

Astroparticule


3/3

Nathalie PALANQUE-DELABROUILLE
CEA-Saclay
Bénodet, novembre 2017

Astroparticule


- 1) Approche multi-messagers
Rayons cosmiques (historique, propriétés)

- 2) Rayons cosmiques (état des lieux, derniers résultats)
Sursauts gamma
Ondes gravitationnelles

-  3) Neutrinos
 - Astronomie neutrino
 - Neutrinos et cosmologie

Astroparticule

3/3

- 
- **Astronomie neutrinos à haute énergie**
 - **Saga solaire**
 - détection des neutrinos du soleil
 - oscillations neutrinos
 - **Neutrinos atmosphériques (et autres?)**
 - **Neutrinos dans l'Univers**
 - Neutrinos et supernovae
 - Neutrinos et cosmologie

Astronomie multi-messagers

Photons

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

Astronomie multi-messagers

Photons

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

libre parcours moyen
d'un photon = 1 cm

100 000 ans pour sortir



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

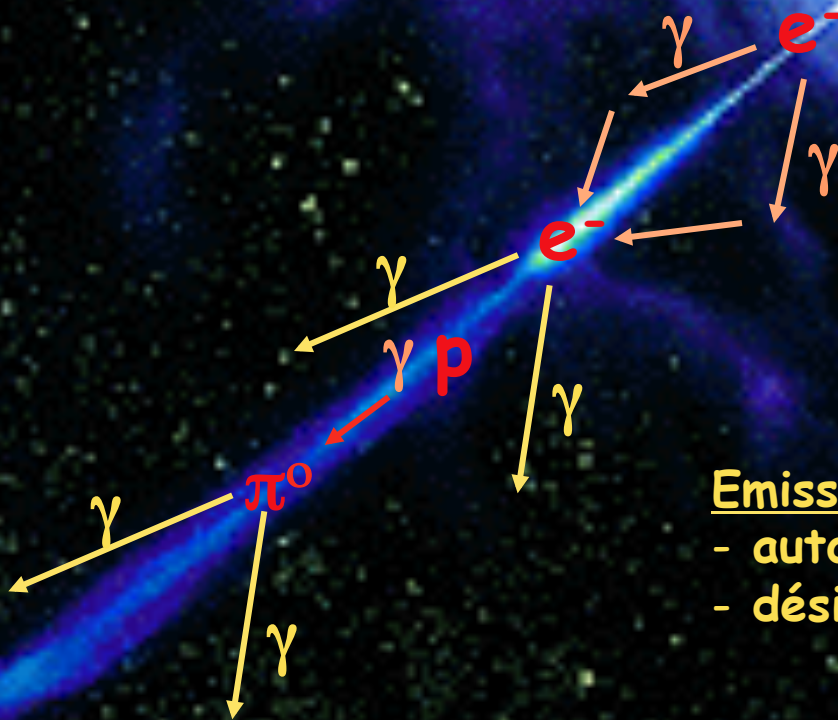
2 s pour sortir

Neutrinos

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

Blazars

Emission basse énergie (rayons X) :
émission synchrotron des e^- du jet



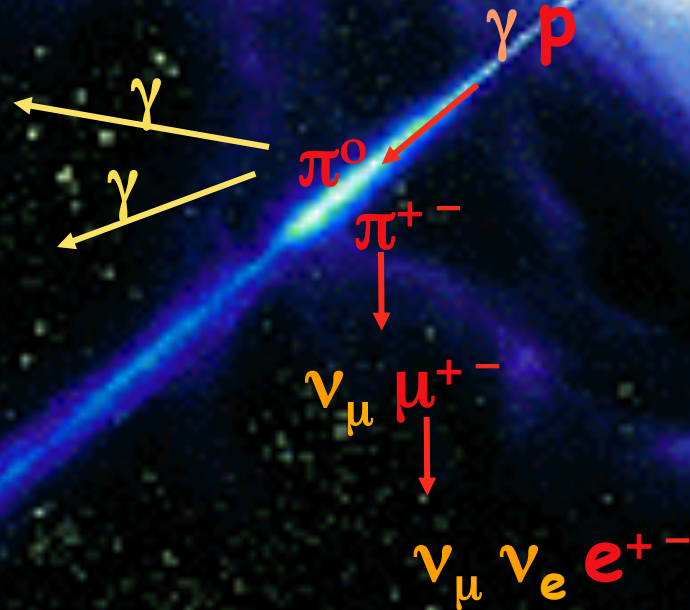
Emission haute énergie (rayons γ):

- auto-compton (electromagnétique) ?
- désintégration π^0 (hadronique) ?

Blazars

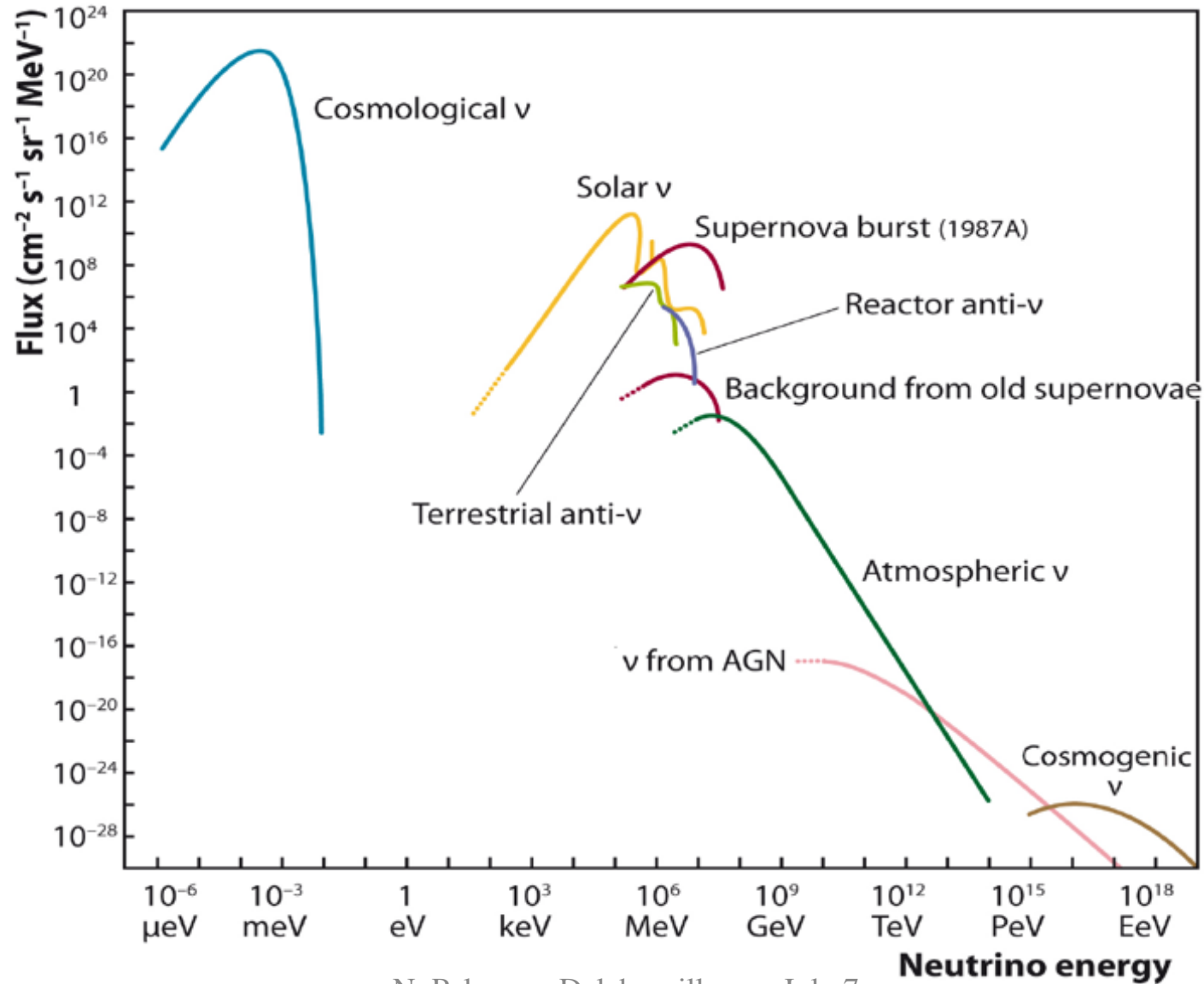
Emission haute énergie (rayons γ):

- ~~auto-compton (electromagnétique) ?~~
- désintégration π^0 (hadronique) ?



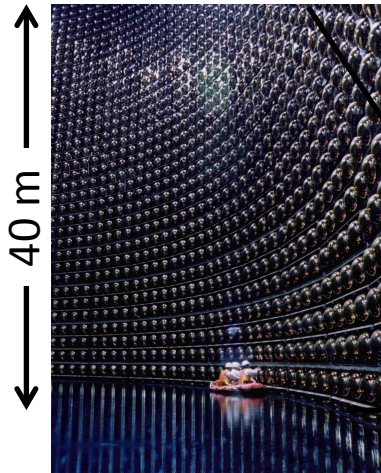
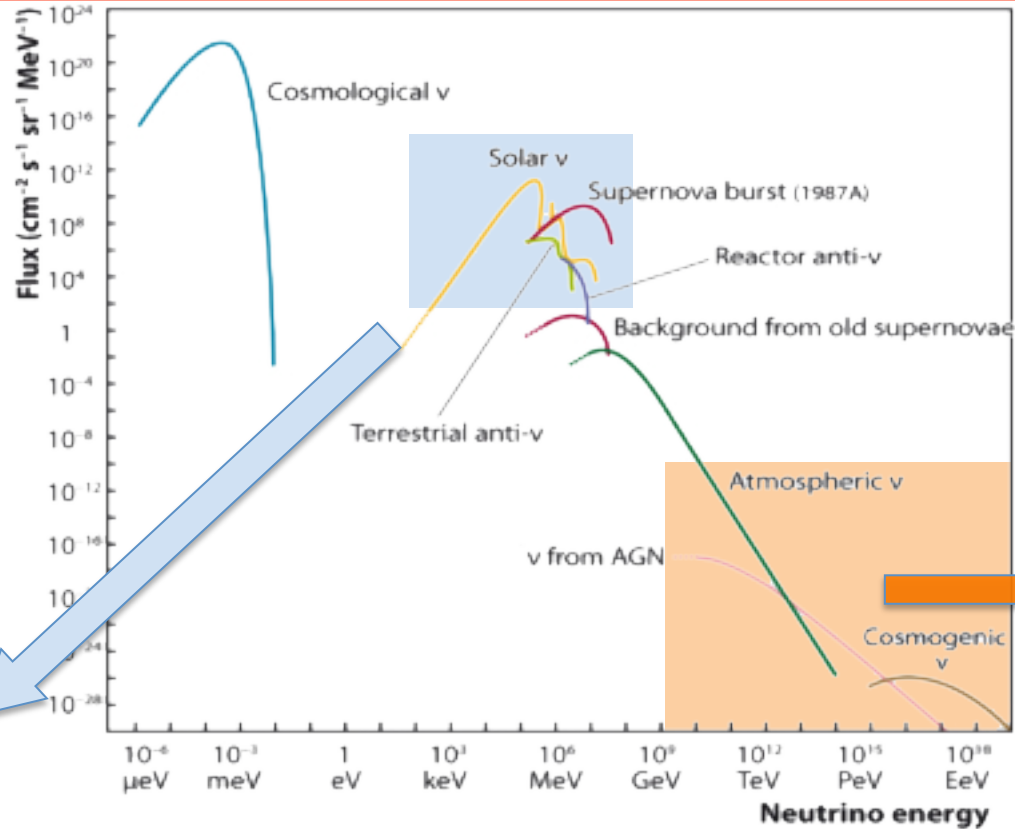
Sources de ν
de haute énergie !

Spectre neutrinos



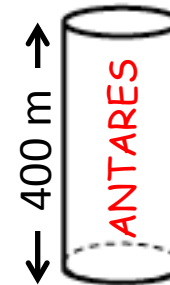
N. Palanque-Delabrouille — July 7,
2017 — SFP, 2017

Spectre neutrinos

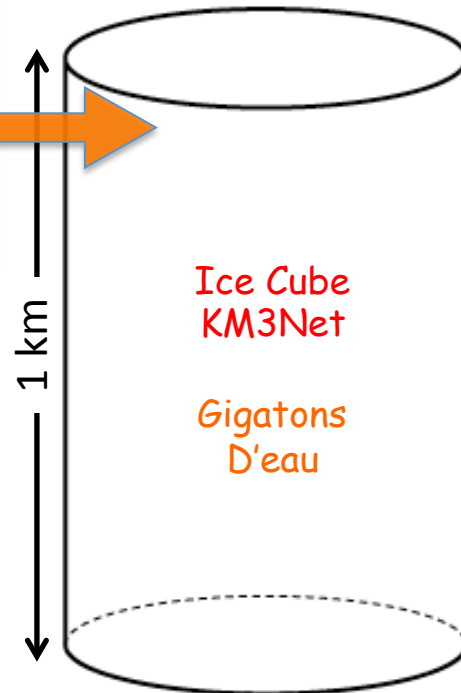


Super Kamiokande

50 ktons
d'eau



400 m



1 km

Ice Cube
KM3Net

Gigatons
D'eau

Section efficace d'interaction

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

Nb d'interaction par unité de longueur :

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

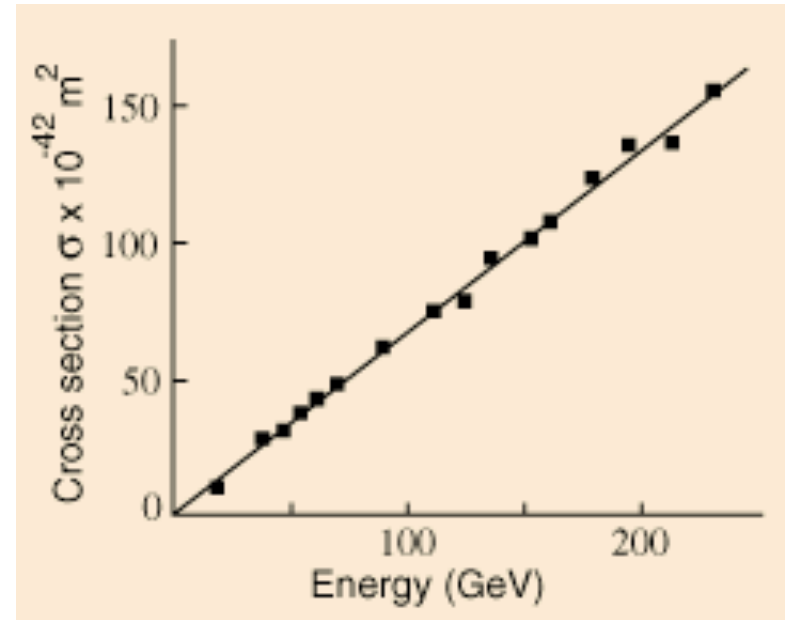
→ masse d'un nucléon
→ densité massique de la cible

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) $\sim 1 \text{ MeV}$ $\sigma \sim 10^{-46} \text{ m}^2$

« Telescope » à neutrinos

Très faible section efficace d'interaction des ν
Très faibles flux à grand E



Oscillations donc ν_e , ν_μ et ν_τ
en proportion égale au niveau de
la Terre

Les μ et τ produits peuvent
traverser une grande quantité
de matière (plusieurs km)

⇒ La Terre comme détecteur !

« Telescope » à neutrinos

EAU / GLACE

ROCHE

muon

neutrino muonique

Position & Temps



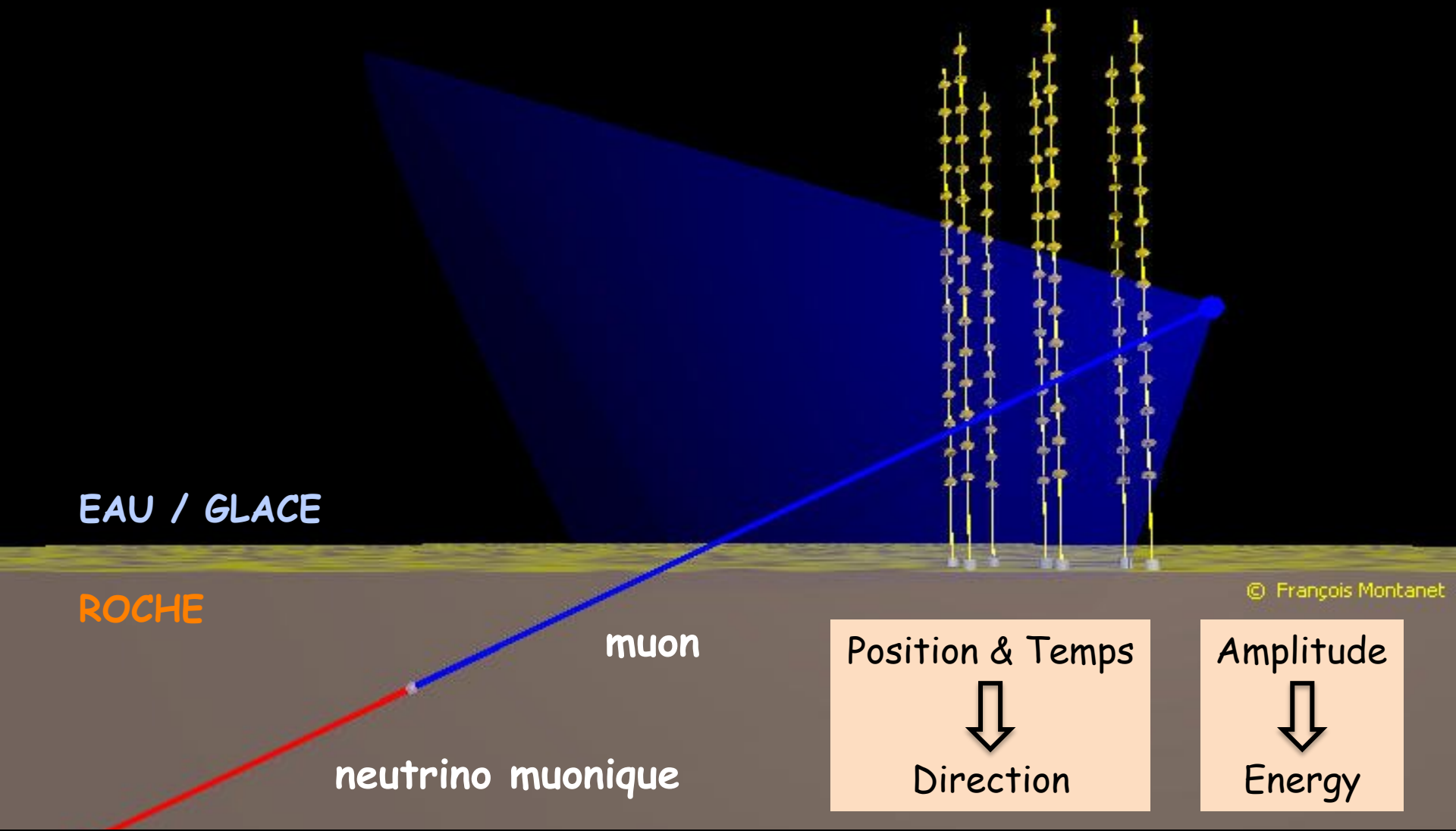
Direction

Amplitude



Energy

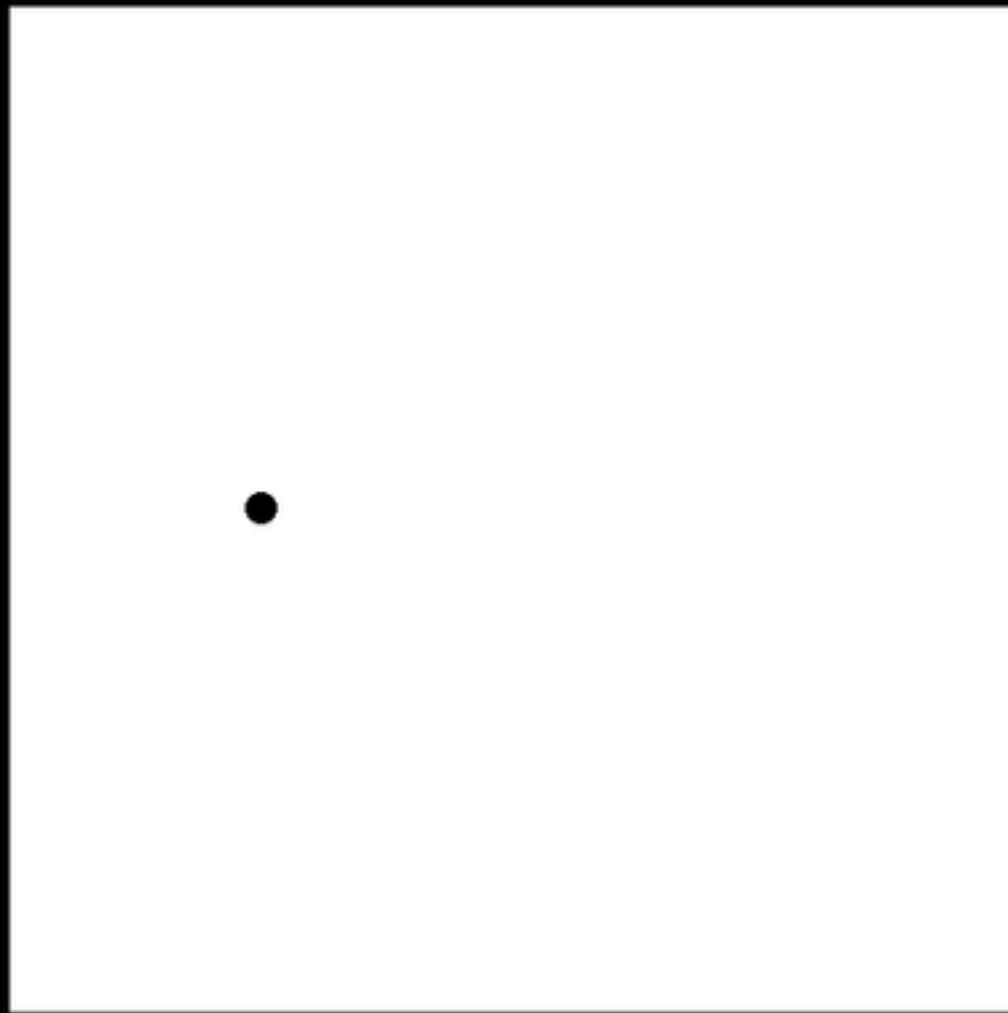
© François Montanet



Effet Cerenkov

progression
lente

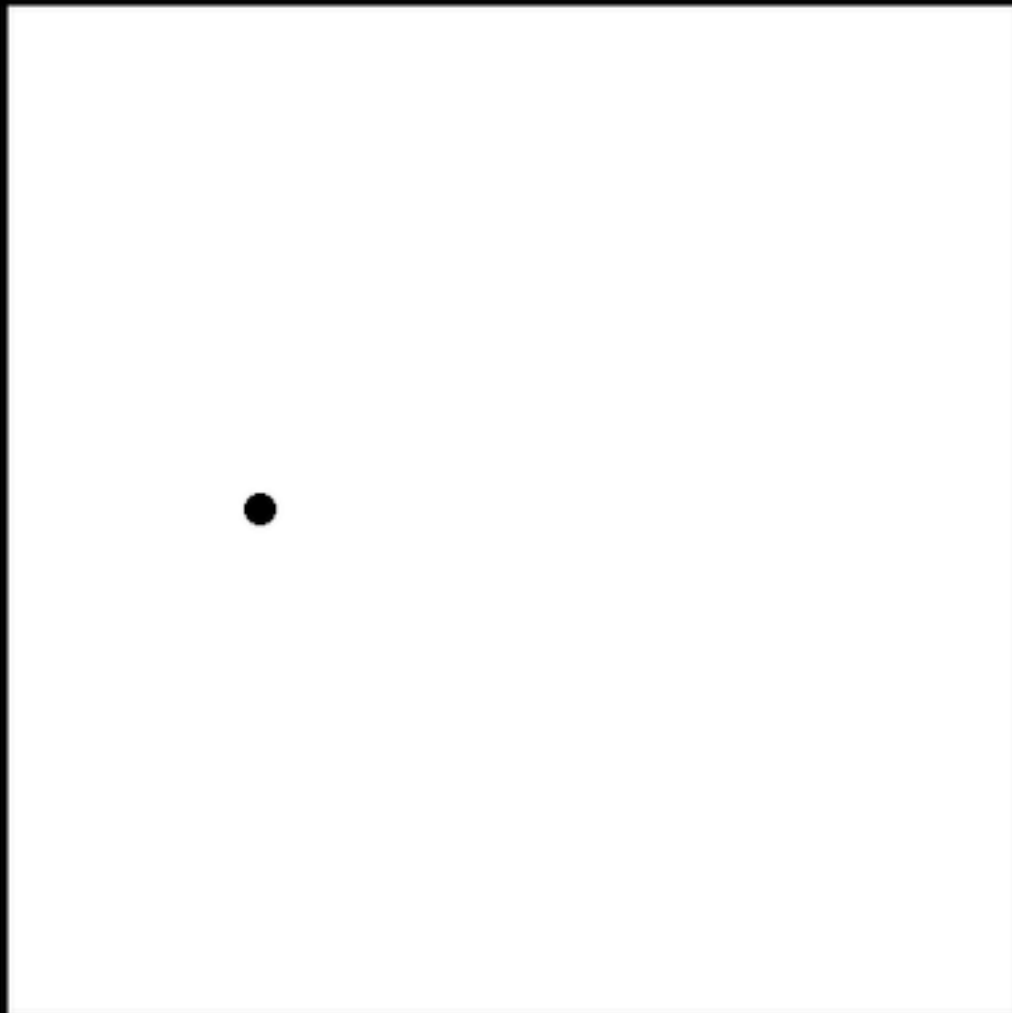
(effet
Doppler)



