

NEUTRINOS:
Les messagers secrets de
l'invisible

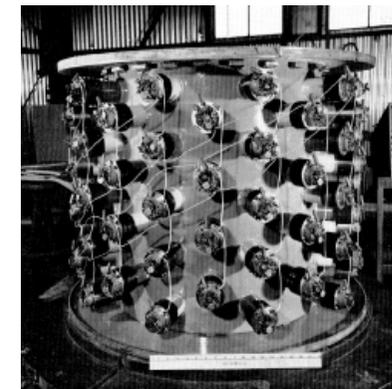
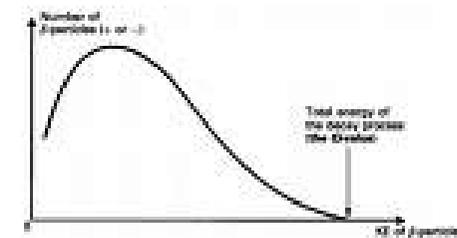
Un peu d'histoire

Problème de conservation d'énergie
dans les désintégrations β

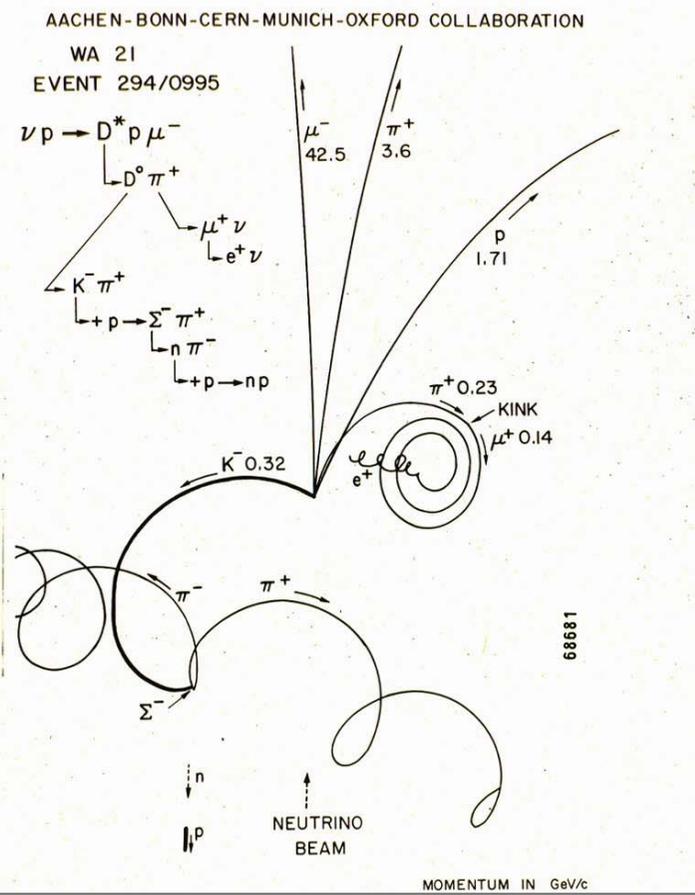
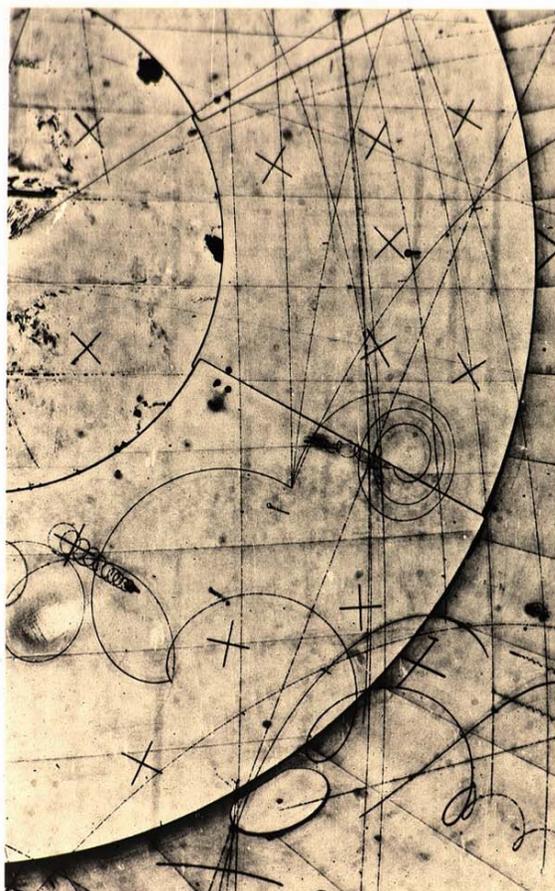
W. Pauli 1930, postule une particule
« indétectable »

