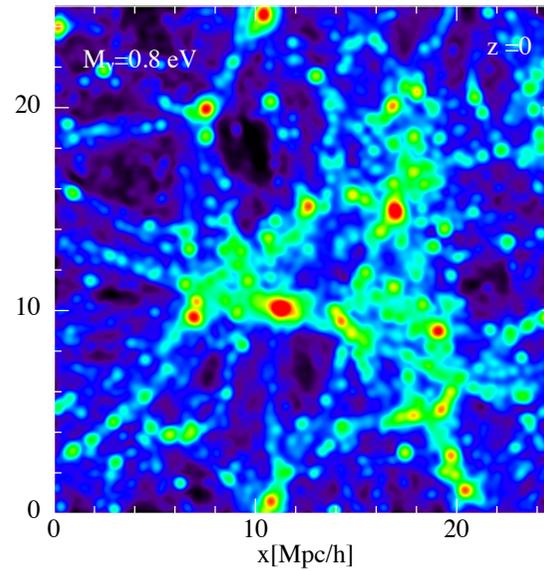
Neutrinos

© G. Rossi

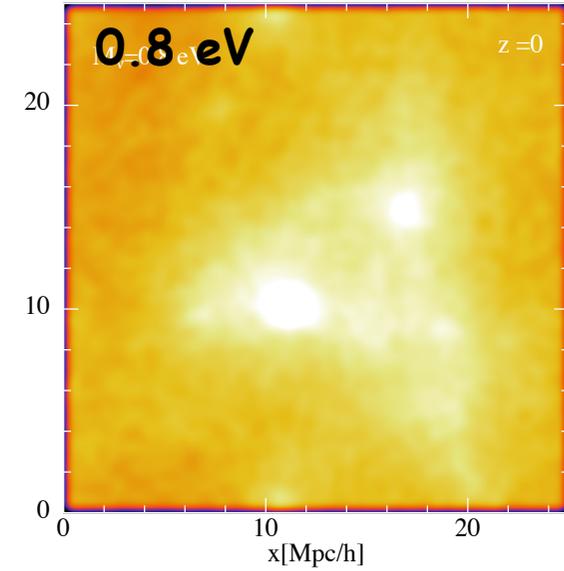




Baryons

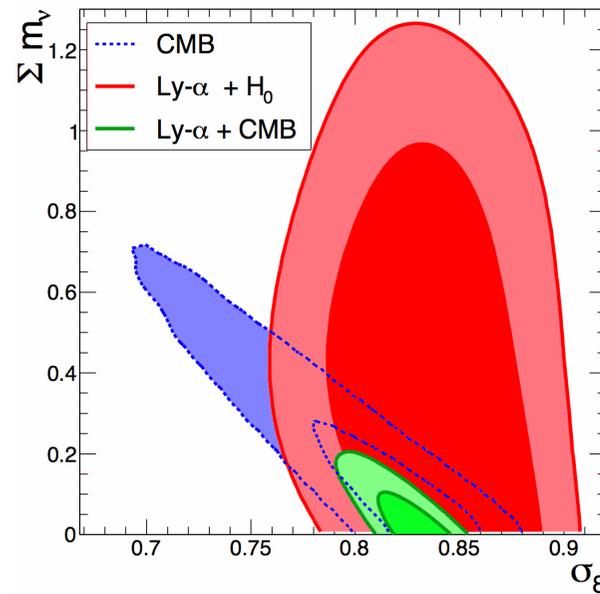


Matière noire



Neutrinos

© G. Rossi



Cosmologie:
 $\rightarrow \Sigma m_\nu < 0.15 \text{ eV}$

Physique des particules:
 $0.06 \text{ eV} < \Sigma m_\nu < 6 \text{ eV}$

Neutrinos et cosmologie

Video ...