Effet Cerenkov

progression
rapide

(onde de
choc)

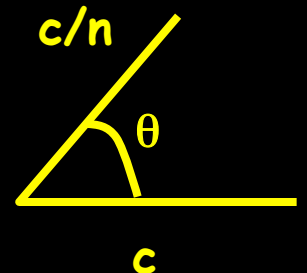


v lumière = c/n

v particule $\sim c$

$\cos \theta = (c/n)/c$

$\theta = 1^\circ$ air
 42° eau



Effet Cerenkov

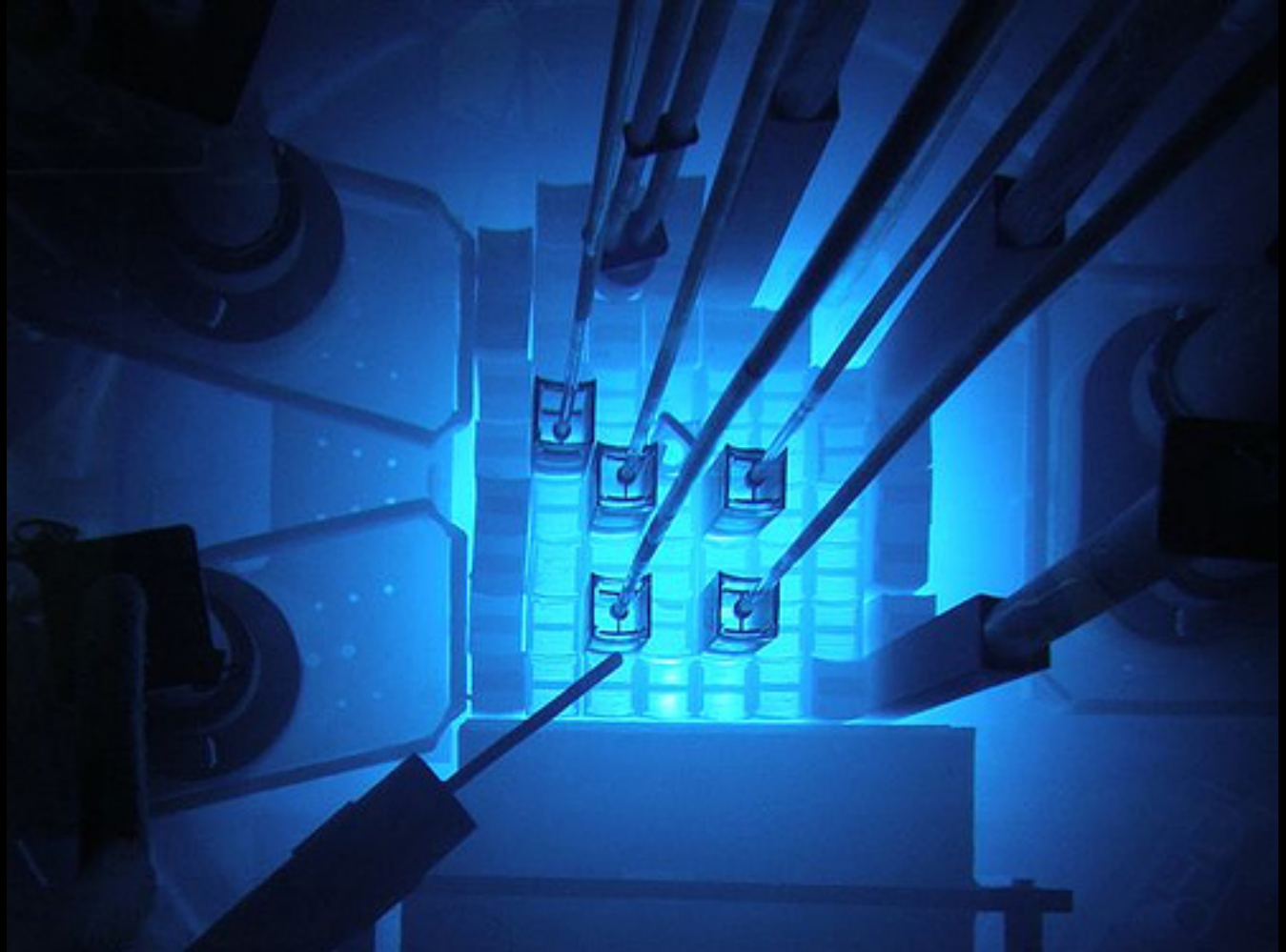
analogie sonore

Mur du son
Bang supersonique

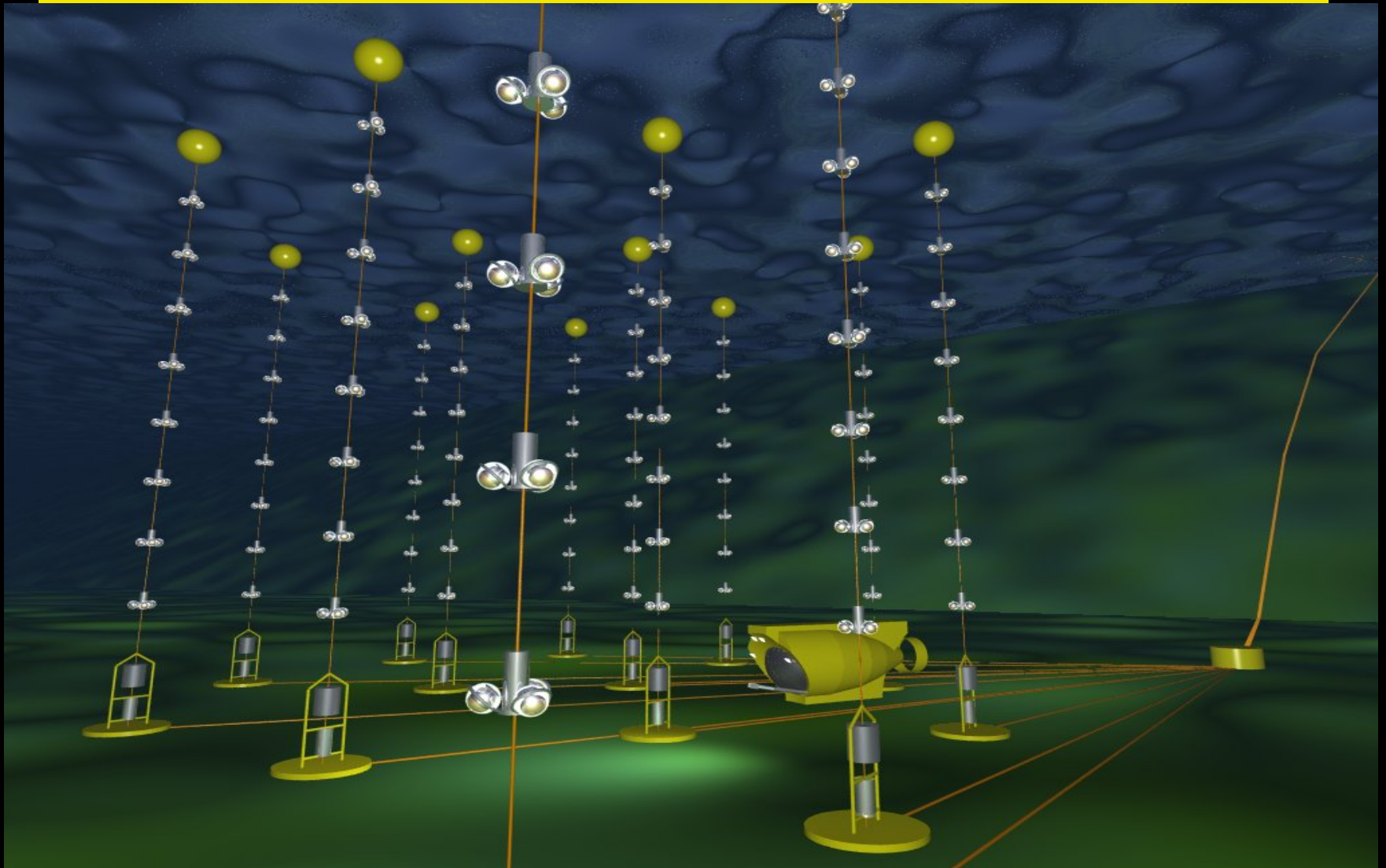


Effet Cerenkov

Lumière bleue

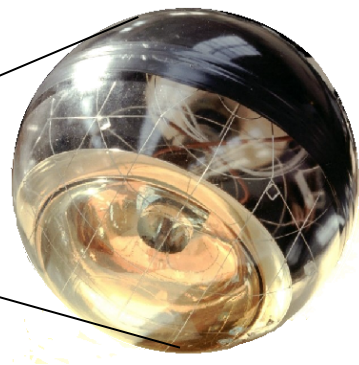
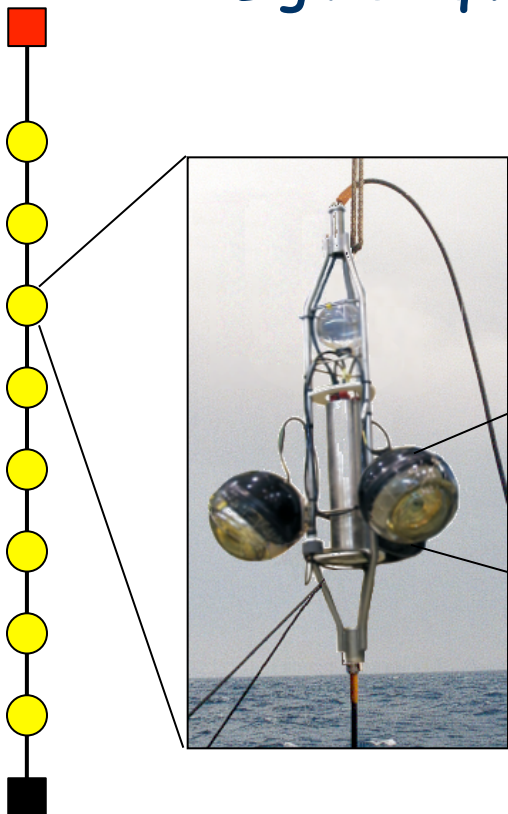


« Telescope » à neutrinos



Détecteurs

Lignes équipées de modules optiques (PMT)



- d_{OM-OM} : Seuil en E
- # de OM: Résolution en E
- $d_{inter\ ligne}$: Volume effective (E max)



« Télescopes » à neutrinos

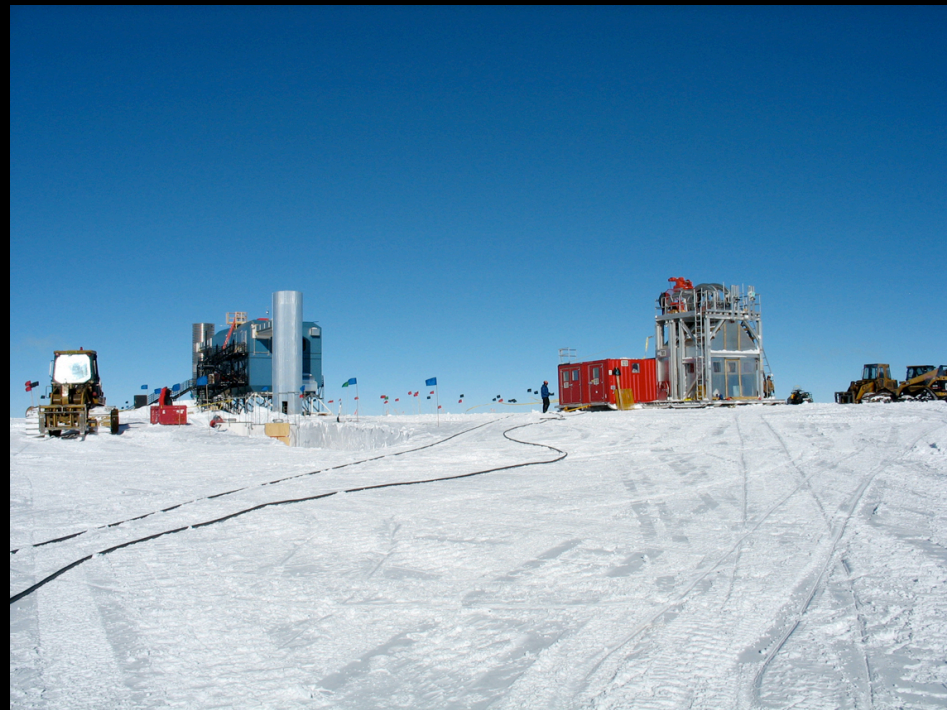


Antares / KM3Net

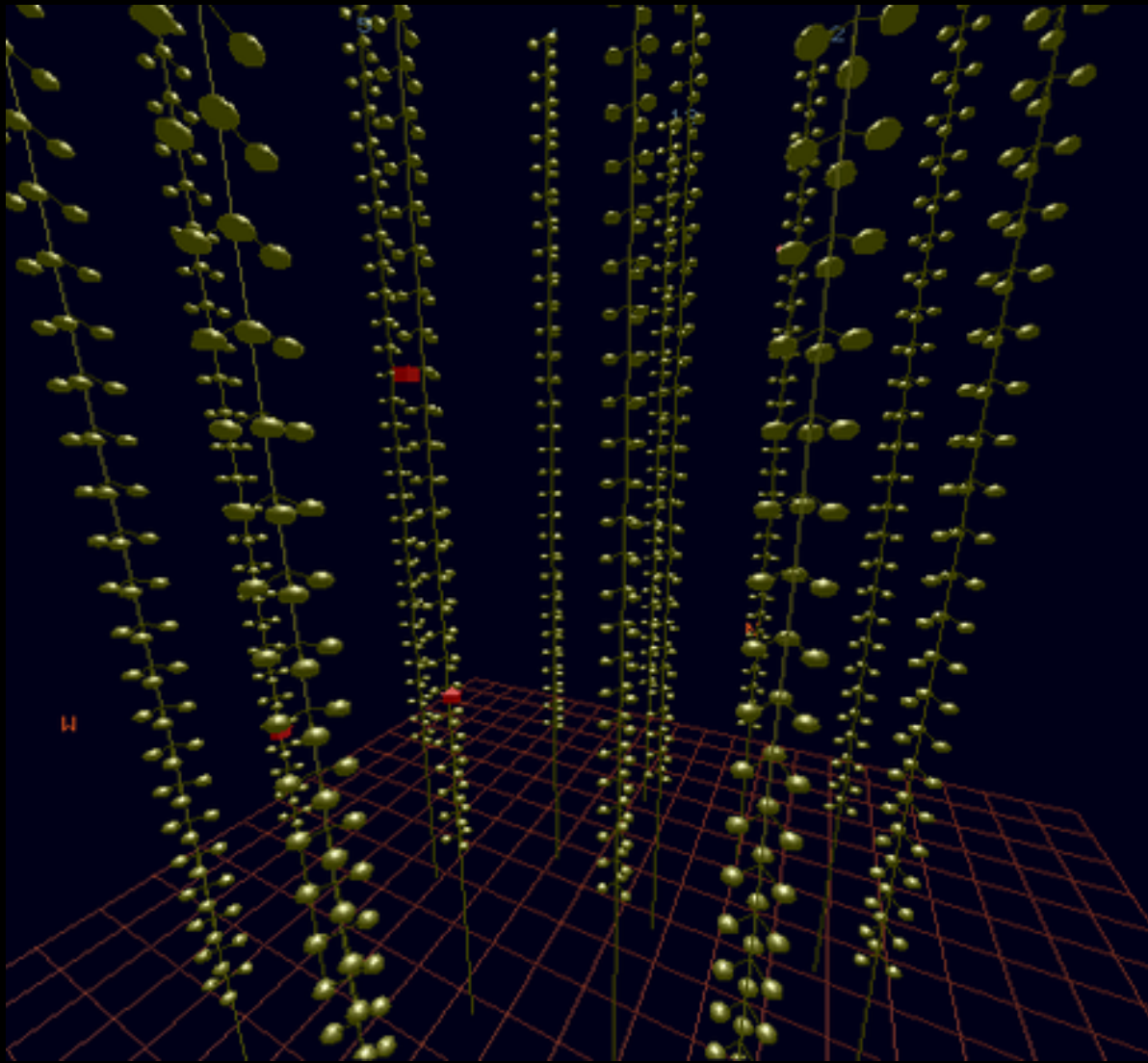
0.1 km² x 400m

meilleure résolution angulaire
(0.2°)

Ice Cube
1 km² x 1 km
meilleure sensibilité
(moins d'absorption)



« Téléscopes » à neutrinos



« Téléscopes » à neutrinos

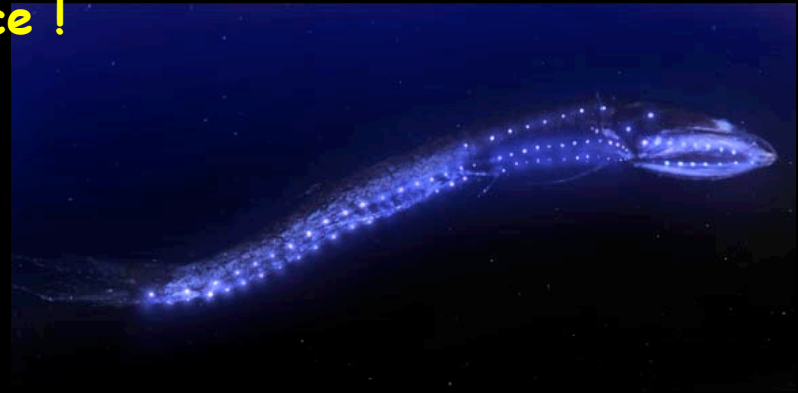
Scintillement du télescope :

radioactivité naturelle



© DeepSeaPhotography.Com

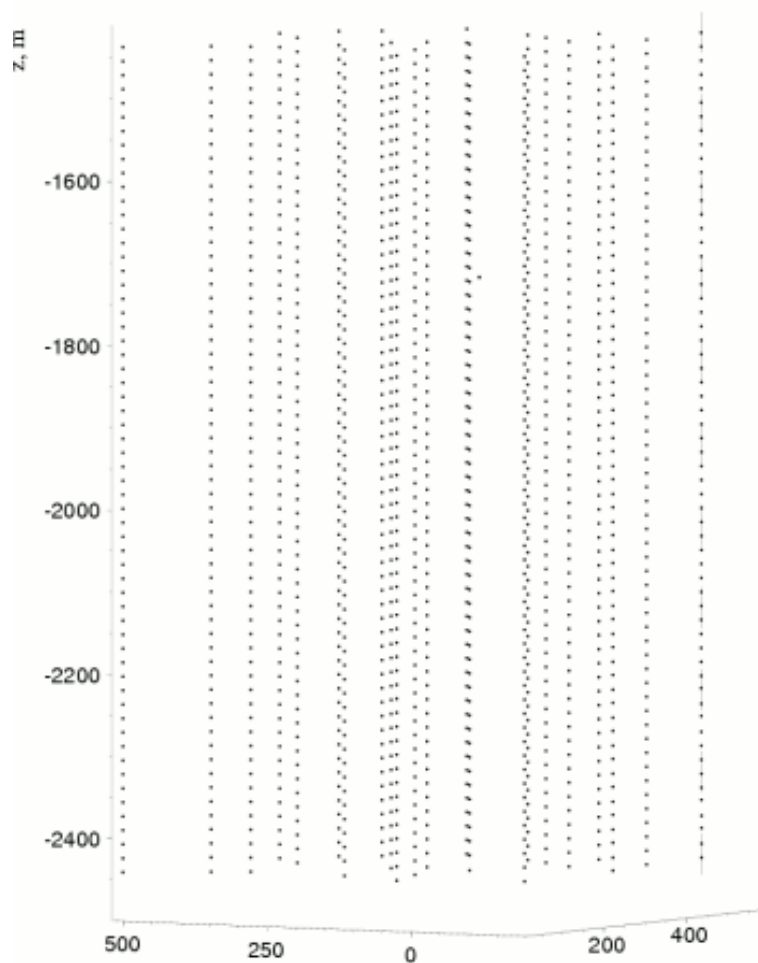
bioluminescence !