E. Fermi 1933, le neutrino ν

Reines et Cowan 1956, la preuve
expérimentale



Portrait-robot



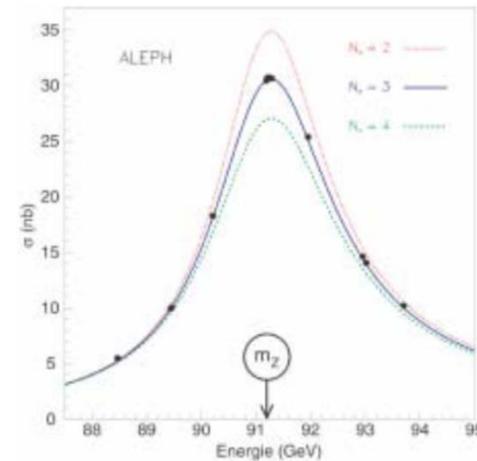
Les constituants élémentaires

Particules de
matière
(fermions)

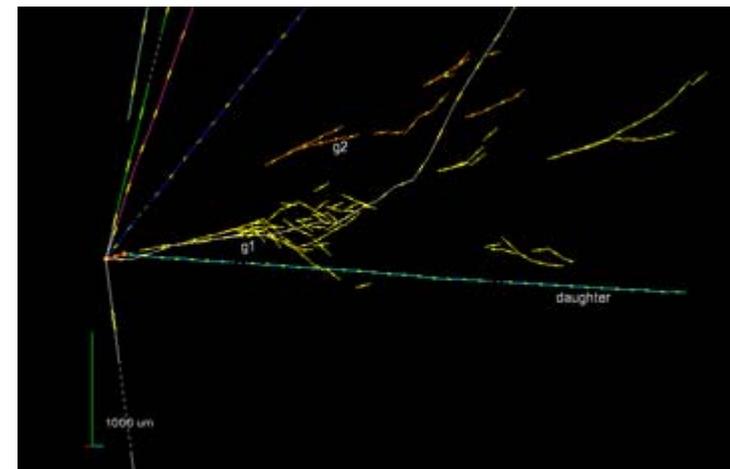
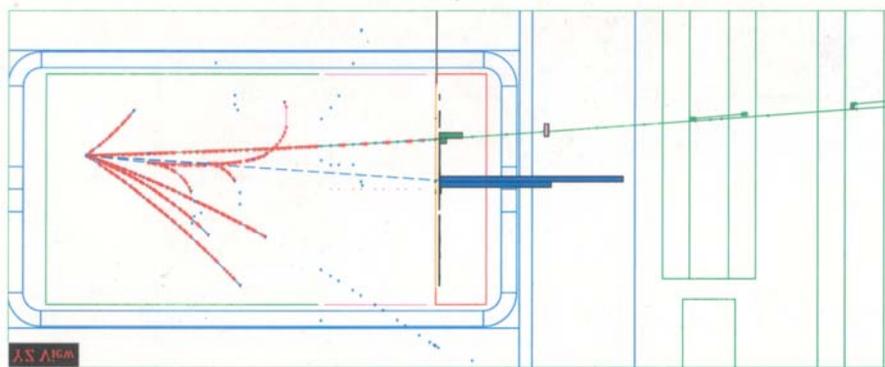
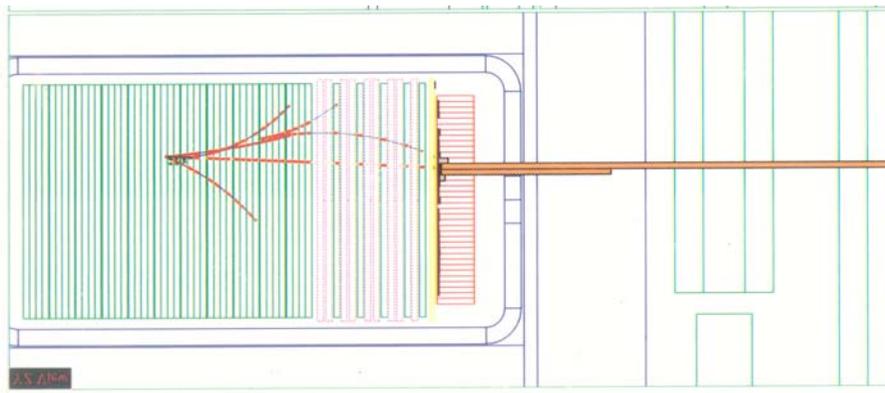
Quarks	u up	c charme	t top
	d down	s étrange	b bottom
Leptons	ν_e neutrino e	ν_μ neutrino μ	ν_τ neutrino τ
	e électron	μ muon	τ tau
 Trois générations de matière			