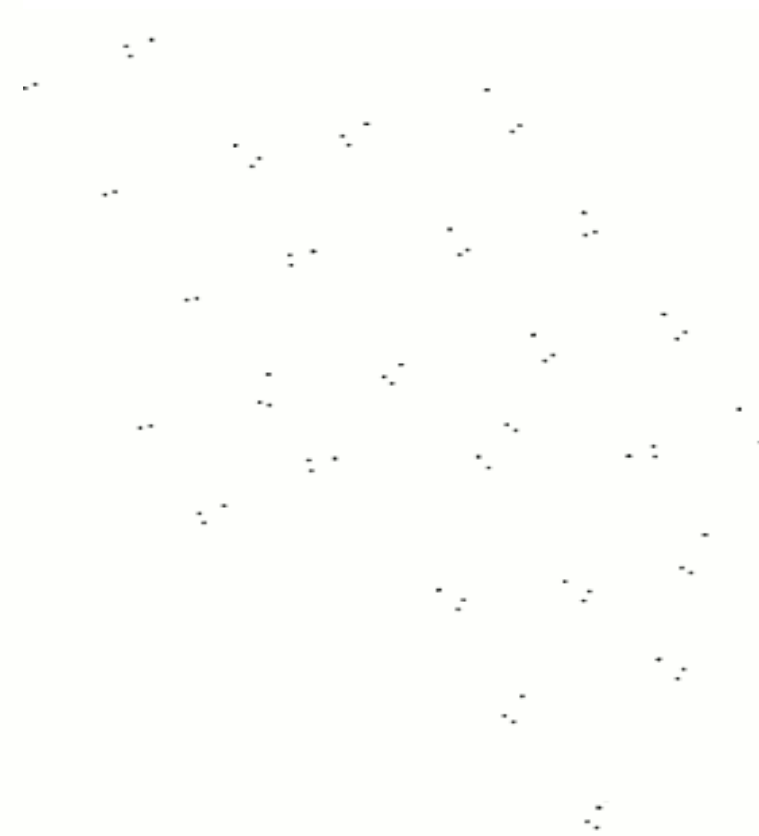
© DeepSeaPhotography.Com

Muon montant : signature d'un ν_μ

(IC22)



run 109457 event 5720360

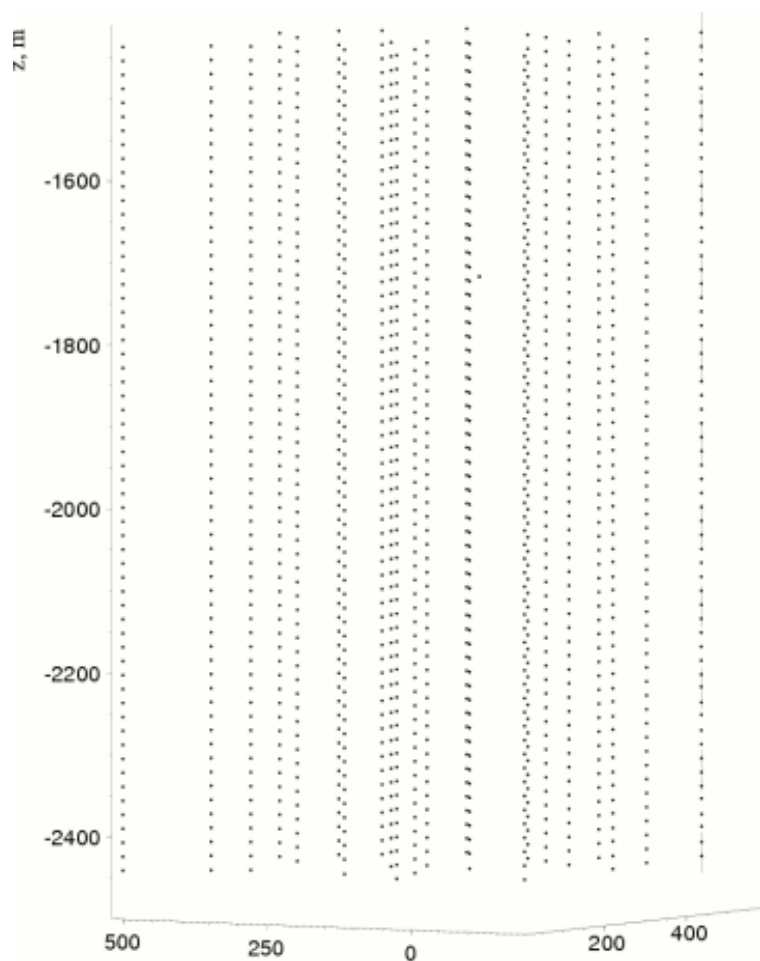


run 109457 event 5720360

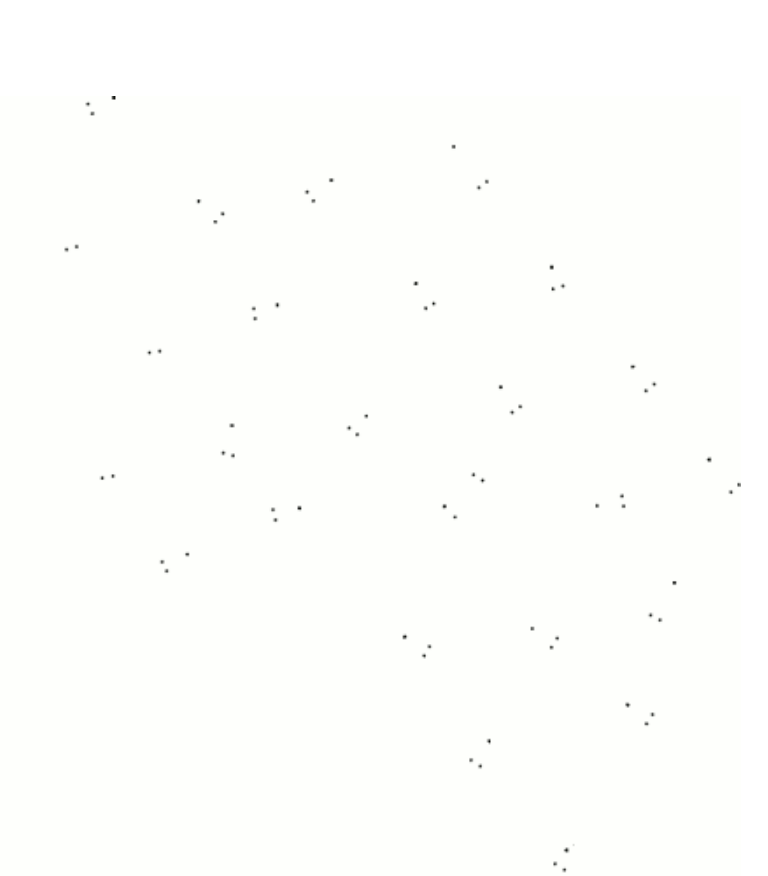
Cascade : signature d'un ν_e

(IC22)

Energie = 134 TeV



run 109682 event 6298338

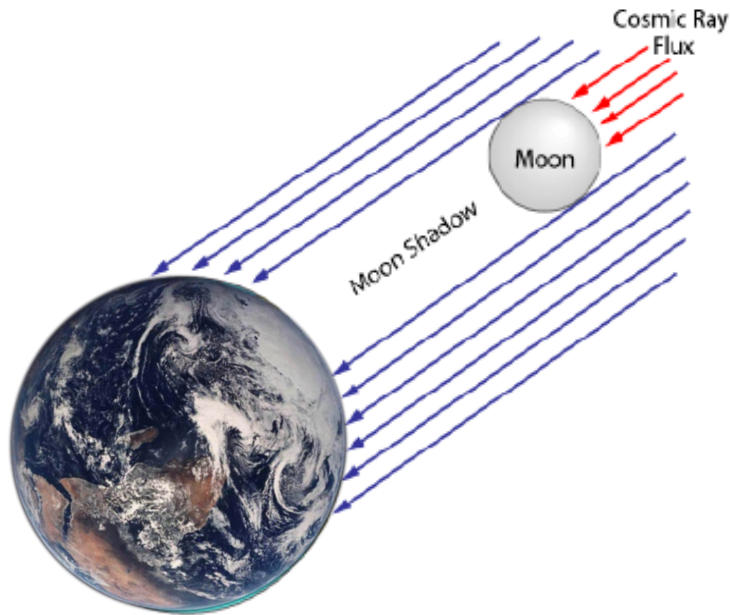


run 109682 event 6298338

A l'ombre de la lune

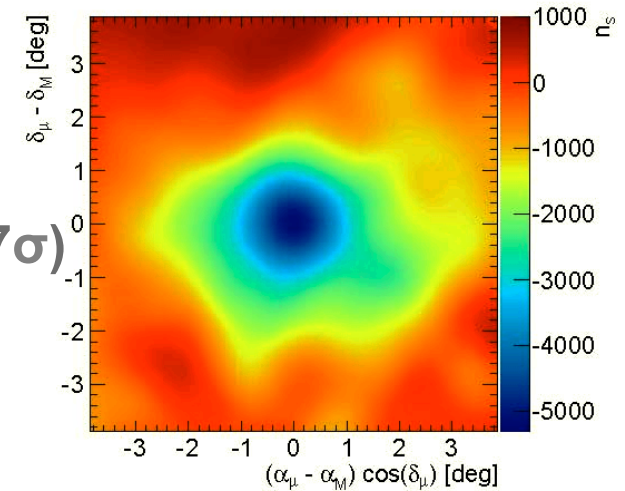
(IC40+IC59)

Rayons cosmiques bloqués par la lune
=> déficit de muons descendants

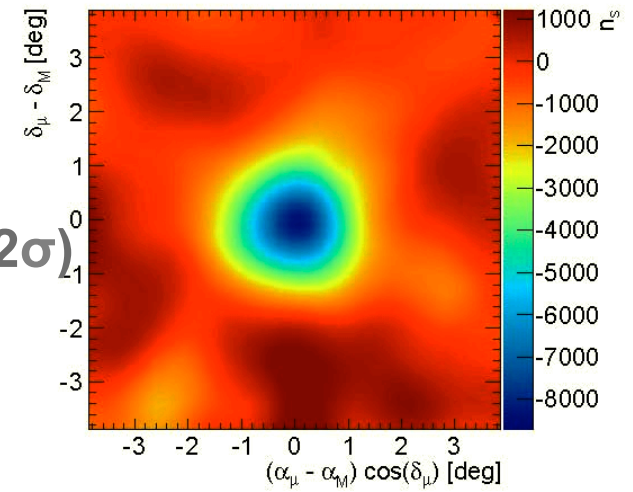


Ombre de la lune détectée $>10\sigma$
Erreur de pointage $< 0.1^\circ$
Vérification de la PSF pour
reconstruction des traces

IC40 (7σ)



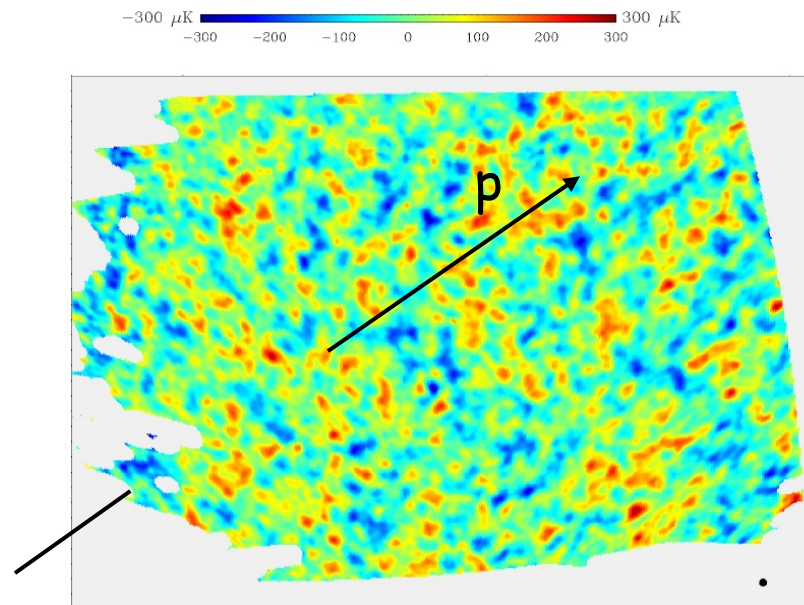
IC59 (12σ)



Recherche de ν GZK (très haute énergie)

50% énergie perdue par $p_{\text{UHECR}} + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \nu_{\text{HE}}$

Important pour identification **origine** des UHECR !

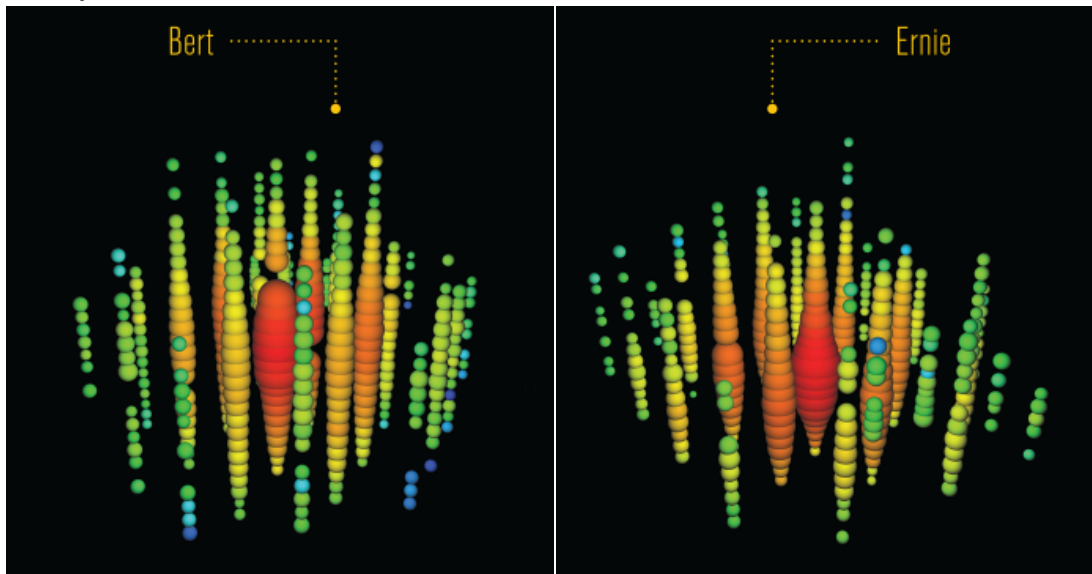


Recherche de ν GZK (très haute énergie)

50% énergie perdue par $p_{\text{UHECR}} + \gamma_{\text{CMB}} \rightarrow \nu_{\text{HE}}$

Important pour identification **origine des UHECR !**

2 premiers événements à $E \sim 1\text{PeV}$ (IceCube)



PRL 111, 021103 (2013)

E trop basse pour ν GZK

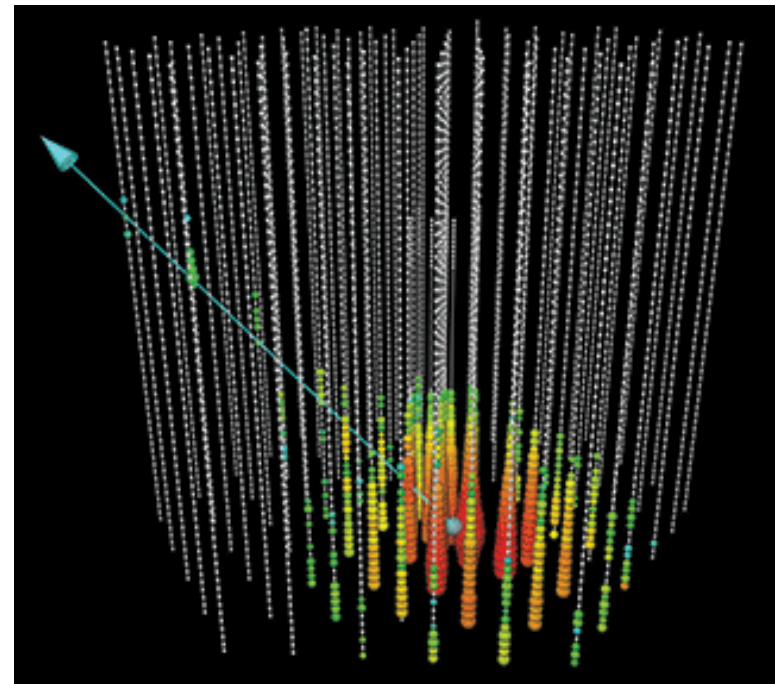
E trop haute pour ν atm

\Rightarrow **Origine astrophysique?**

+26 autres ...

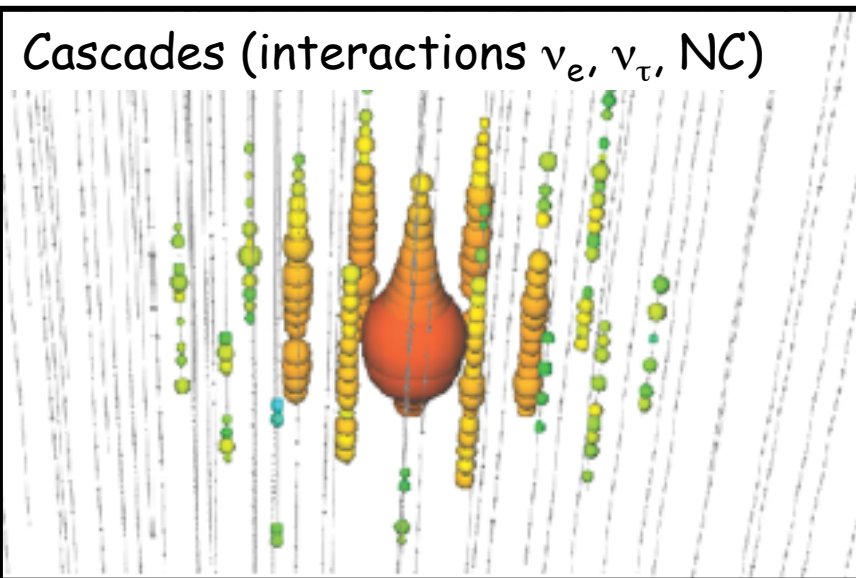
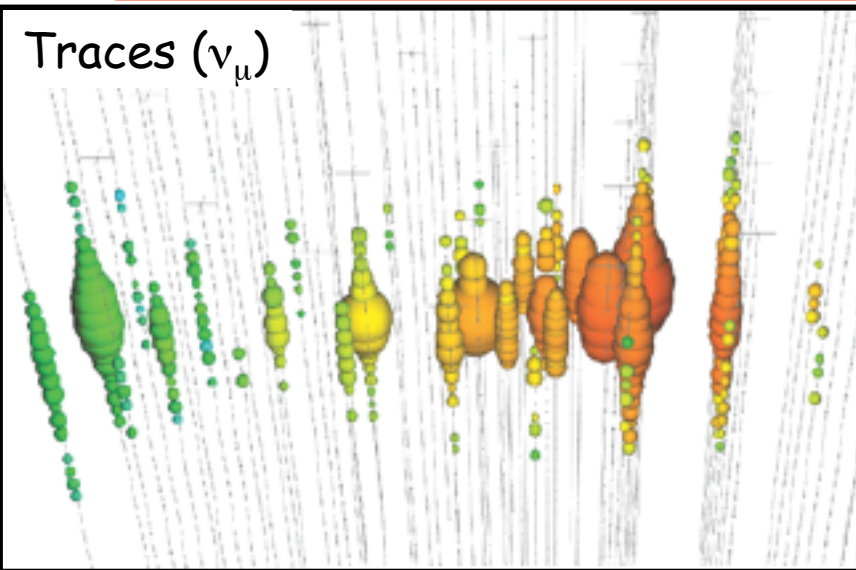
$E \sim 250\text{ TeV}$

Bonne directionalité

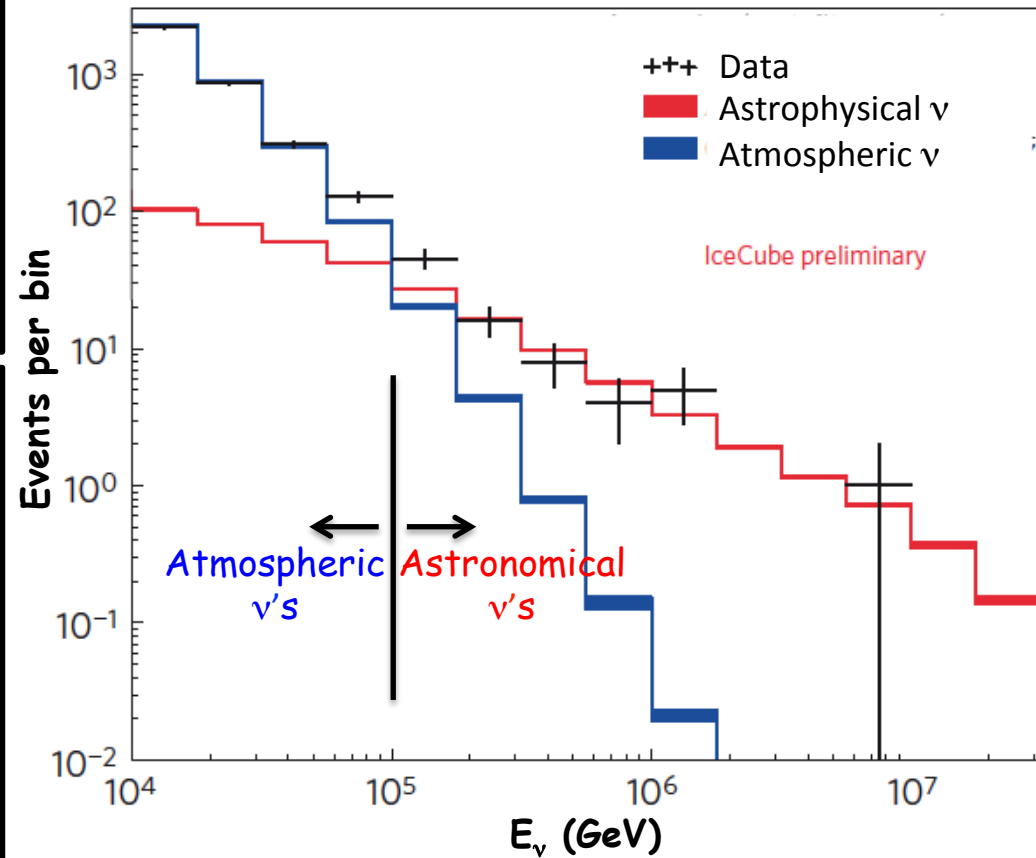


Science 342, 1242856 (2013)

Astronomie neutrinos



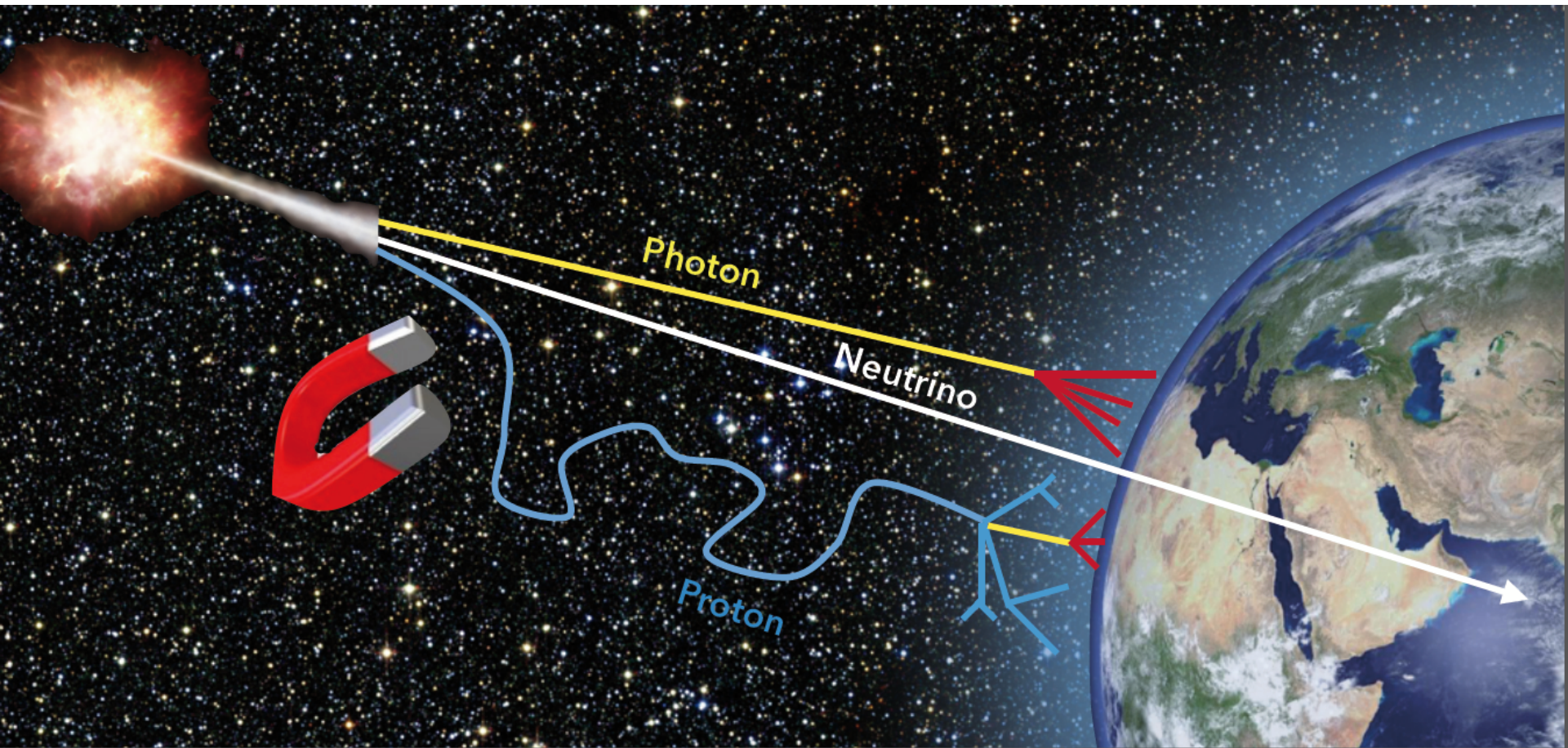
28 événements (2 ans de données)
Energie déposée 30 TeV - 1 PeV



Halzen (2016) et refs. inclus

Astronomie multi-messagers

- Corrélations à **haute énergie** avec émetteurs de **rayons cosmiques**
- Comparaison spectre en énergie avec celui de **photons haute-énergie**

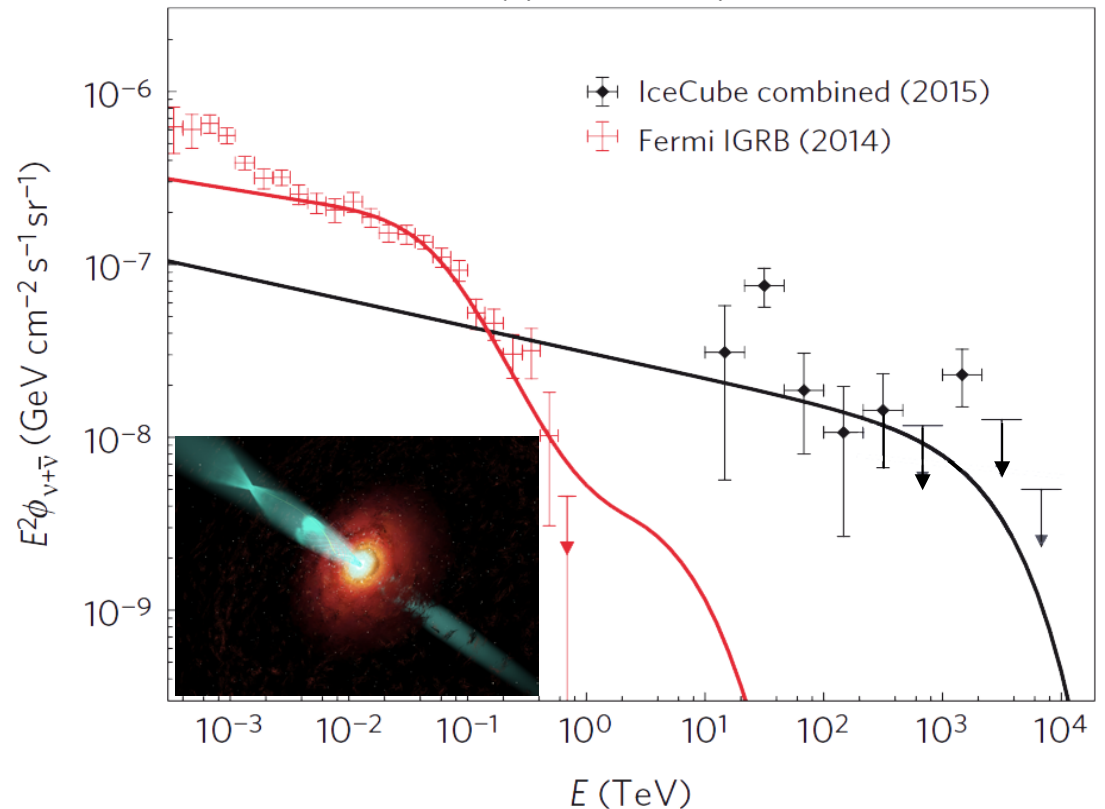


Astronomie multi-messagers

Excellent ajustement spectral avec γ -rays
de Fermi (GeV)

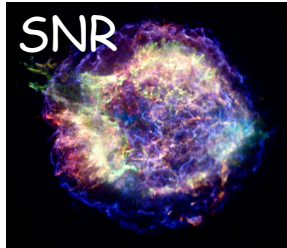


Origine commune?
Blazars (hypothèse pour Fermi)?

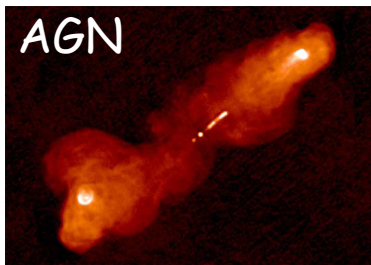


Pas de corrélation claire
avec classes connues

ni galactiques



ni extragalactiques

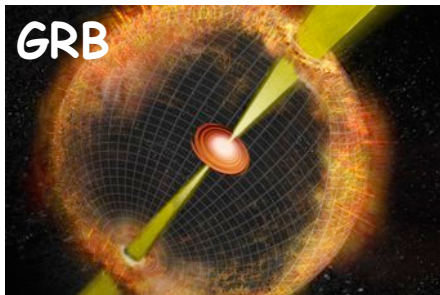
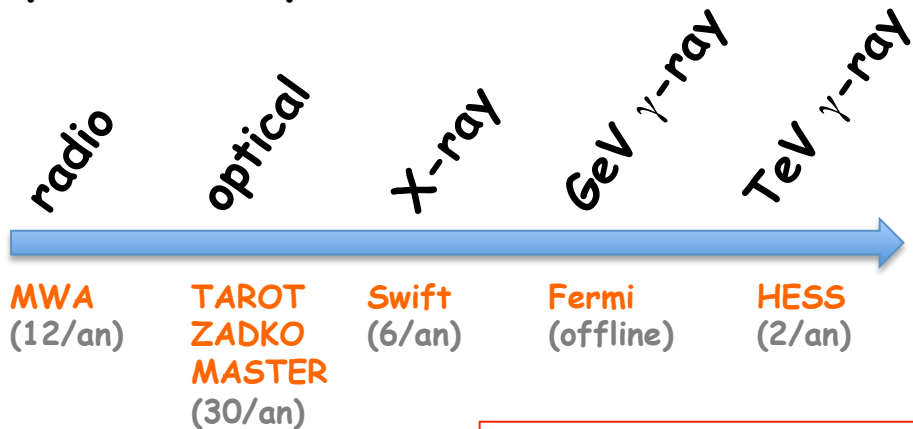


Astronomie multi-messagers temporelle

Etudes multi-messagers de sources variables variables ou transitoires

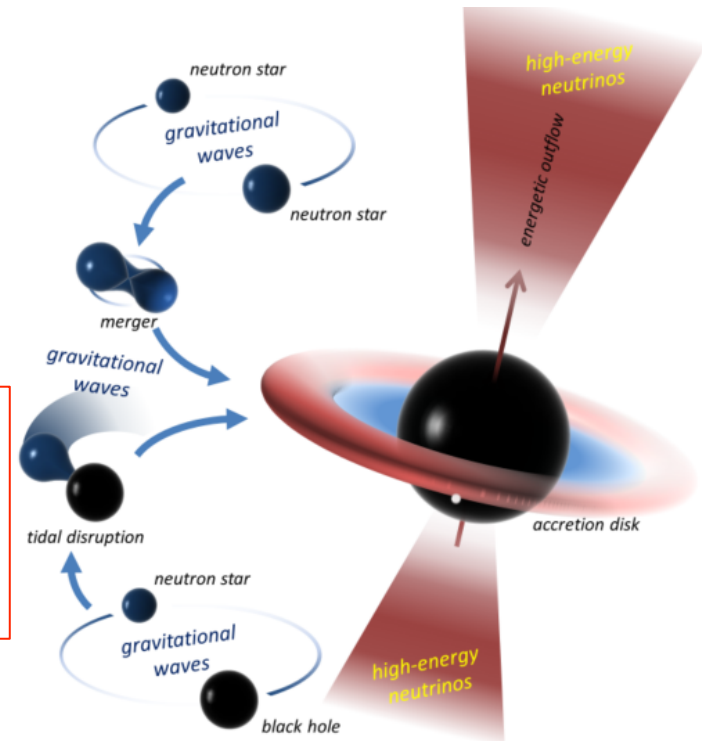
- Augmentation de sensibilité & potentiel de découverte (fond réduit)
- Augmentation de signification statistique (détection jointe)

TATOO (Antares): suivi ($\Delta t \sim$ quelques s)
par télescopes robotisés



Aucune corrélation
identifiée
à ce jour pour les ν

Avec détection d'ondes
gravitationnelles



Astroparticule

3/3

- Astronomie neutrinos à haute énergie
- **Saga solaire**
 - détection des neutrinos du soleil
 - oscillations neutrinos
- Neutrinos atmosphériques (et autres?)
- Neutrinos dans l'Univers
 - Neutrinos et supernovae
 - Neutrinos et cosmologie

Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Soleil}} \sim t_{\text{Terre}} \sim 4.6$ 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: $t_{\text{Soleil}} \sim N_p \times E_l / L \sim 10^{57} \times 1 \text{ eV} / 3 \cdot 10^{26} \text{ W}$



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

Qu'est-ce qui fait briller le Soleil ?

ou : Quel est l'âge du Soleil ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



$t_{\text{Soleil}} \sim t_{\text{Terre}} \sim 4.6$ 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 ?

- 2000+: datation d'éléments radioactifs



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

- Source d'énergie du Soleil: Nucléaire ?

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

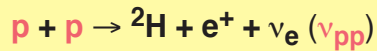
Luminosité $L = 4\pi d^2 F$
 $L \sim 3.10^{26} \text{ W}$

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

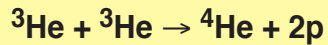


~ 10 milliards d'années

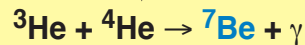
Neutrinos solaires



85%

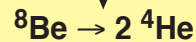
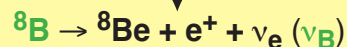
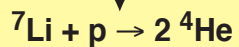
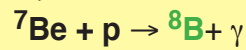
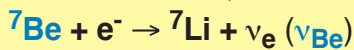


15%

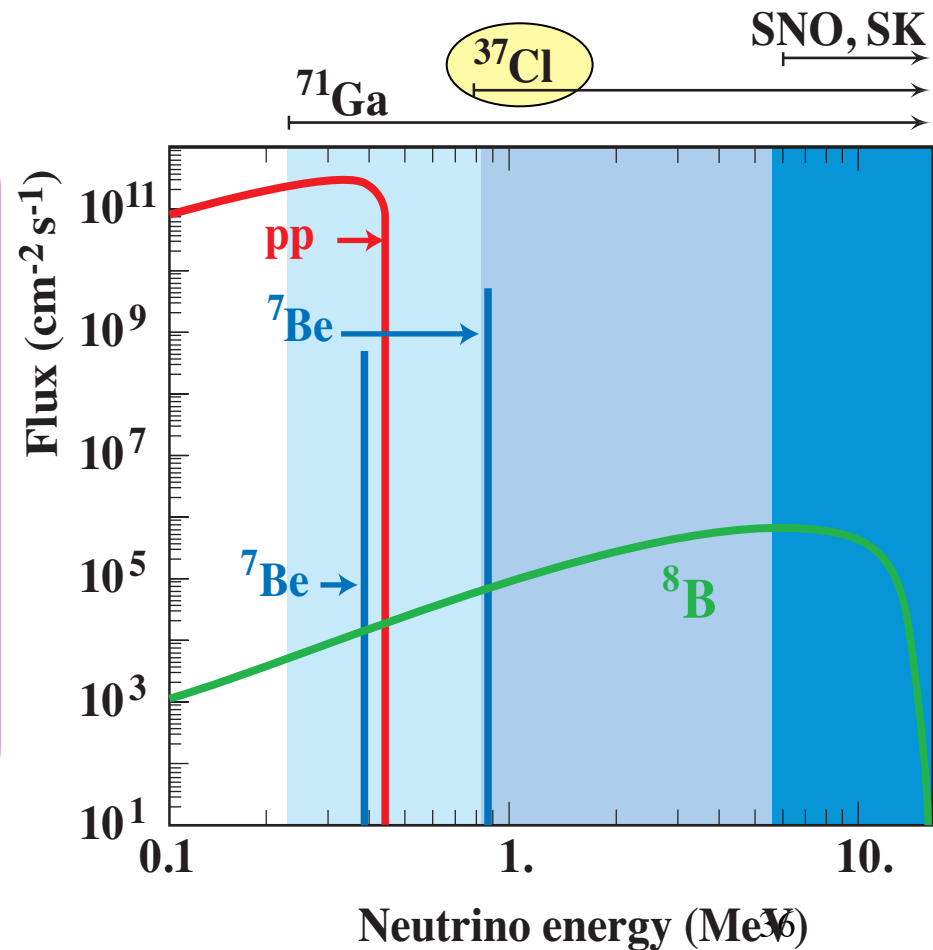


15%

0.02%



1960: Bahcall



Neutrinos solaires

Homestake
Ray Davis

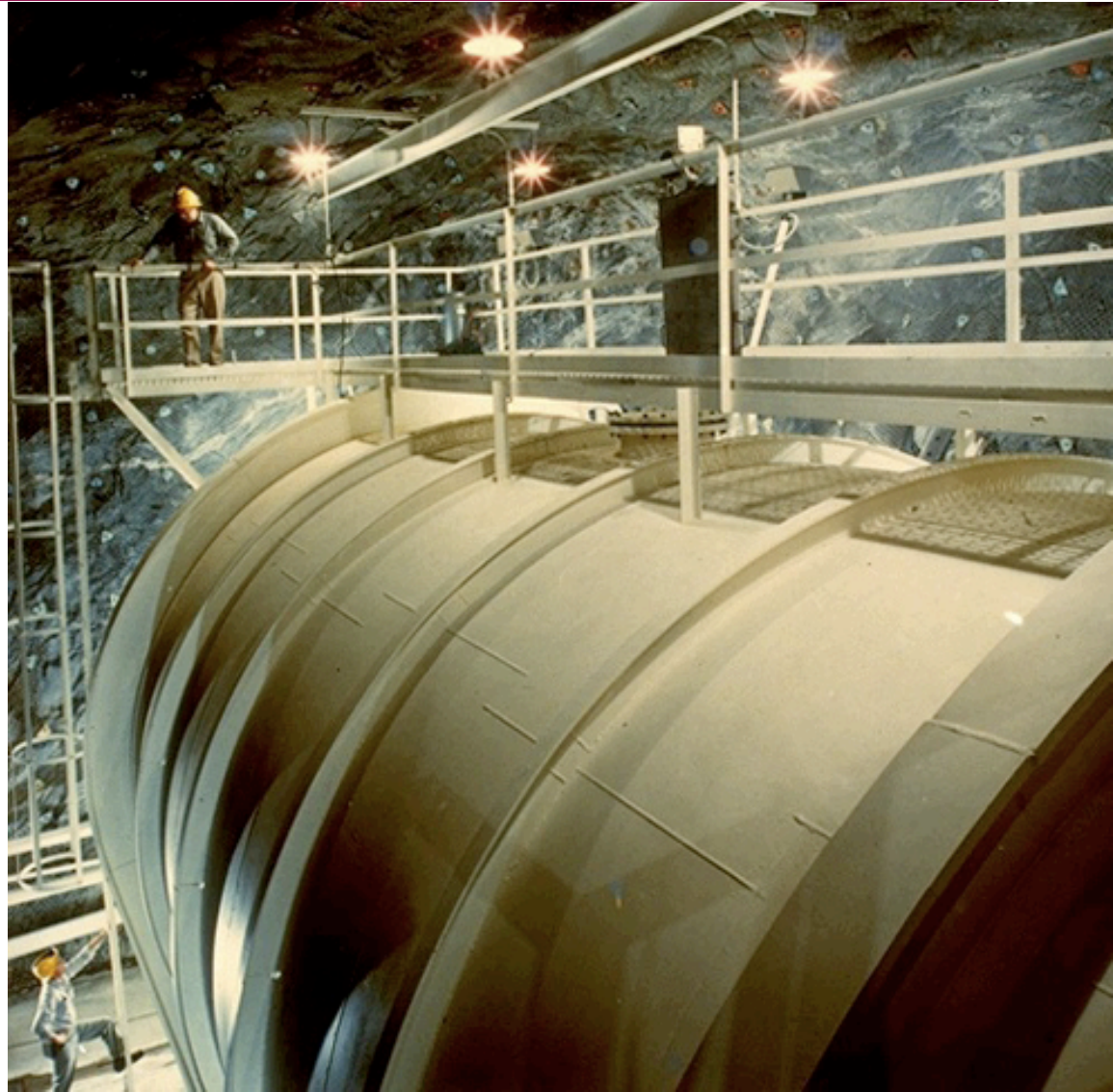
650 tonnes de C_2Cl_4

1 ν /jr (10^{18} traversant cuve)

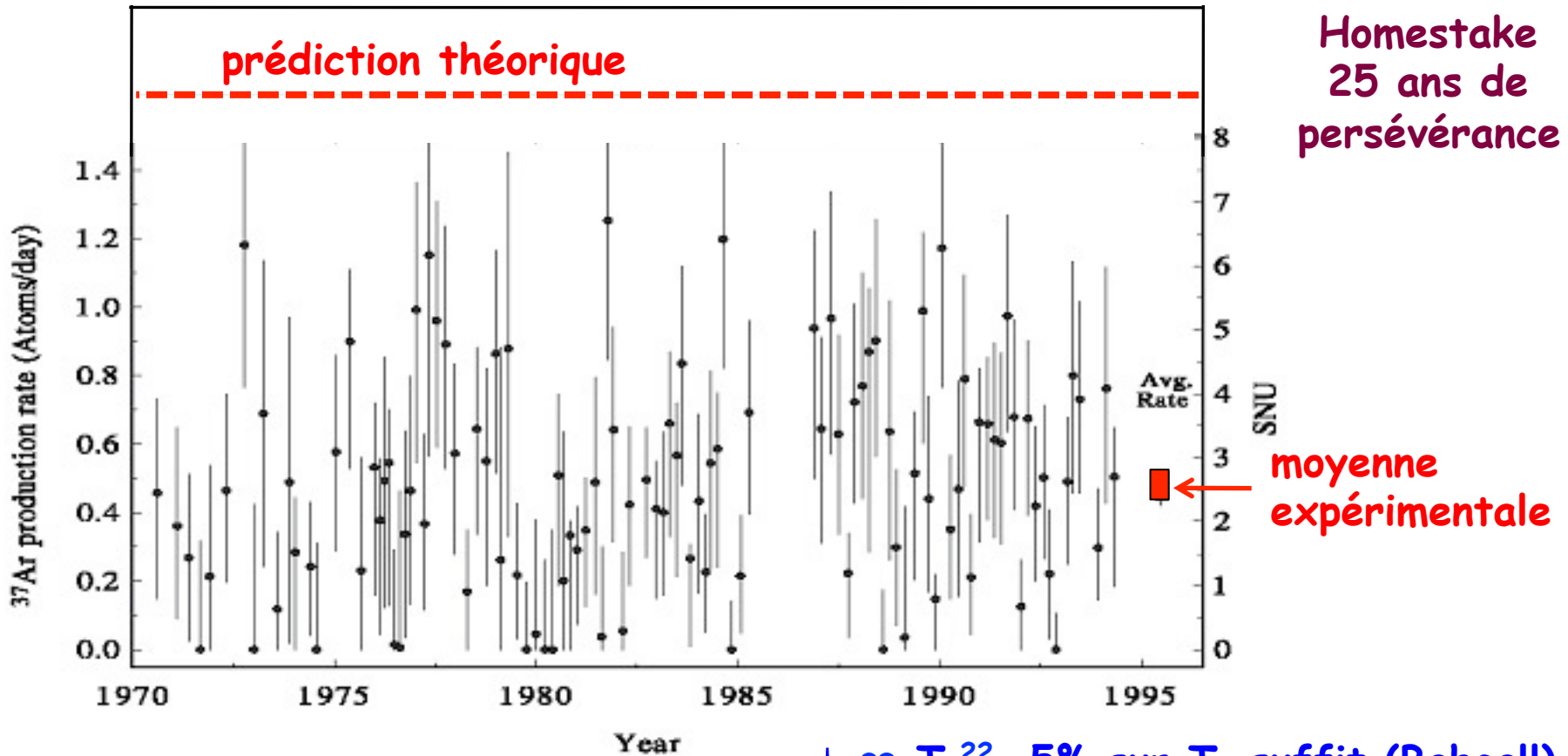


radioactif $\tau_{1/2} \sim 1$ mois

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



Neutrinos solaires

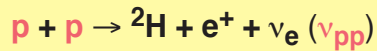


flux détecté = 30% flux prédit

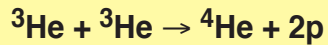
$\phi \propto T_c^{22}$, 5% sur T_c suffit (Bahcall)

pb expérimental? (Davis)