Particules de
champ
(bosons)

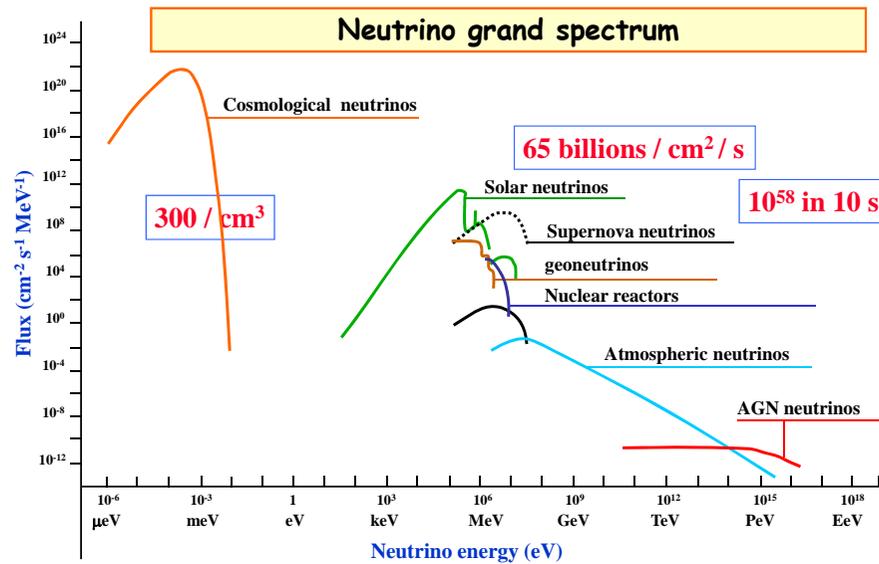
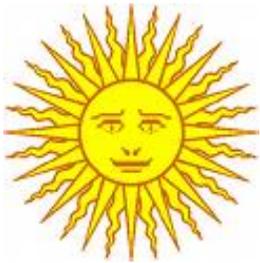
γ , W^\pm , Z^0 , gluons, G