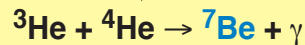
Neutrinos solaires



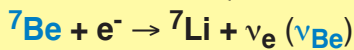
85%



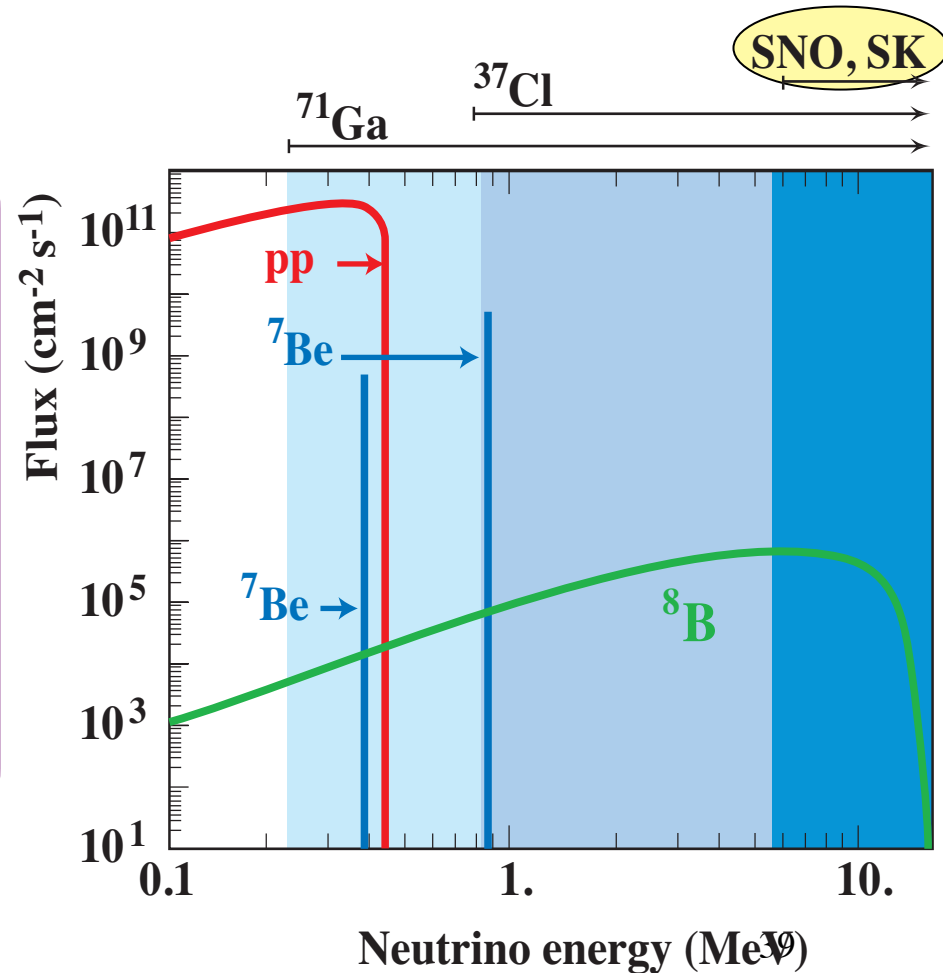
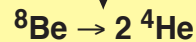
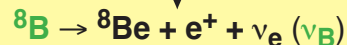
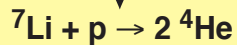
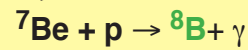
15%



15%



0.02%



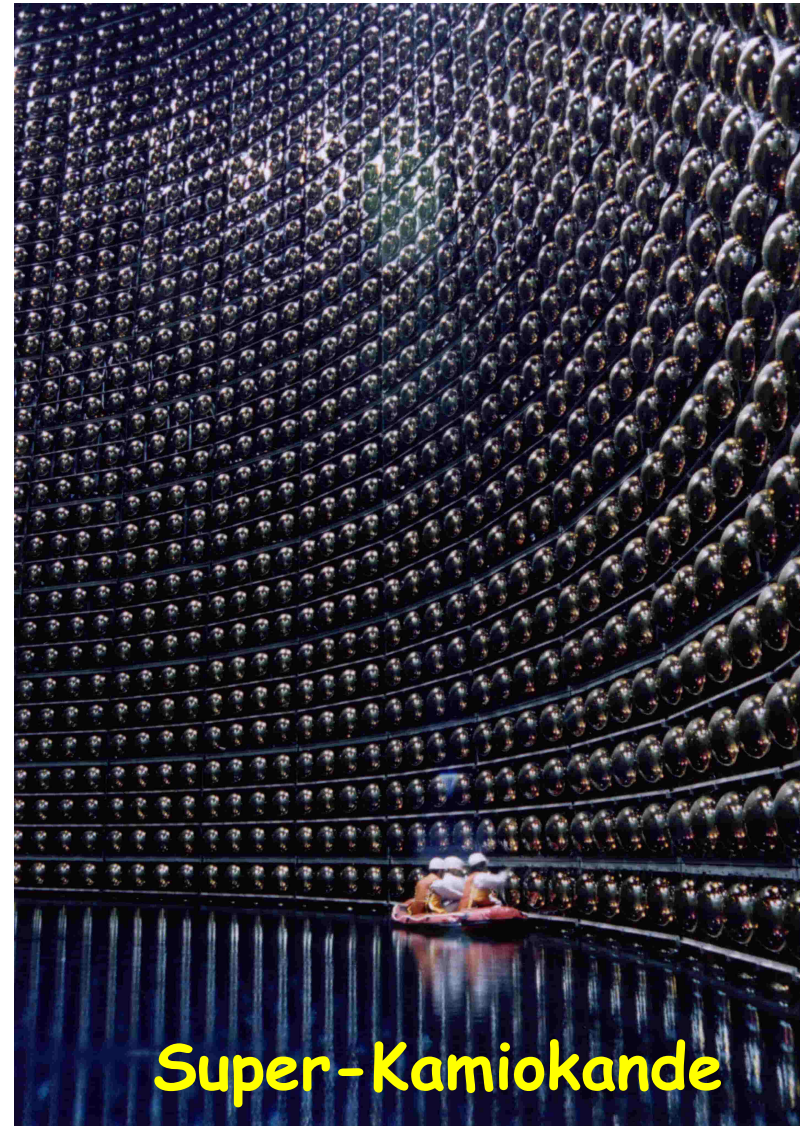
Neutrinos solaires

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



seuil = 6.5 MeV

(1986)

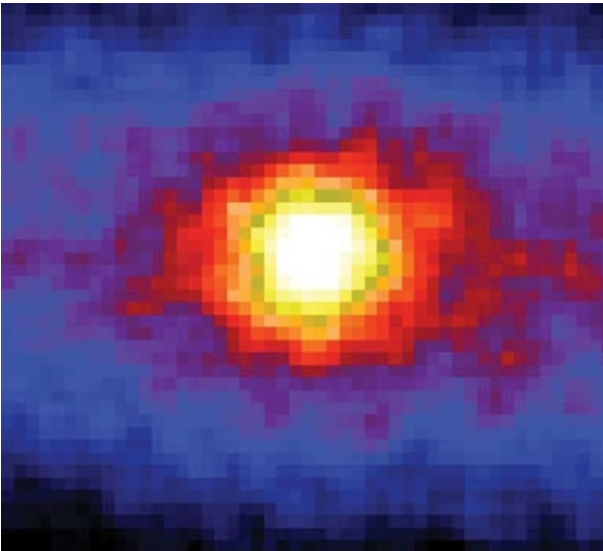


Super-Kamiokande

Neutrinos solaires

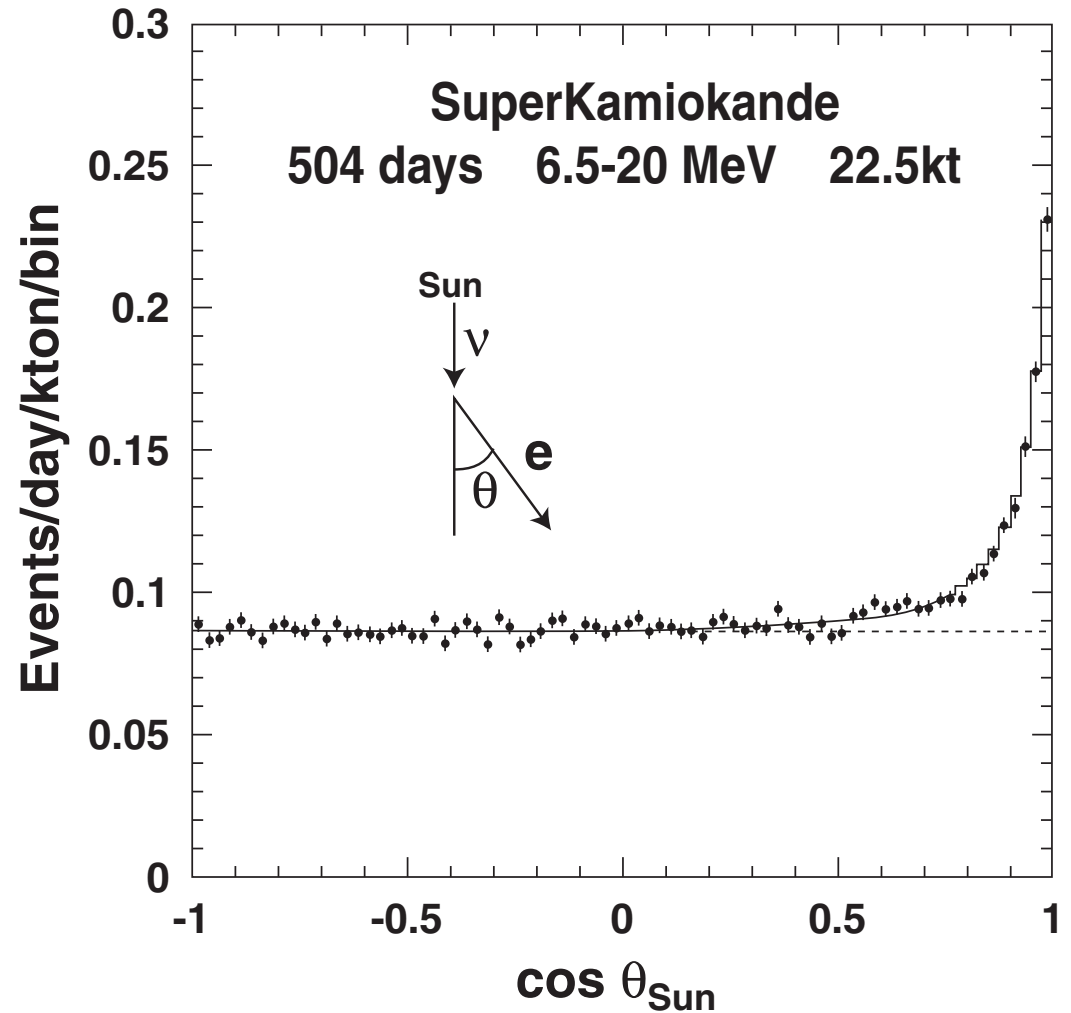
SuperKamiokande

-origine solaire confirmée



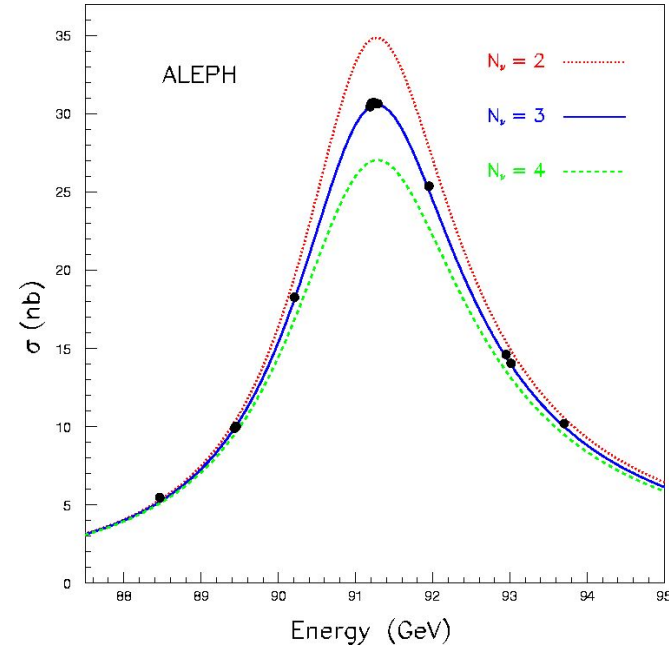
- déficit persistant

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



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

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

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

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

saveur

masse

cas simplifié à 2 familles
 $m_1 \neq m_2$

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

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

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

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

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

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

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

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

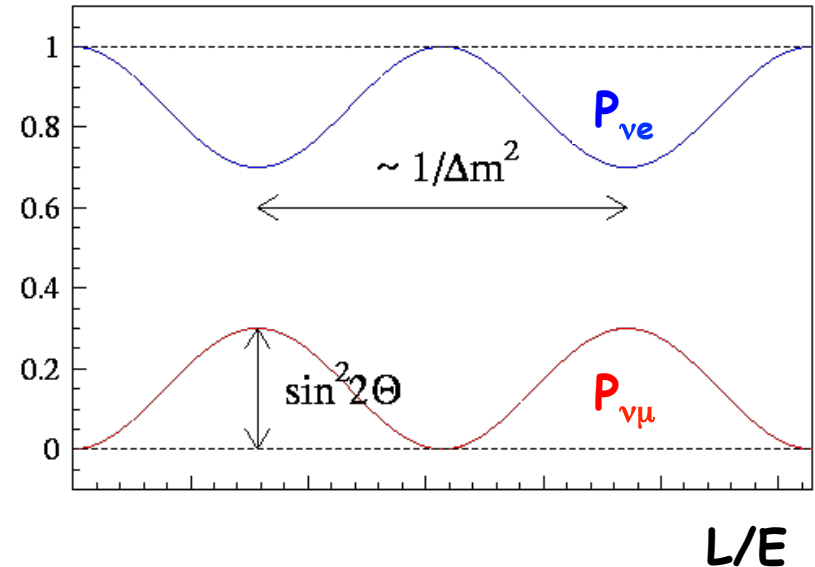
Pontecorvo 1958 :
**« une piste pour réduire
 le flux des ν solaires... »**

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



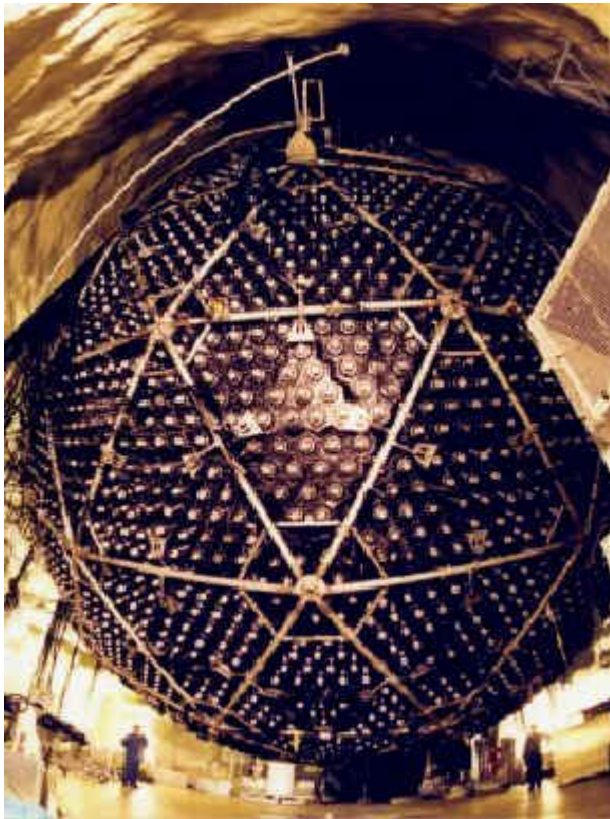
$\Rightarrow 1 - \frac{1}{2} \sin^2 2\theta$
en moyenne si
 $L_{\text{Terre-Soleil}} \gg L_{\text{osc}} = 4\pi E / \delta m^2 \quad (= 4\pi \hbar c E / \delta m^2 c^4)$



Faut détecter les différents saveurs de ν !

Neutrinos solaires: énigme résolue

SNO: mille tonnes de D₂O → Sensibilité aux différentes saveurs de ν



Diffusion élastique (DE)



Courant chargé (CC)

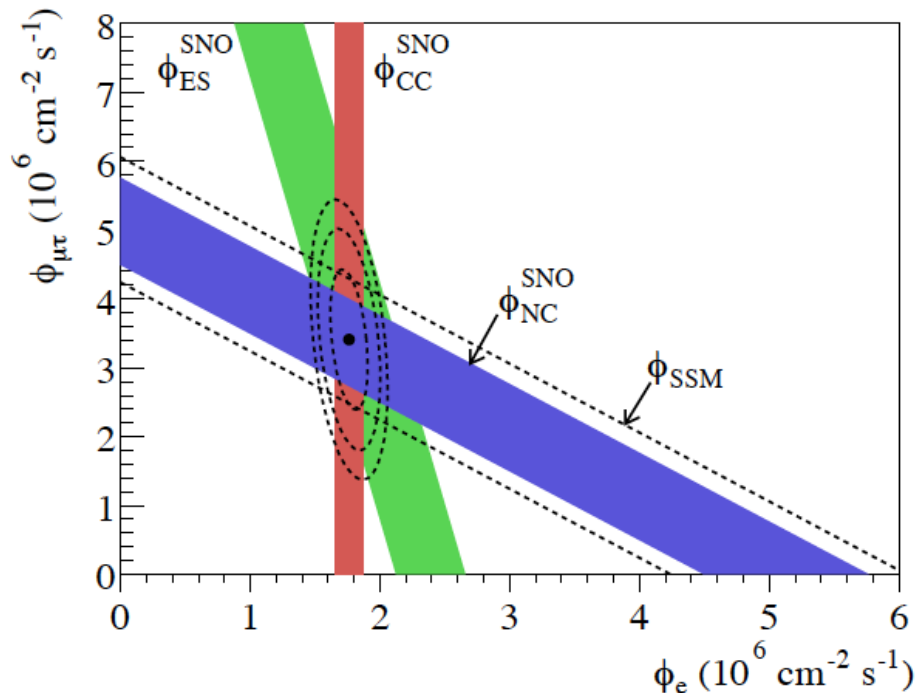


Courant neutre (CN)

Radiochimie : CC uniquement sur Cl ou Ga, ν_e
Cerenkov: DE avec sensibilité aux ν_μ et ν_τ
(taux $\nu_e = 6 \times$ 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)

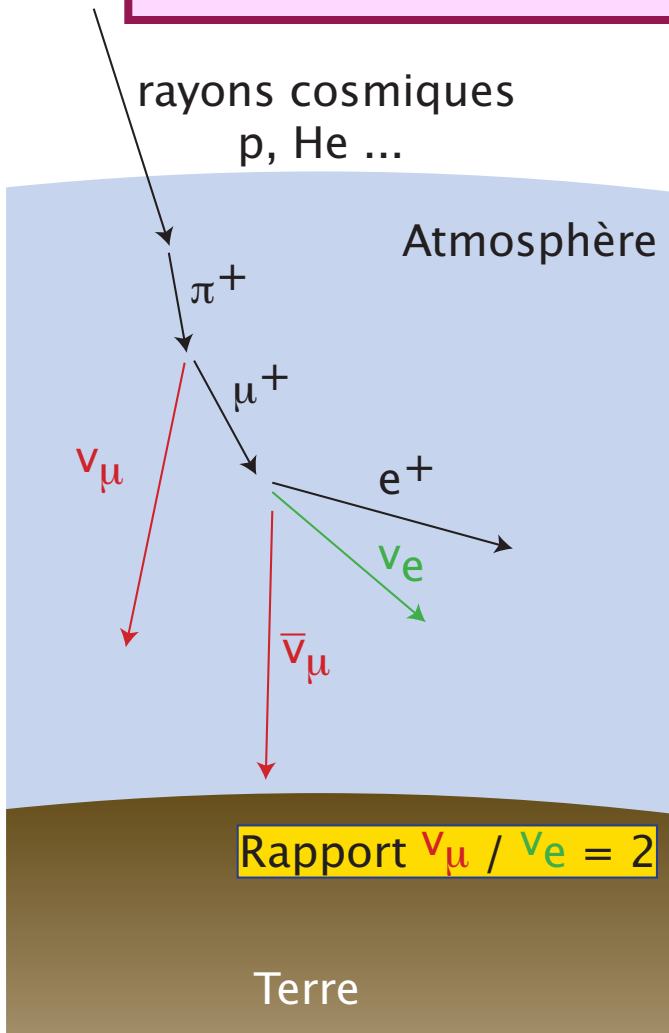


Astroparticule

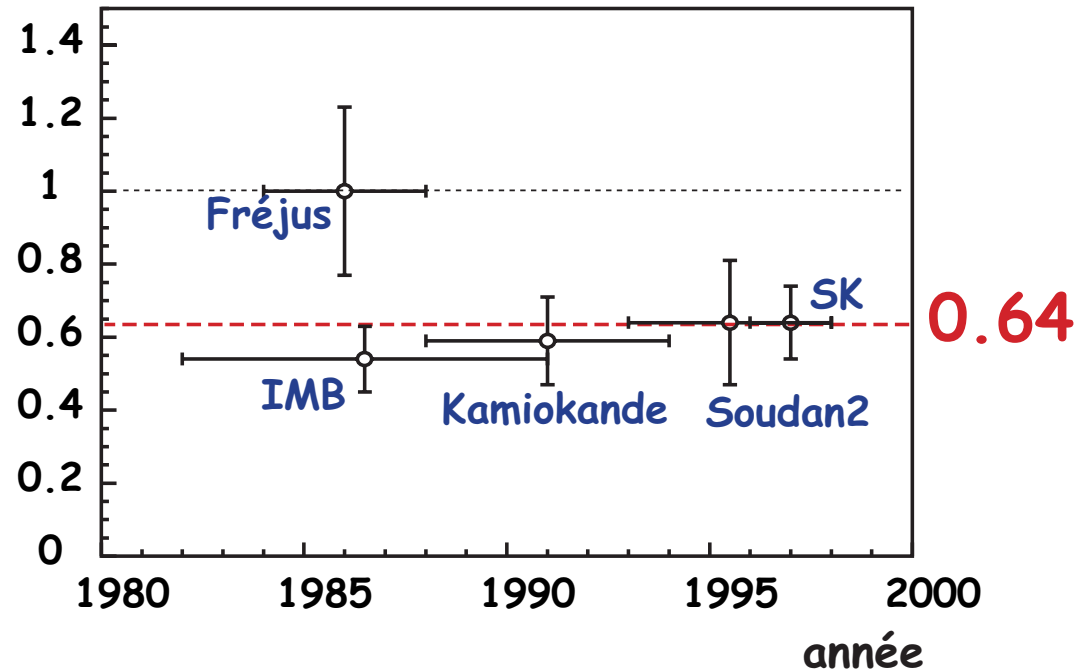
3/3

- Astronomie neutrinos à haute énergie
- Saga solaire
 - détection des neutrinos du soleil
 - oscillations neutrinos
- • Neutrinos atmosphériques (et autres?)
- Neutrinos dans l'Univers
 - Neutrinos et supernovae
 - Neutrinos et cosmologie

Neutrinos atmosphériques

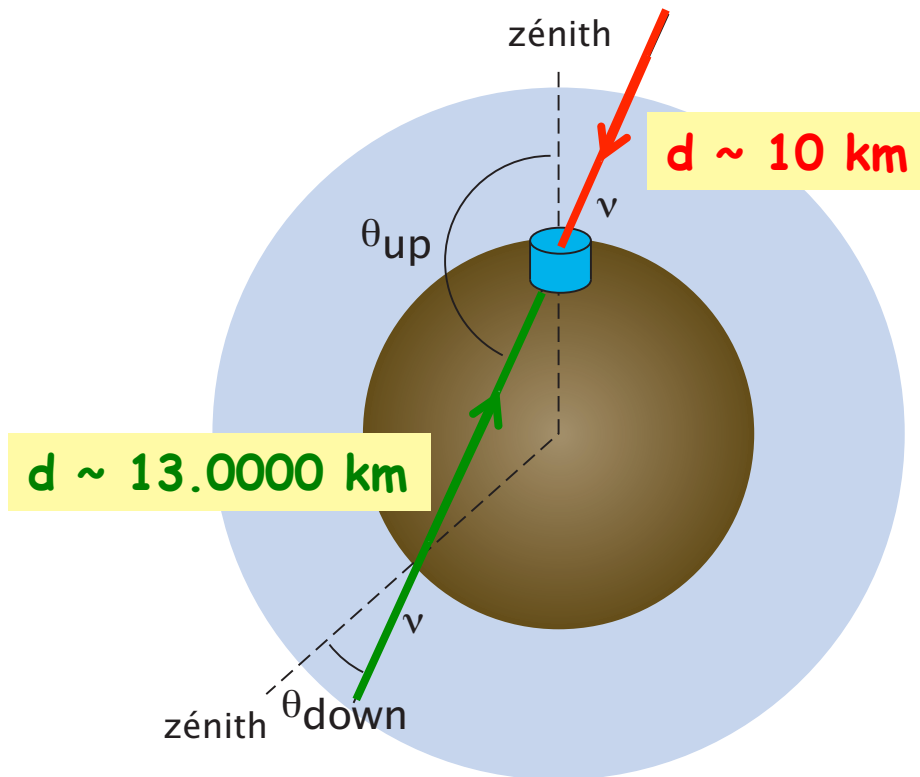


(μ / e) data
 (μ / e) MC



Neutrinos atmosphériques

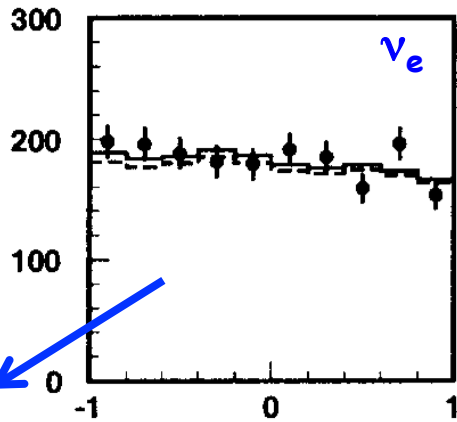
Dépendance angulaire
au niveau du détecteur



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

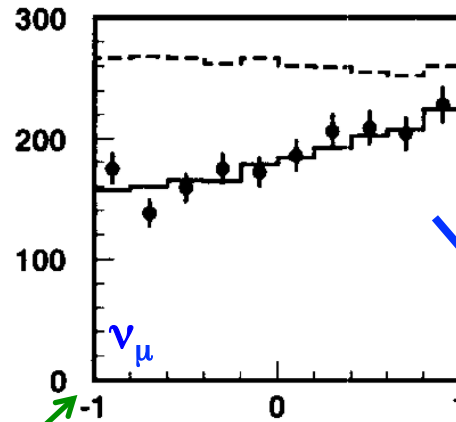
Note: pour $E \sim 1 \text{ GeV}$ et
 $\delta m^2_{12} \sim 7.94 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$,
 $L_{osc} \gg \Phi_{terre}$
donc condition non remplie
pour cas « solaire »

Neutrinos atmosphériques



Sub-GeV e-like

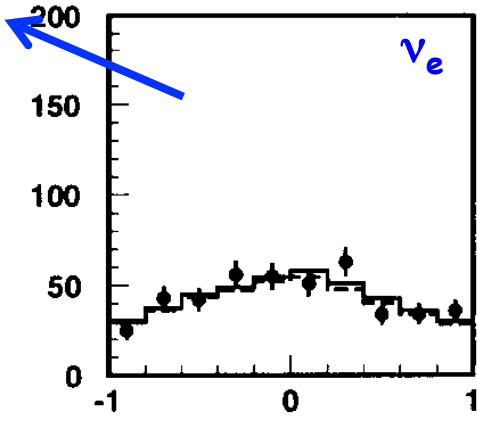
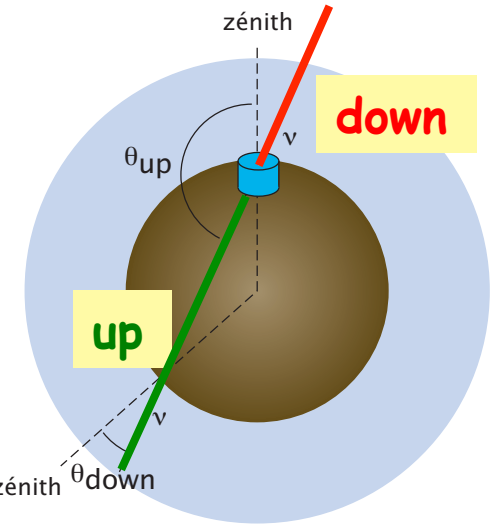
ν_e OK



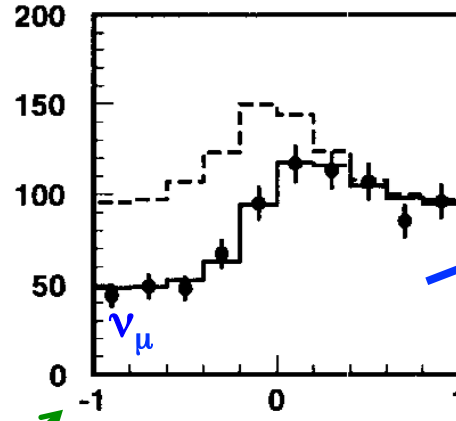
Sub-GeV μ -like

up

down



Multi-GeV e-like



Multi-GeV μ -like+PC

down

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

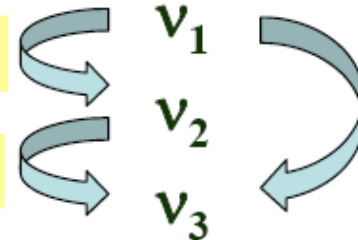
Paramètres inconnus: θ_{13}, δ

Solaire

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

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

θ_{12} solar neutrino oscillation



$$\delta m_{23}^2 \sim 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\theta_{23} \sim 45^\circ$$

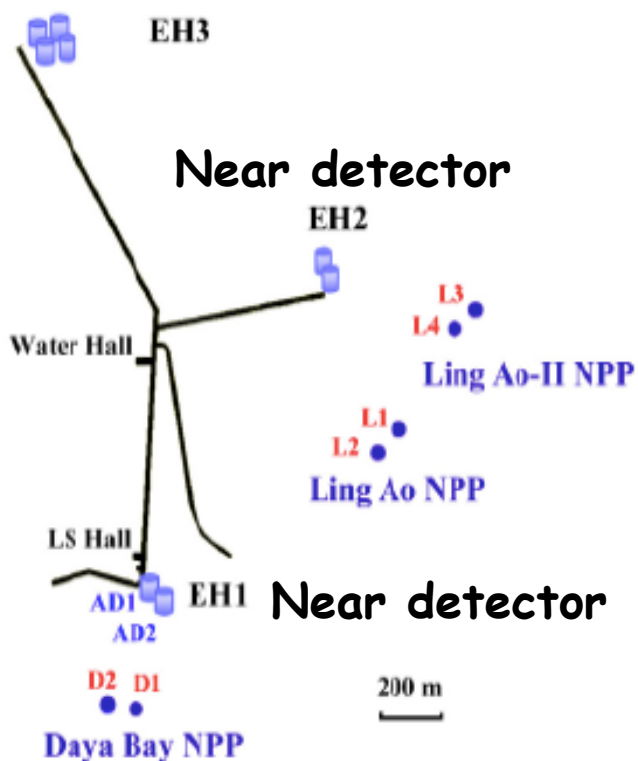
θ_{23} atmospheric neutrino oscillation

$\theta_{13} ?$

Neutrinos de réacteurs: Daya Bay

(Mars 2012)

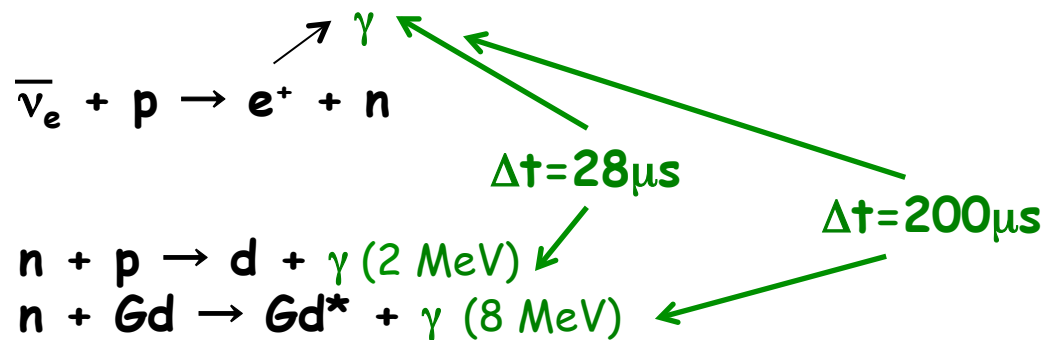
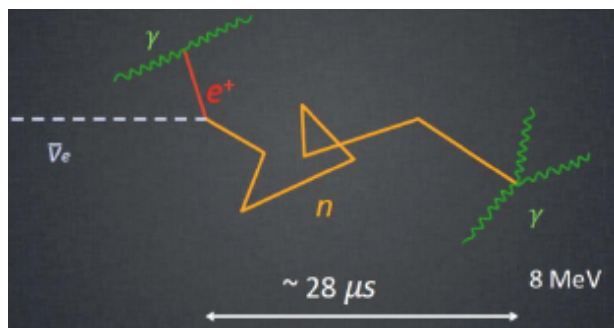
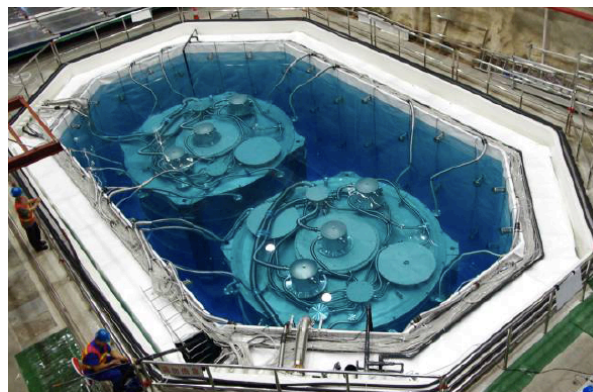
Far detector



- **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)

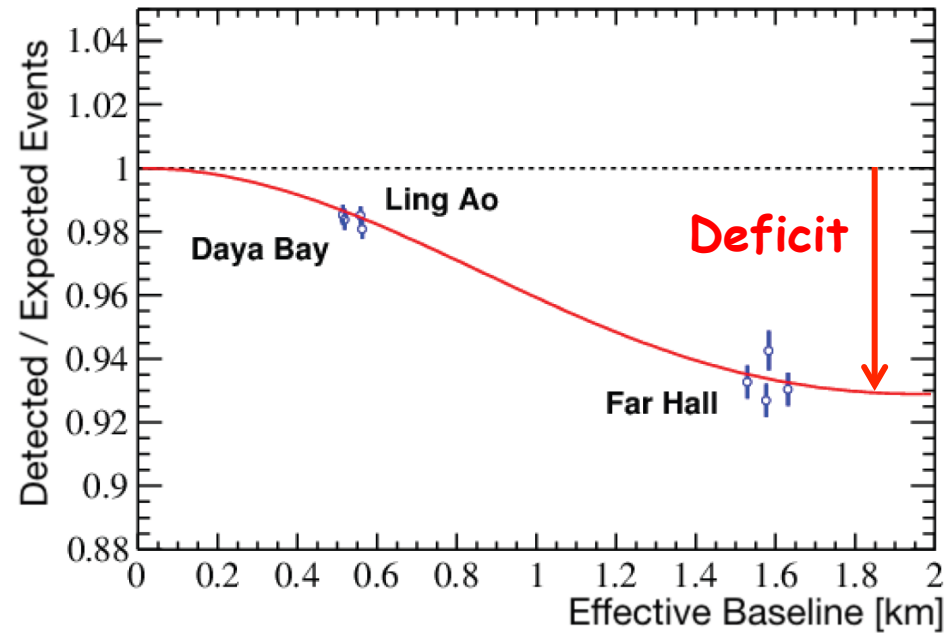
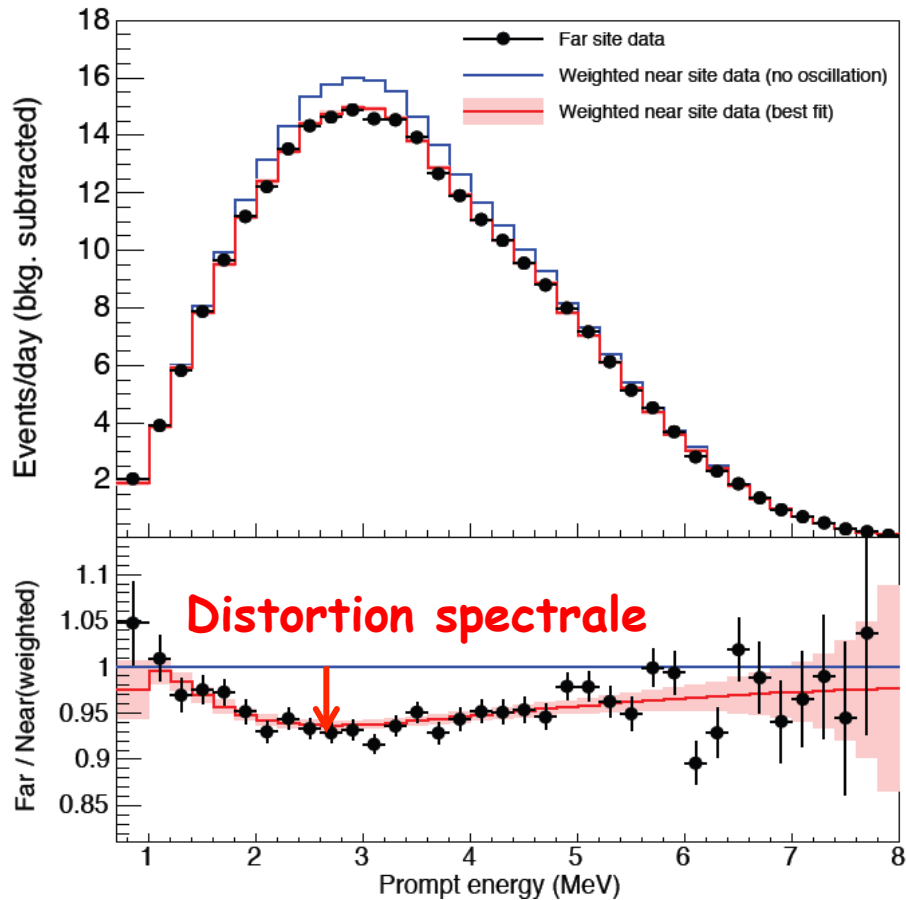
Neutrinos de réacteurs: Daya Bay

Scintillateurs liquides au Gd



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

Neutrinos de réacteurs: Daya Bay



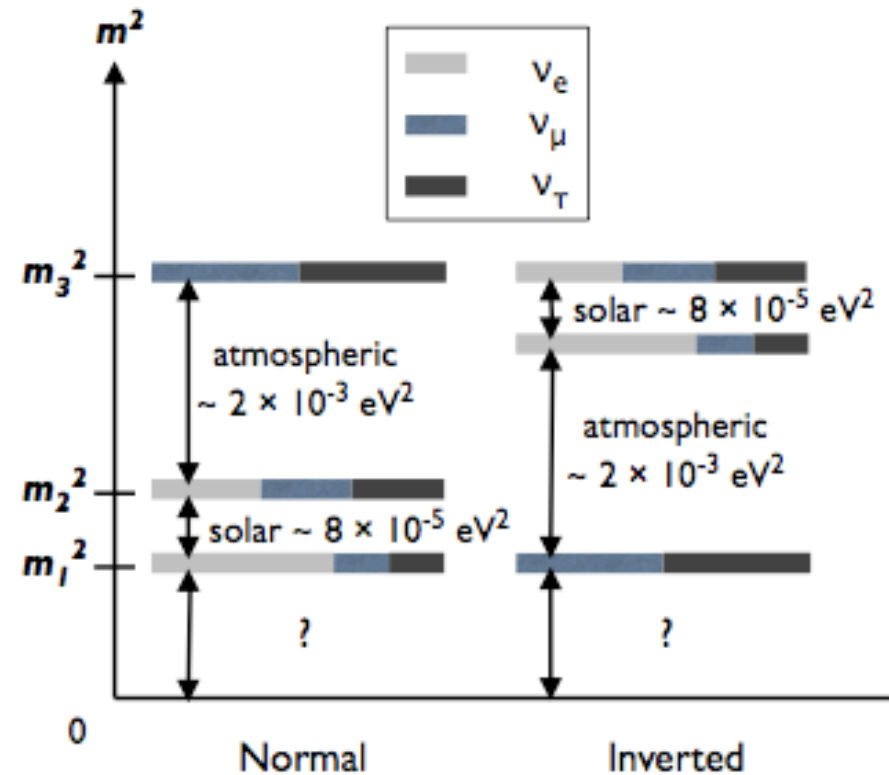
→ Oscillation à 3 neutrinos
 $\sin^2 2\theta_{13} = 0.084 \pm 0.005$



**Bilan
Oscillations
neutrinos**

Bilan oscillations des ν

- m_ν non nulle (oscillations)
- Mesure δm^2 et non m
- 2 scenarios de hiérarchie des masses



Bilan oscillations des ν

Mesure des masses ?

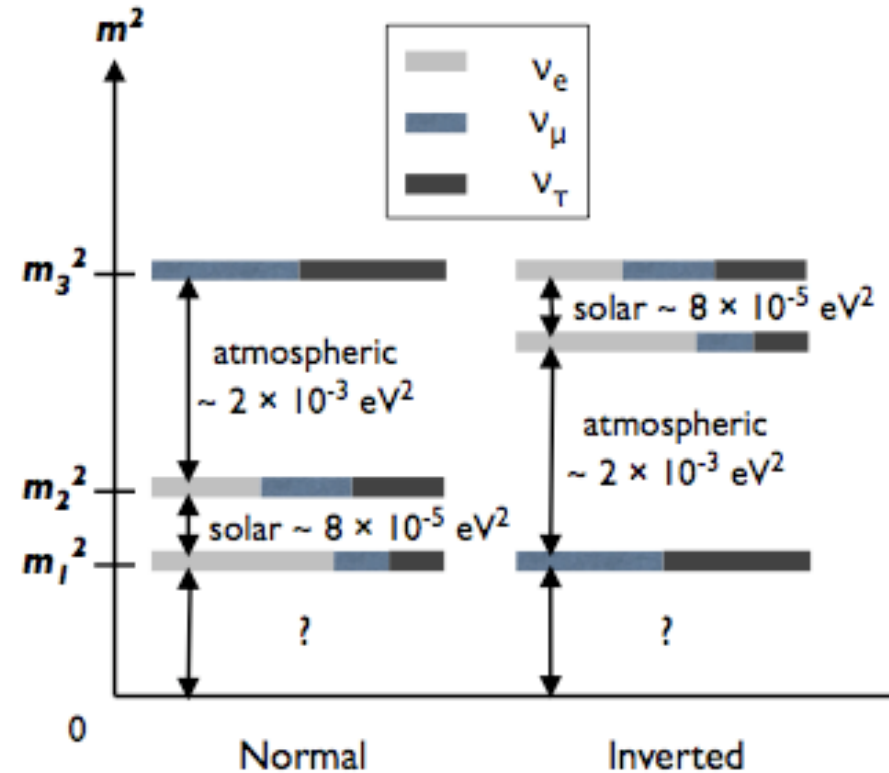
- ν atmosphériques $\Rightarrow m_{\min} = \sqrt{\delta m_{23}^2}$
au moins 1 ν à $m > 0.05 \text{ eV}$

- 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



Dans l'univers, $n_\nu \sim n_{\bar{\nu}} \sim 3 \cdot 10^9 n_p$
donc pour $m_\nu \sim 0.1 \text{ eV} = 10^{-10} m_p$
masse totale des ν ($n_\nu m_\nu$) de l'ordre
de masse totale des étoiles !

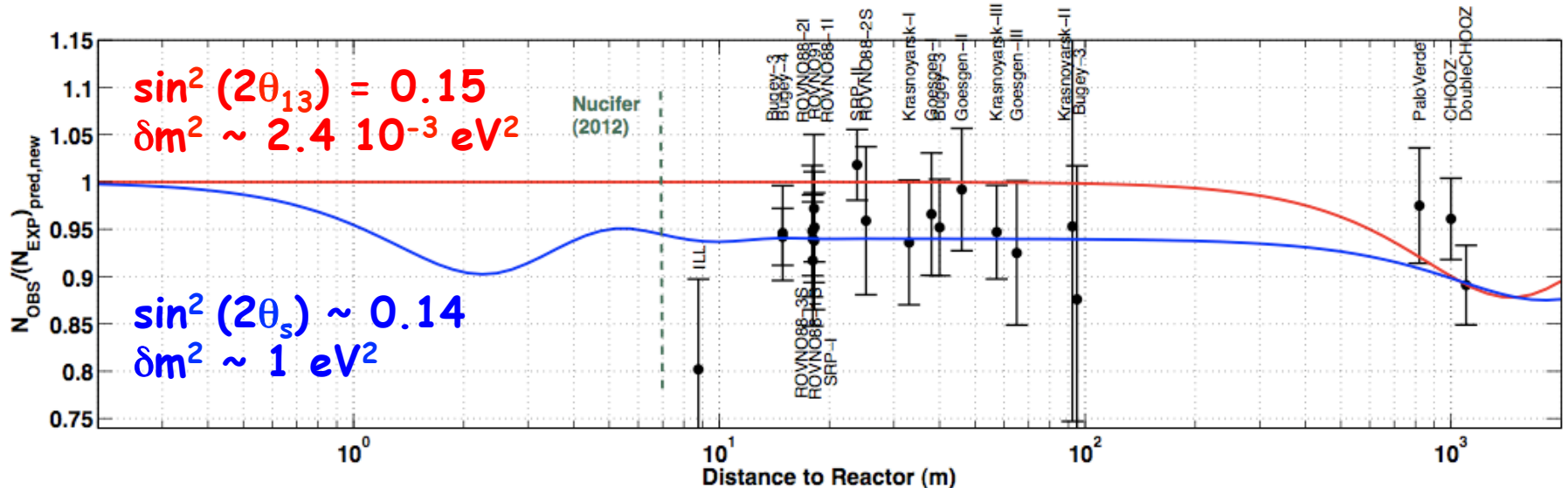
Un neutrino stérile?

2011: Nouveau calcul du flux $\bar{\nu}_e$ des réacteurs
 (à partir de mesure des spectres de e^- provenant de ^{235}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 $L \sim 10\text{-}100 \text{ m}$?