Les trois neutrinos



Les sources de neutrinos

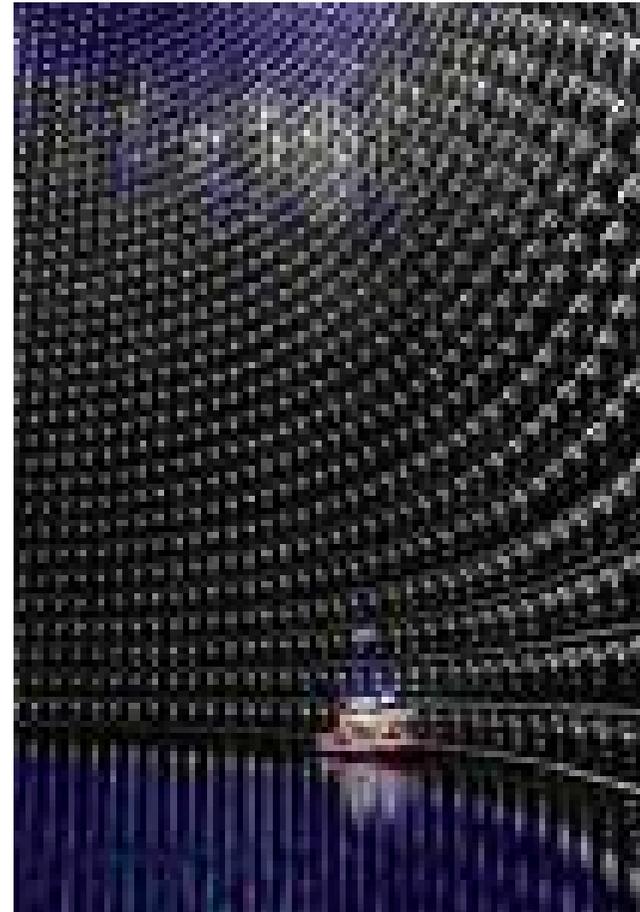


Le détecteur SuperKamiokande

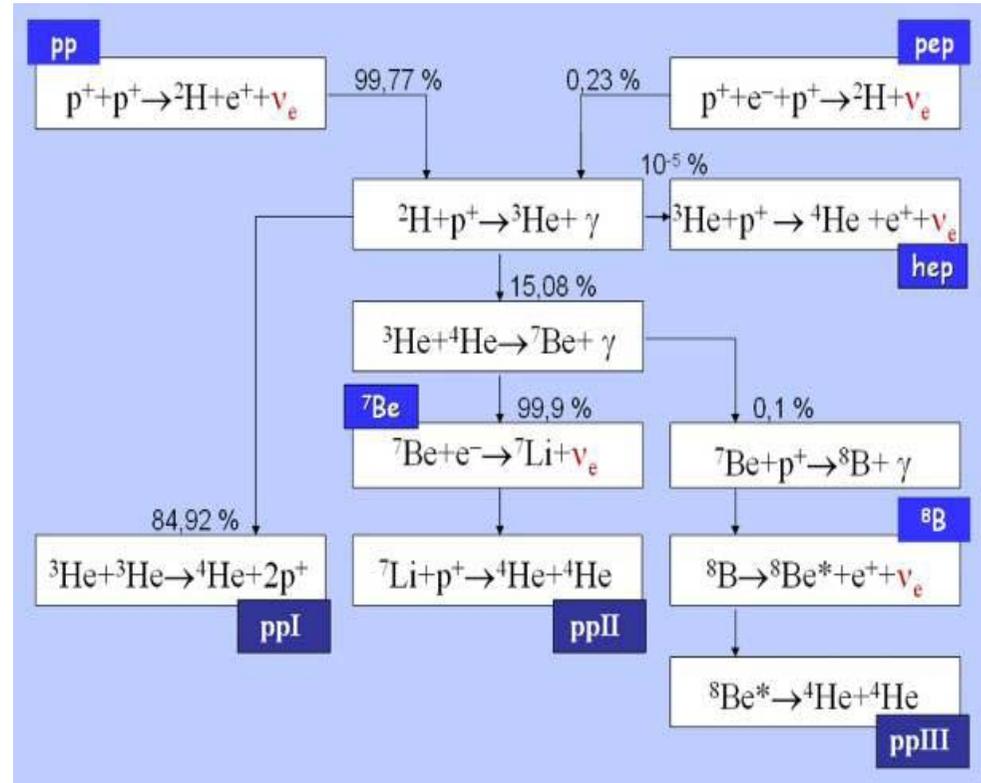
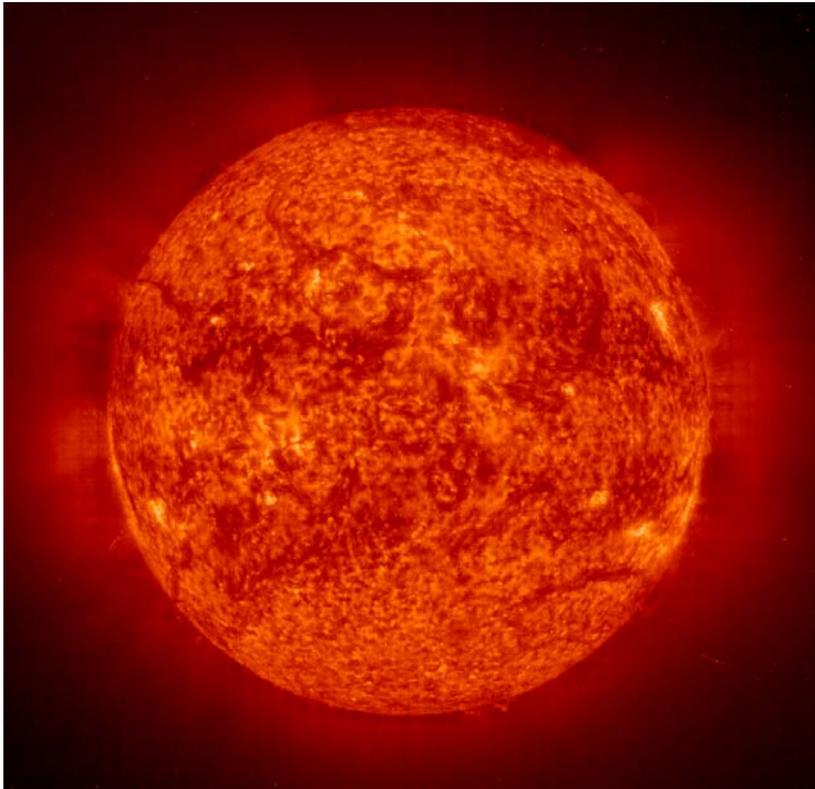
- Construit sous une montagne japonaise, SuperK est une immense cuve emplie de 50 kilotonnes d'eau purifiée, espionnée par 11000 photomultiplicateurs géants.

- Dans l'eau les particules chargées émettent la lumière Cerenkov. Pour des électrons le seuil est de 5 MeV.

- *SuperK a étudié les neutrinos solaires et atmosphériques.*

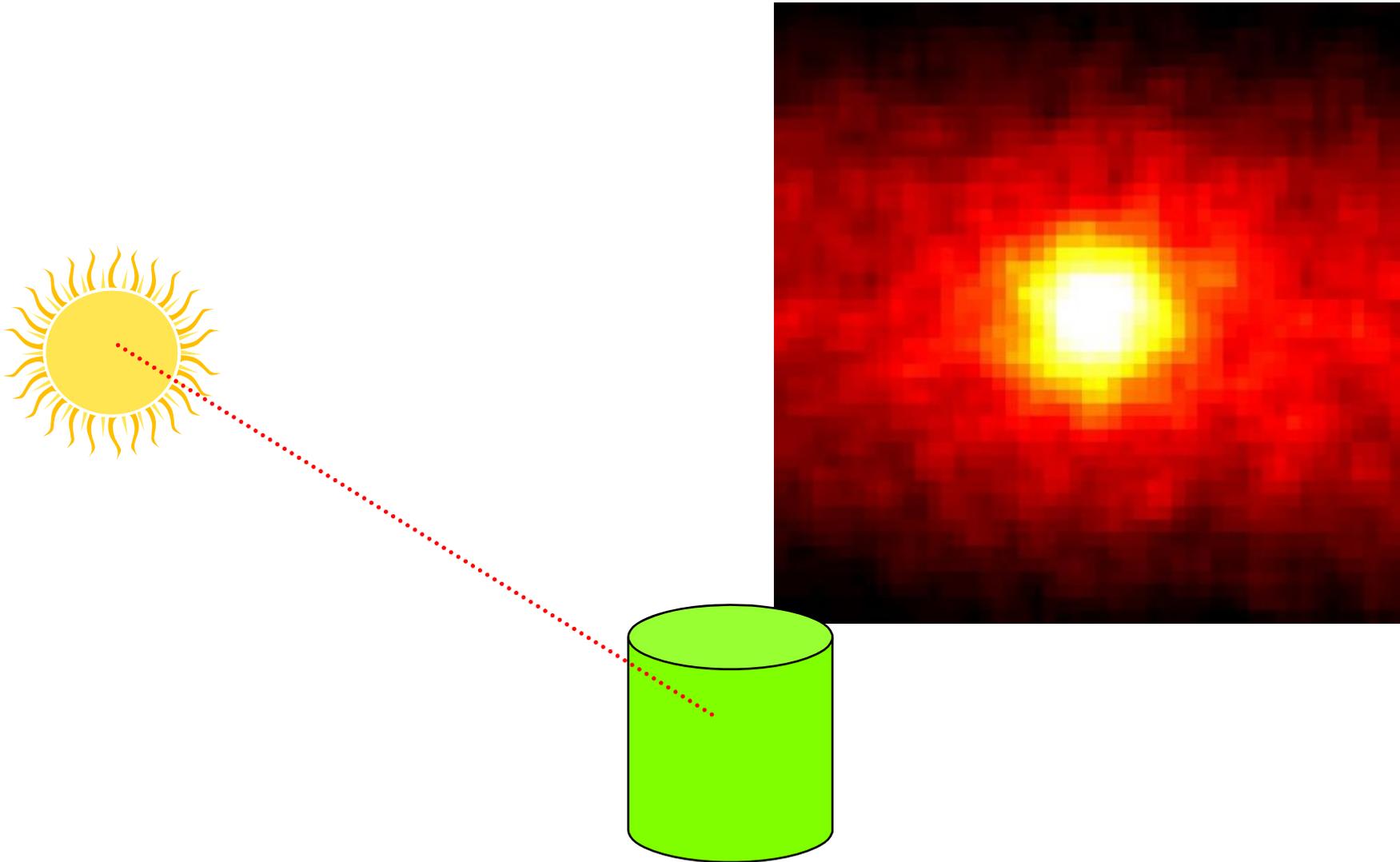


Les neutrinos solaires



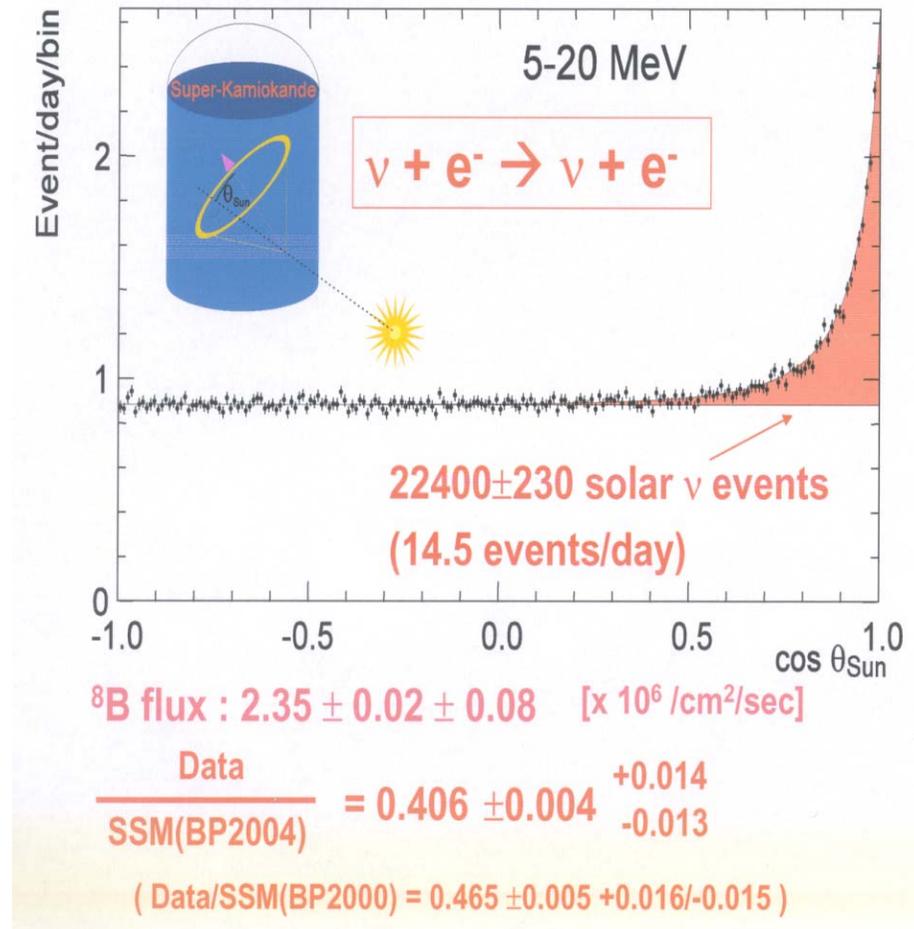
•=>Flux de 60 milliards/cm²/s

Neutrino-graphie en temps réel



La détection avec SuperK

- En 1500 jours, SuperK détecte 22000 événements quand 48000 étaient prédits.