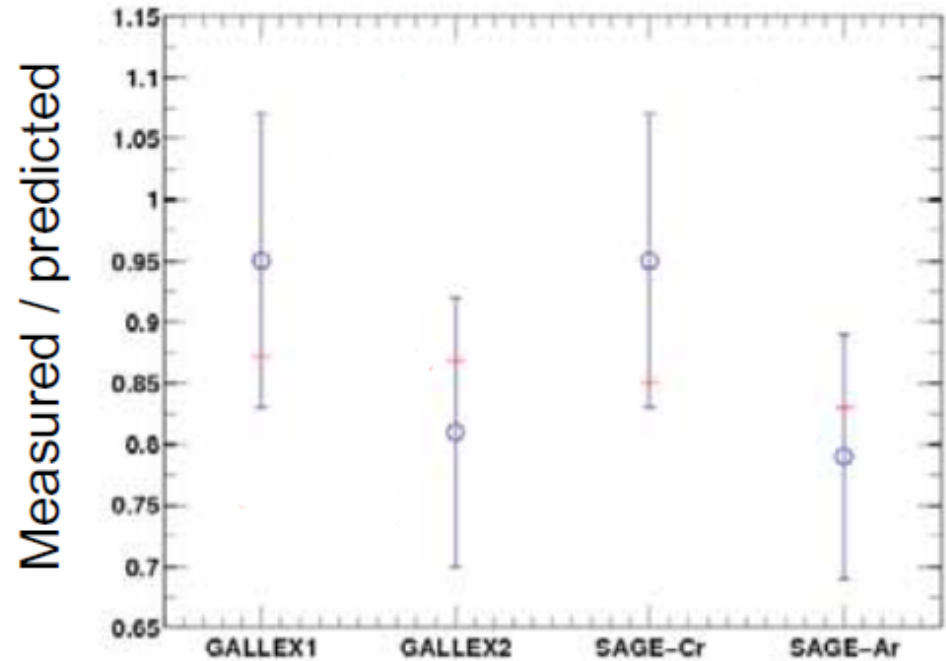
Un neutrino stérile?

"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?

Astroparticule

3/3

- Astronomie neutrinos à haute énergie
- Saga solaire
 - détection des neutrinos du soleil
 - oscillations neutrinos
- Neutrinos atmosphériques (et autres?)
- Neutrinos dans l'Univers
 - Neutrinos et supernovae
 - Neutrinos et cosmologie

Evolution stellaire

Combustion cœur de l'étoile

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

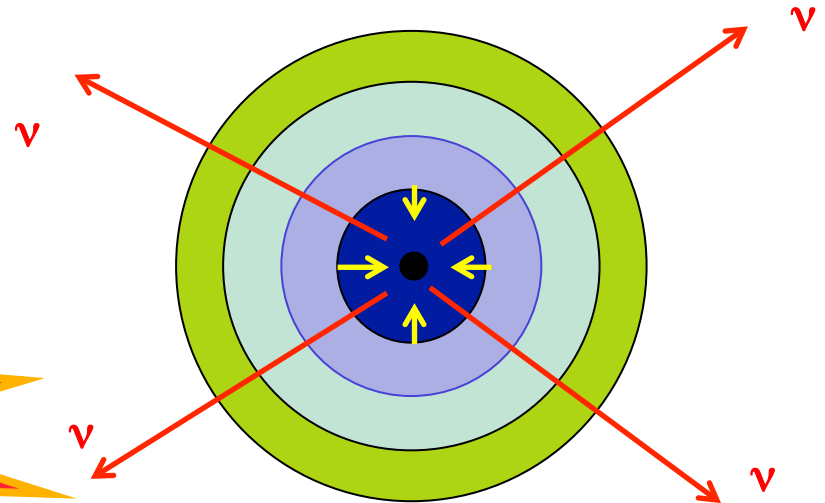
Masse cœur > 1.4 Msoleil

→ Effondrement catastrophique
(stoppé par dégénérescence des n)

Onde de choc

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

**Supernova
SNII**



99% de E en ν

galaxie
lointaine



© Anglo-Australian Observatory



SN 1987A

© Anglo-Australian Observatory

1987A

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

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

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

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

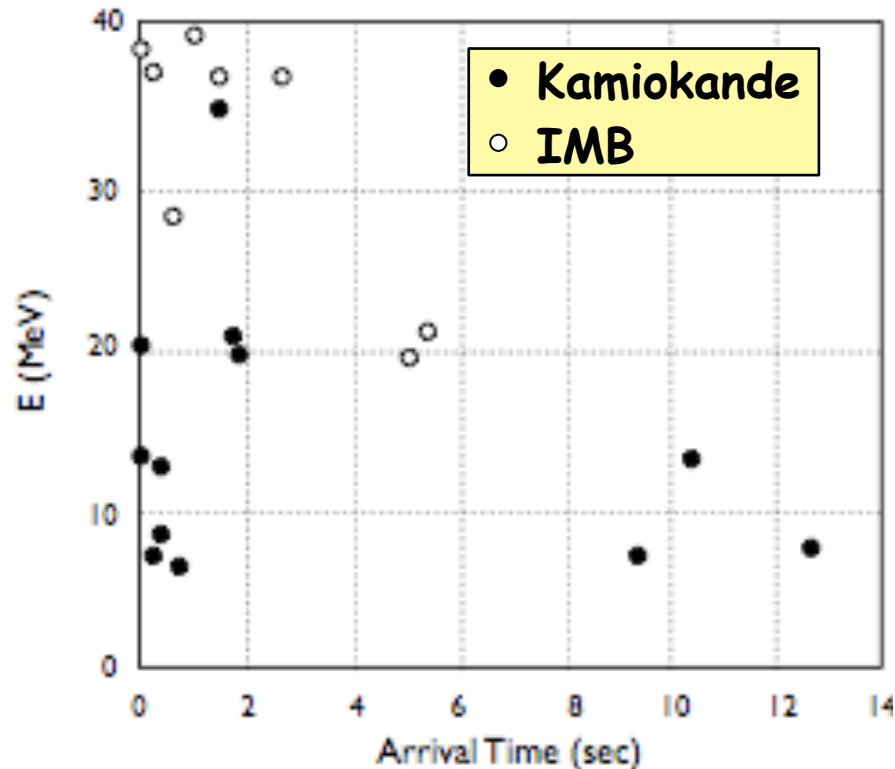
Donc contrainte sur m_ν à partir de $\Delta t/\Delta E$:

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

1987A

23 février 1987: ~20 neutrinos en provenance de SN1987A en $\Delta t=10s$
(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 1987)

SN dans galaxie

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

Neutrinos et cosmologie

Univers

Corps noir en expansion, $T_\gamma \searrow$ (2,7K aujourd'hui)

$T_\nu \propto T_\gamma$ donc $T_\nu \searrow$ (1,9K aujourd'hui = **0,2 meV**)

Neutrinos massifs mais m_ν petit

$60 \text{ meV} < \Sigma m_\nu < 6 \text{ eV}$

→ au moins 1 neutrino non-relativiste aujourd'hui

→ neutrinos relativistes durant essentiel de histoire de l'Univers

ν relativistes \longleftrightarrow ν non-relativistes \longrightarrow

CMB

Formation des structures

THE DARK AGES



Neutrinos & large-scale structures

Neutrinos se propagent à $v=c$ ("free stream") jusqu'à t_{nr}

⇒ $\delta_v \sim 0$ jusqu'à t_{nr}

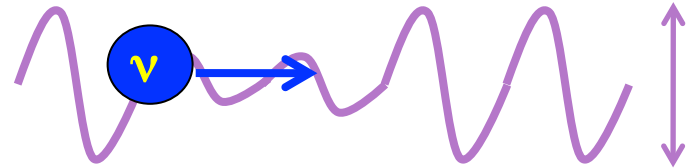
⇒ Croissance des structures freinée pour échelles $\lambda < ct_{nr}$

Croissance des structures normale pour échelles $\lambda > ct_{nr}$

- Neutrinos lourds (t_{nr} tôt)

Suppression **forte** sur **petites** échelles

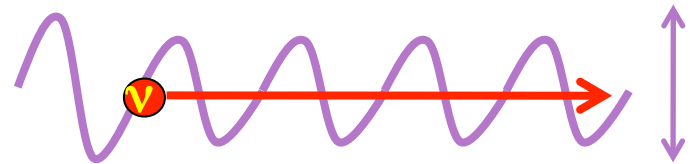
$m_\nu \sim \text{keV} \Rightarrow$ perturbations lissées sur distances \sim galaxies naines



- Neutrinos légers (t_{nr} tardif)

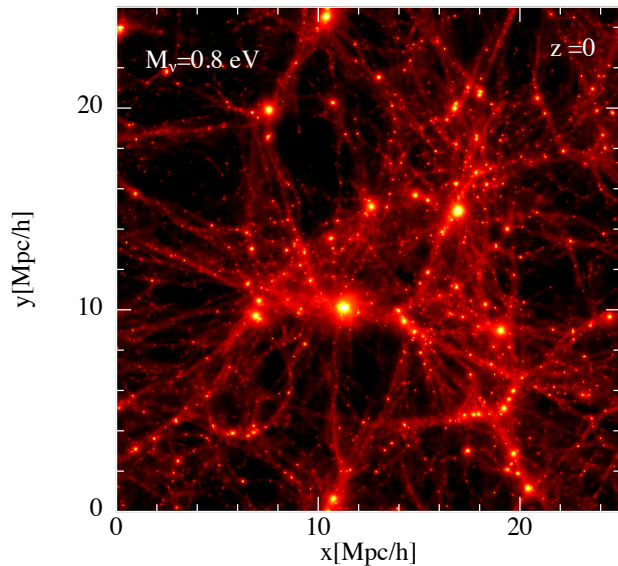
Suppression **faible** sur **grandes** échelles

$m_\nu \sim \text{eV} \Rightarrow$ perturbations lissées sur distances \sim amas de galaxies

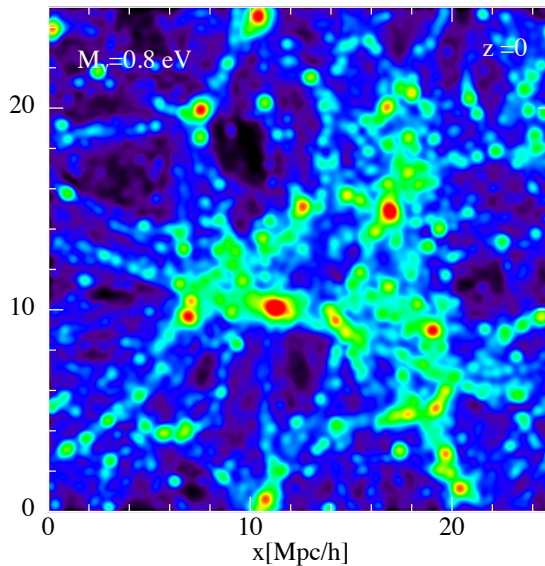


$\delta \text{ baryons} \sim \delta \text{ DM}$

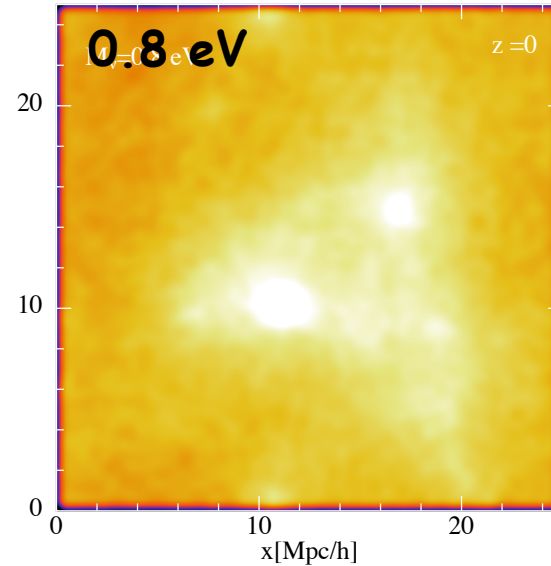
$\delta \nu \sim 0$



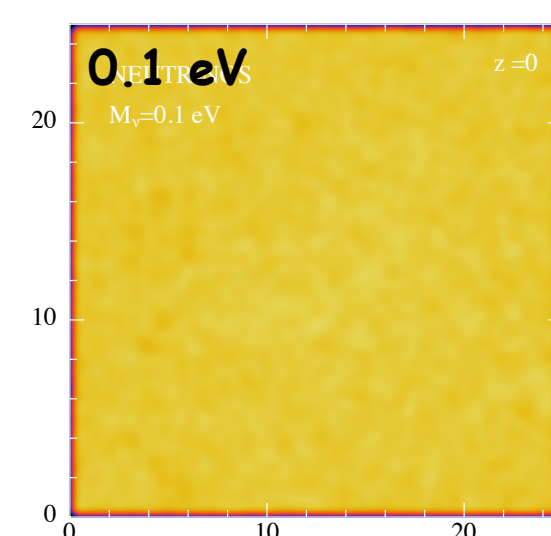
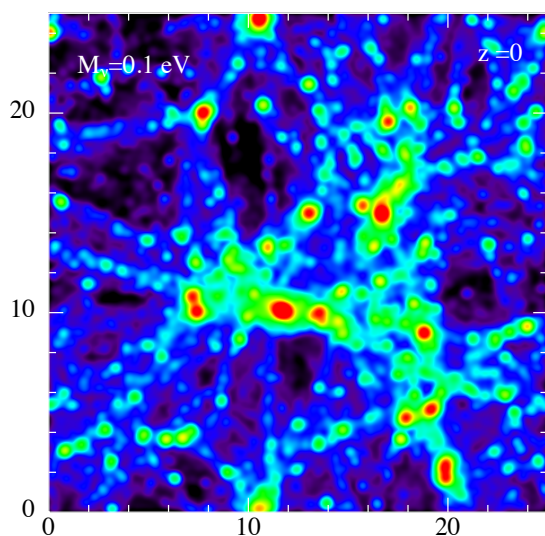
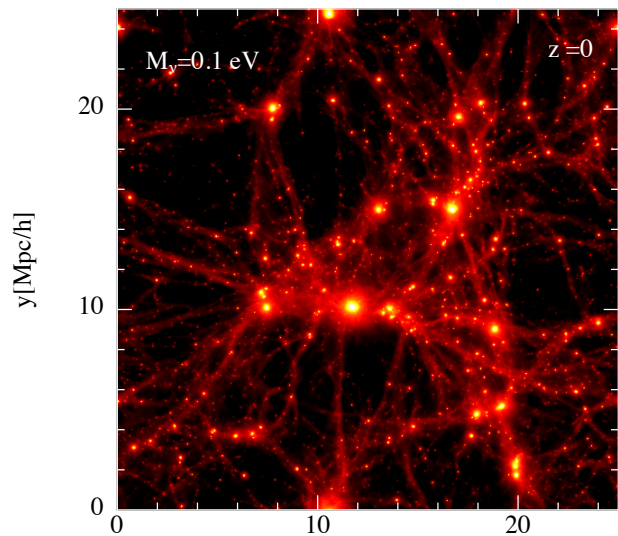
Baryons



Matière noire



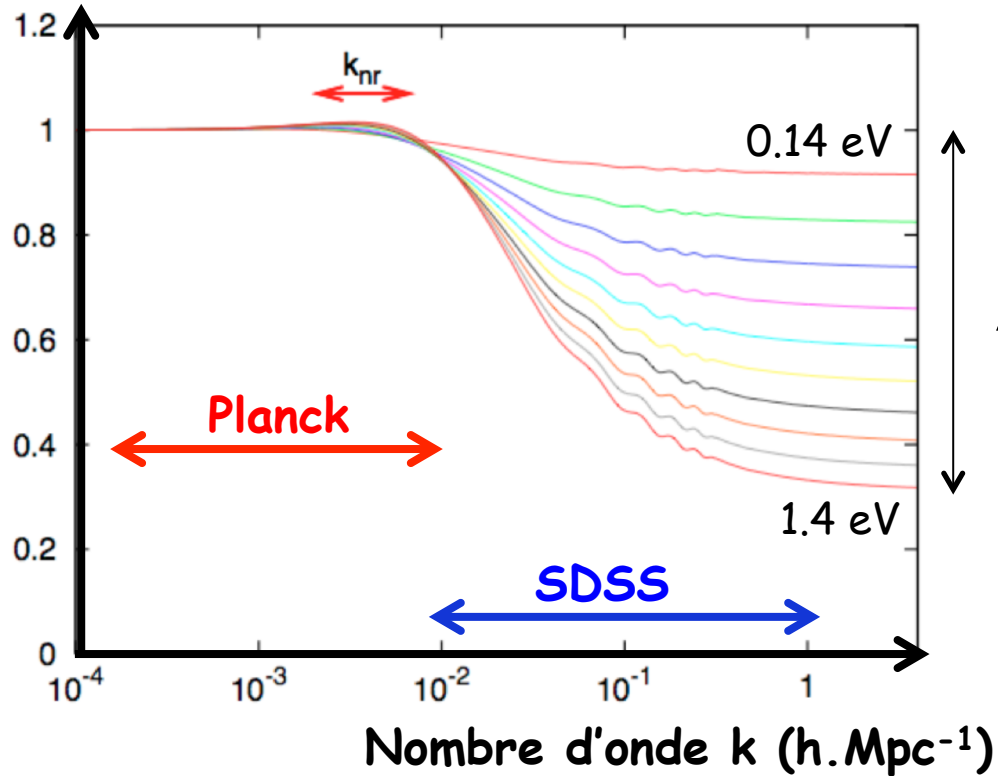
Neutrinos



© G. Rossi

Neutrinos et cosmologie

$P(k)$ avec ν massifs / $P(k)$ sans ν

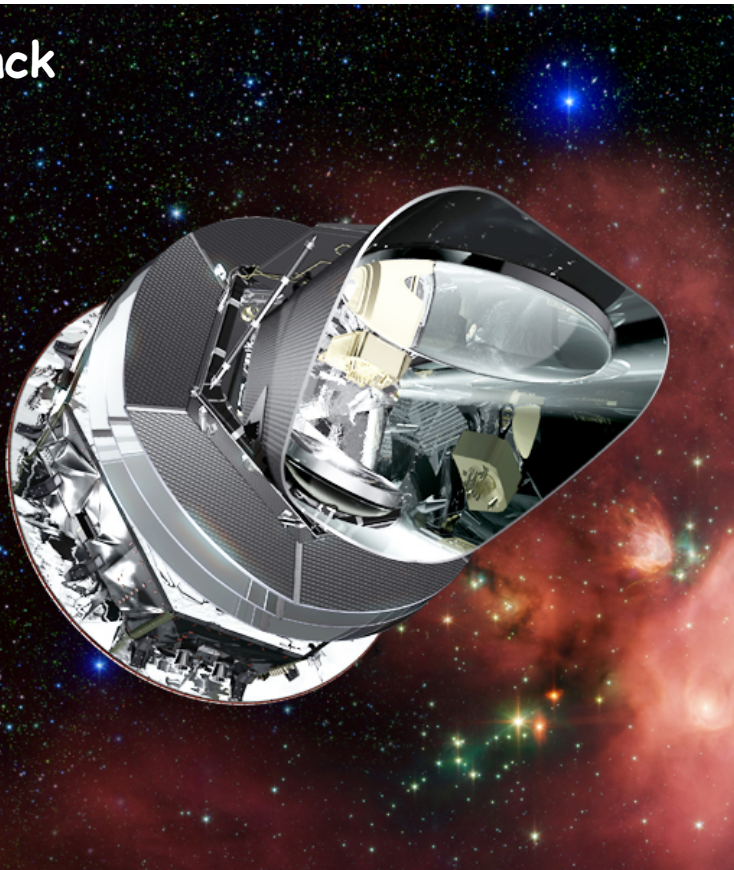


Grandes
échelles

Petites
échelles

Neutrinos et cosmologie

Planck



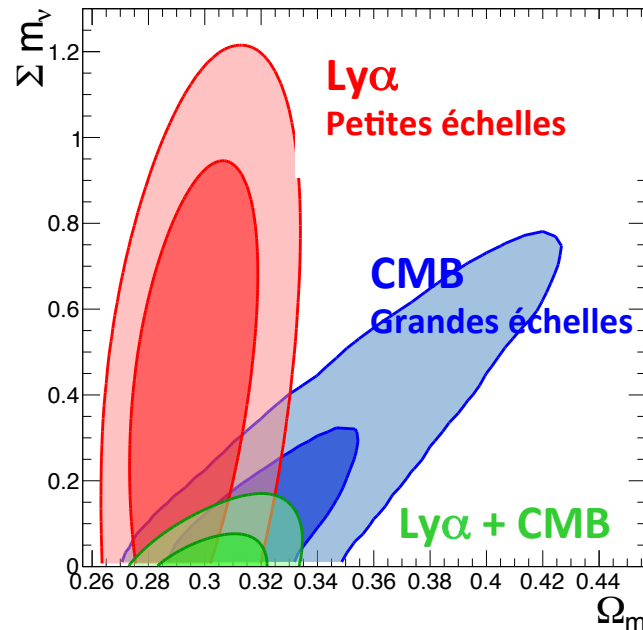
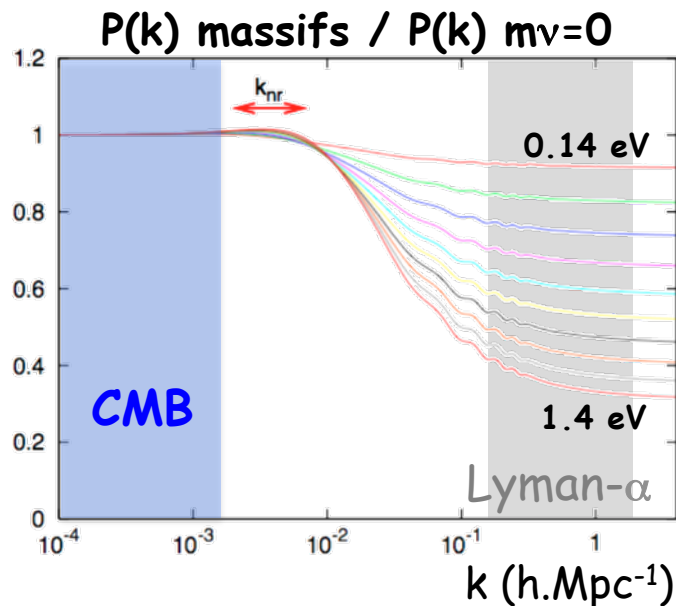
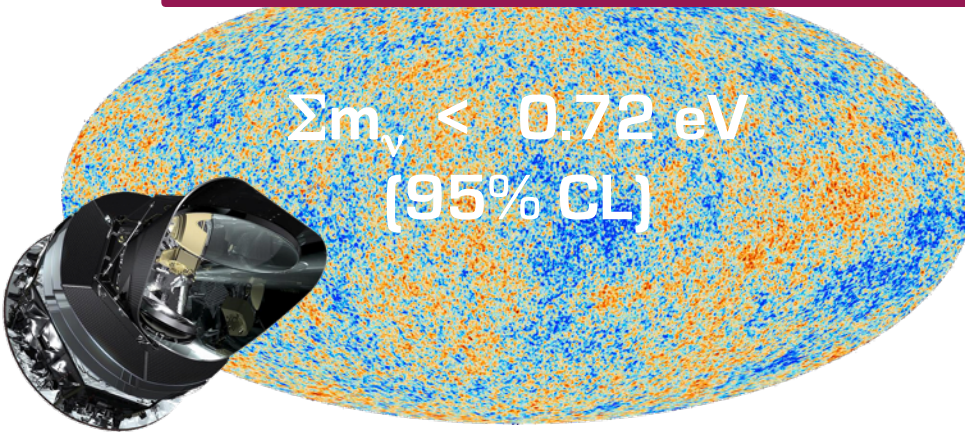
$z = 1100$
 $t = 380.000$ ans

SDSS
(BOSS)



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

Neutrinos et cosmologie



$\Sigma m_\nu < 0.12 \text{ eV}$

(2015)

Conclusions ?

Vaste domaine

rayons cosmiques

sursauts gamma

neutrinos de haute énergie

ondes gravitationnelles

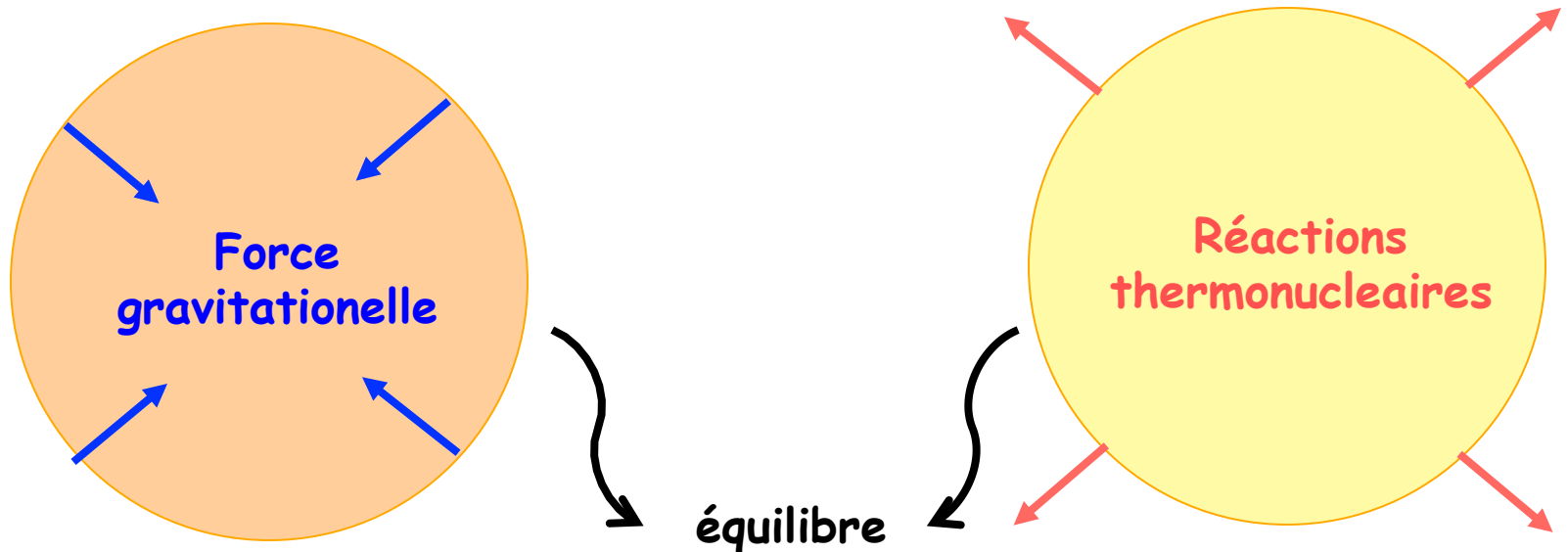
De grandes découvertes et avancées ces dernières années

Un domaine en plein essor

Fin

Conclusion

Evolution stellaire

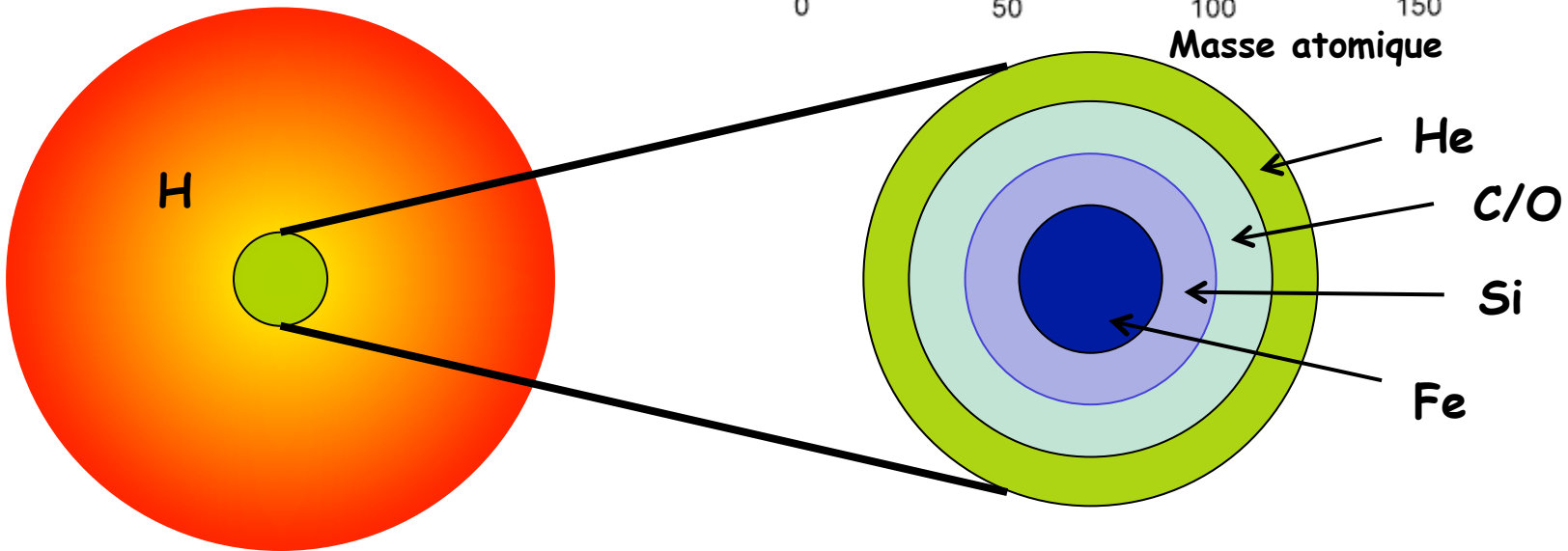
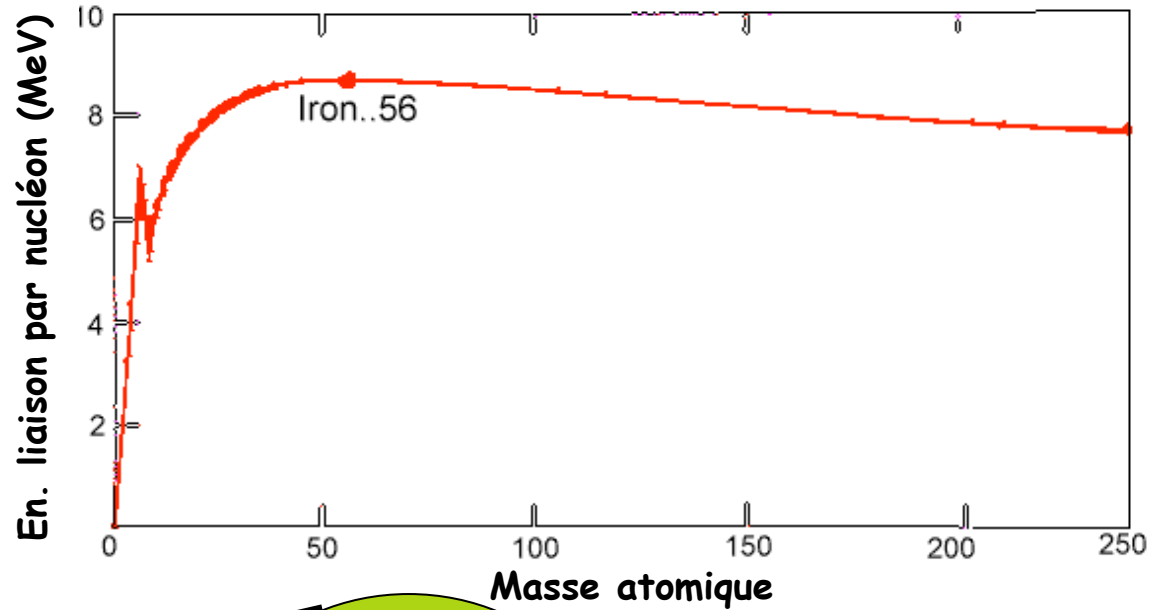
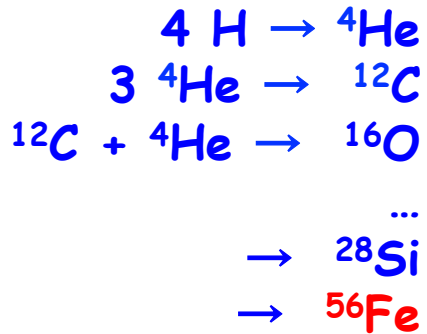


Disparition du carburant

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

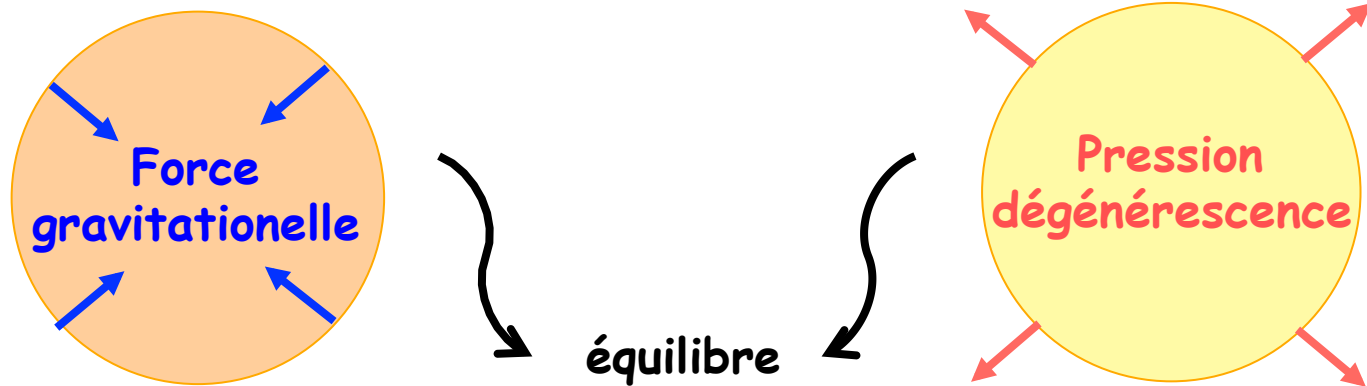
Evolution stellaire

Etoiles de masse initiale
> 8 masses solaires

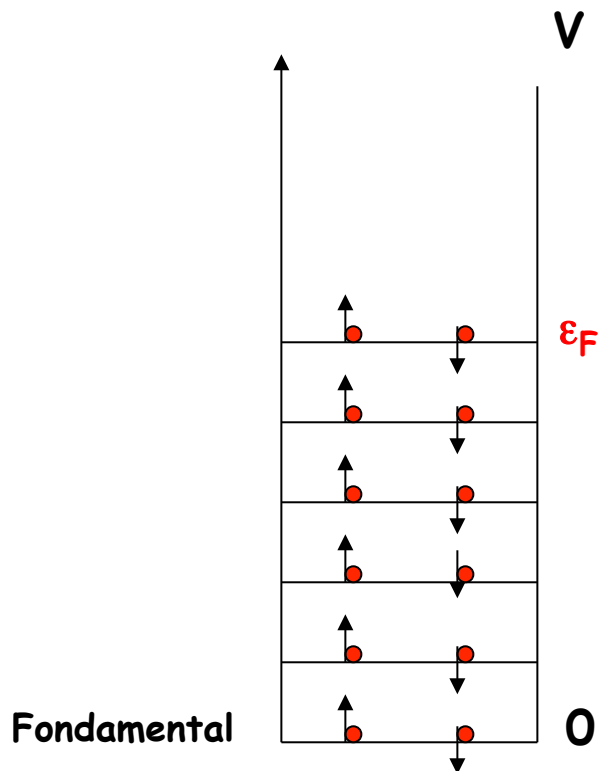


Evolution stellaire

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 »

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

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

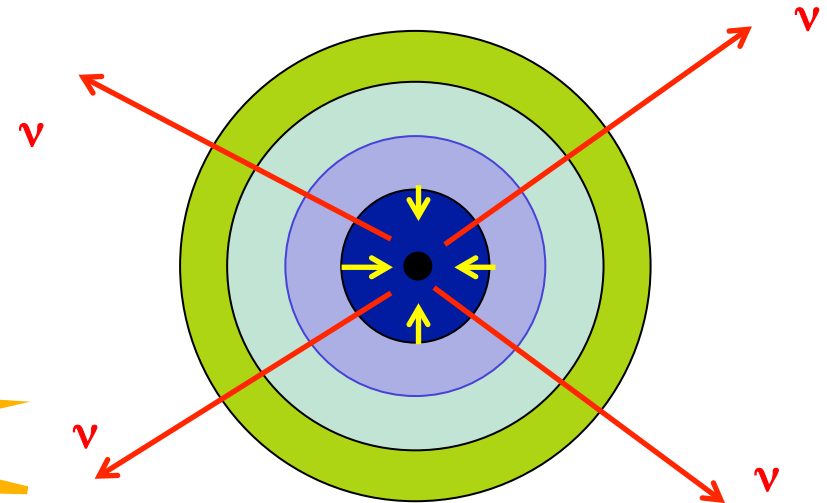
Capture électronique: $p + e^- \rightarrow n + \nu$

Diminution de pression de dégénérescence (ε_F) des e^-

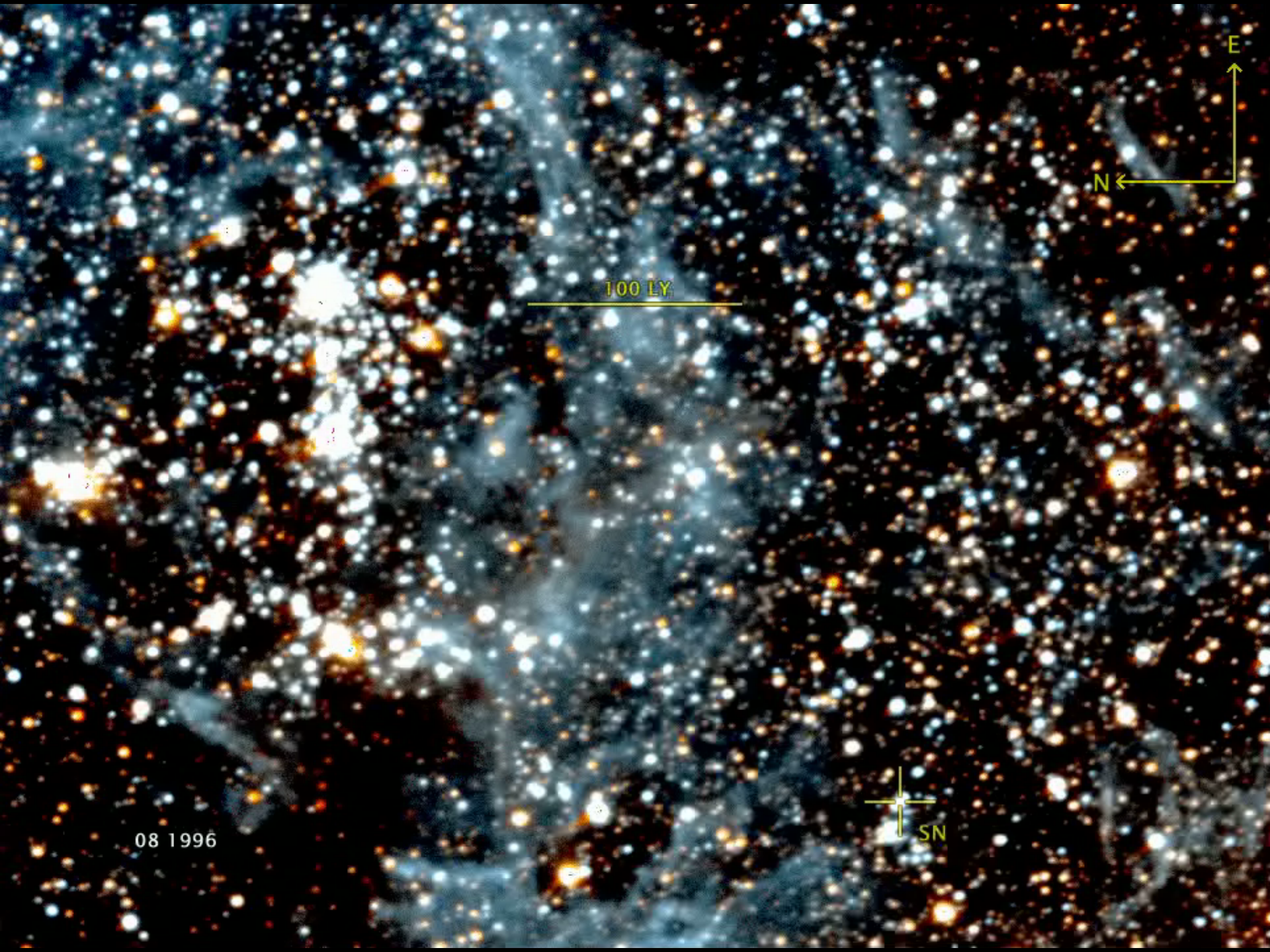
Effondrement du cœur de l'étoile

Arrêt brutal (ε_F des neutrons)
Onde de choc et émission de ν

Supernova



99% de E en ν



N
E

100 LY

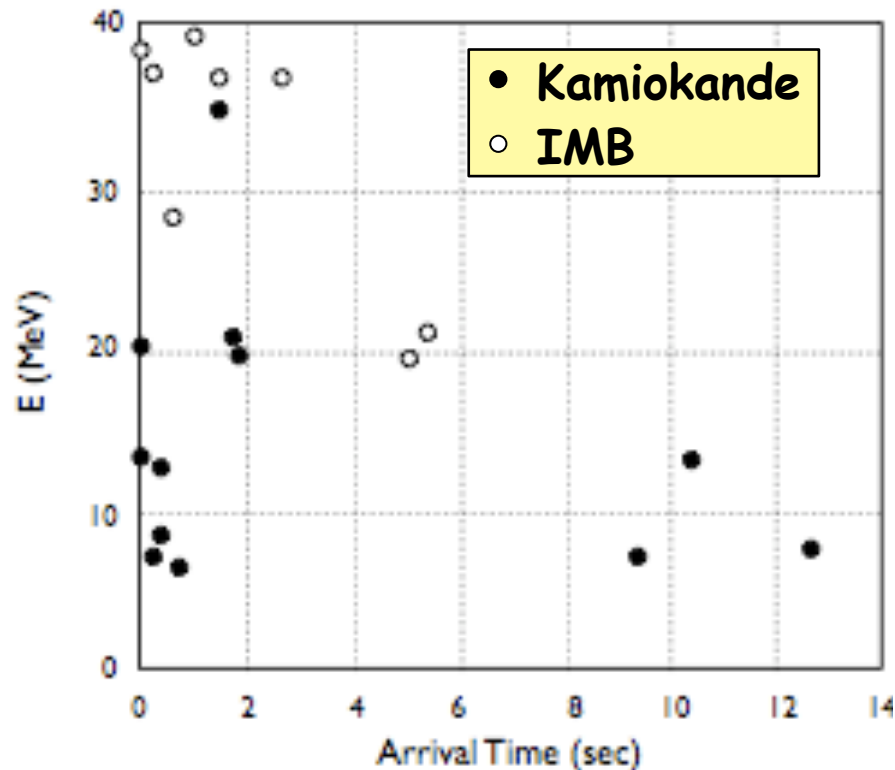
SN

08 1996

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 $\Delta t/\Delta E$:
$$\Delta t = -\frac{\Delta E}{E} \frac{d}{c} \left(\frac{mc^2}{E} \right)^2$$



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

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

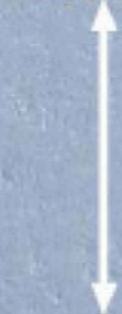
d galactic → contraintes $\sim \text{eV}$
sur $m(\nu_e, \nu_\mu \text{ et } \nu_\tau)$!

New South Pole Station

First IceCube string

IceCube Laboratory

1400m



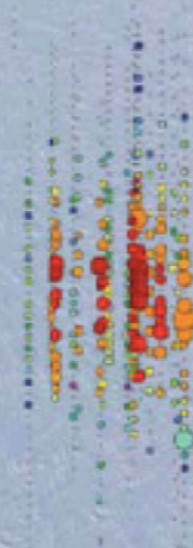
2400m



1500 m

AMANDA

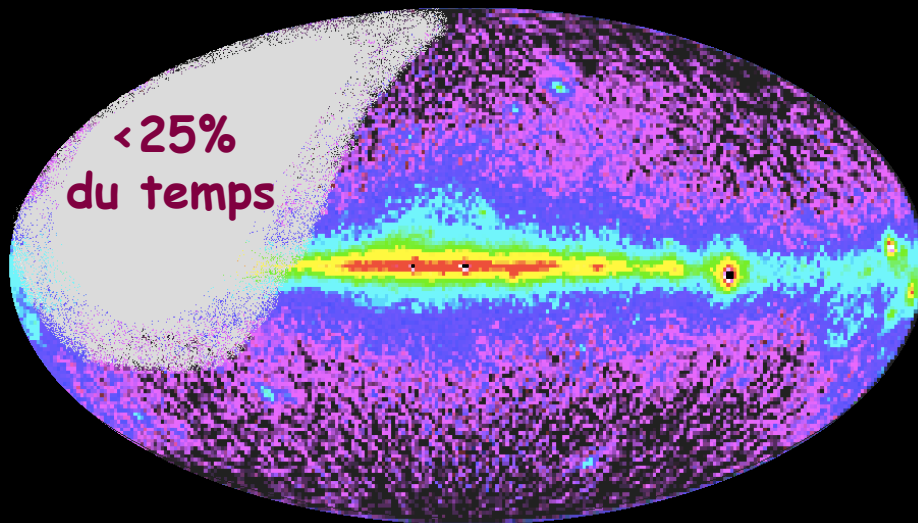
2000 m
[not to scale]



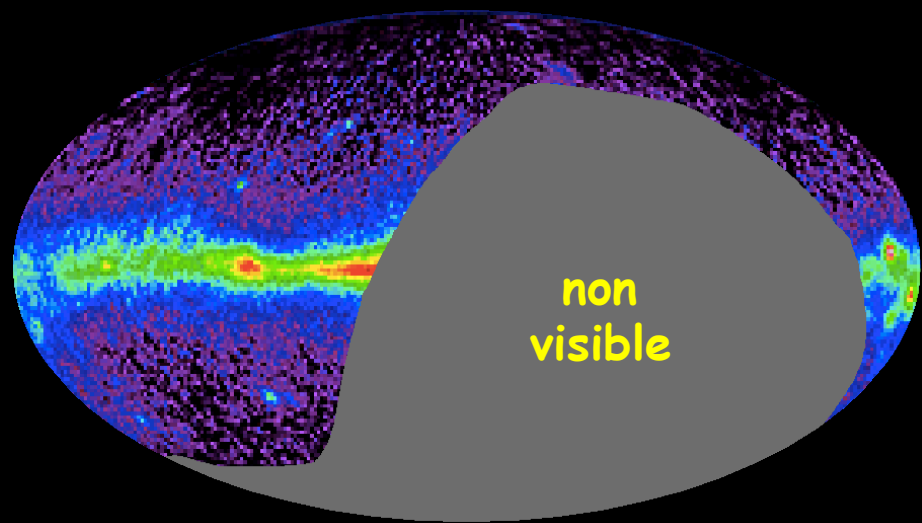


« Télescopes » à neutrinos

Antares
(43° North)



Ice Cube
(pôle Sud)



Intercalibration possible sur 0.6π steradians