- C'est le problème du *déficit* des neutrinos solaires d'abord mis en évidence par Homestake puis confirmé par Gallex.

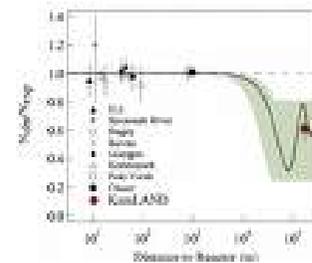
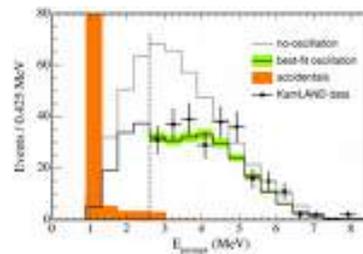


La confirmation par Kamland

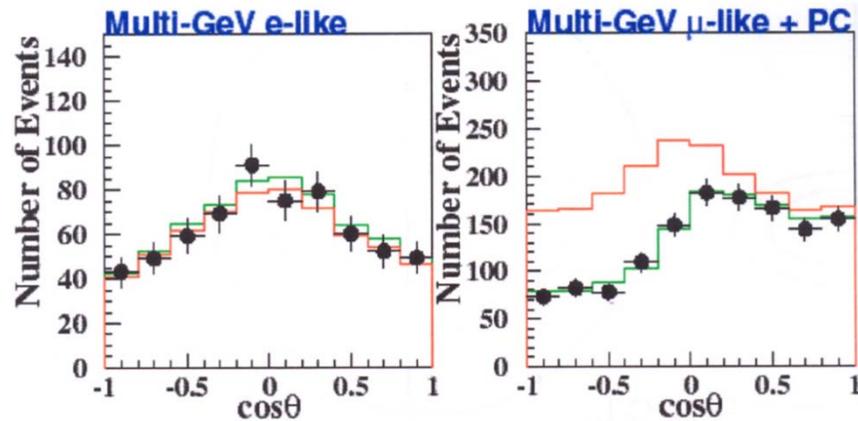
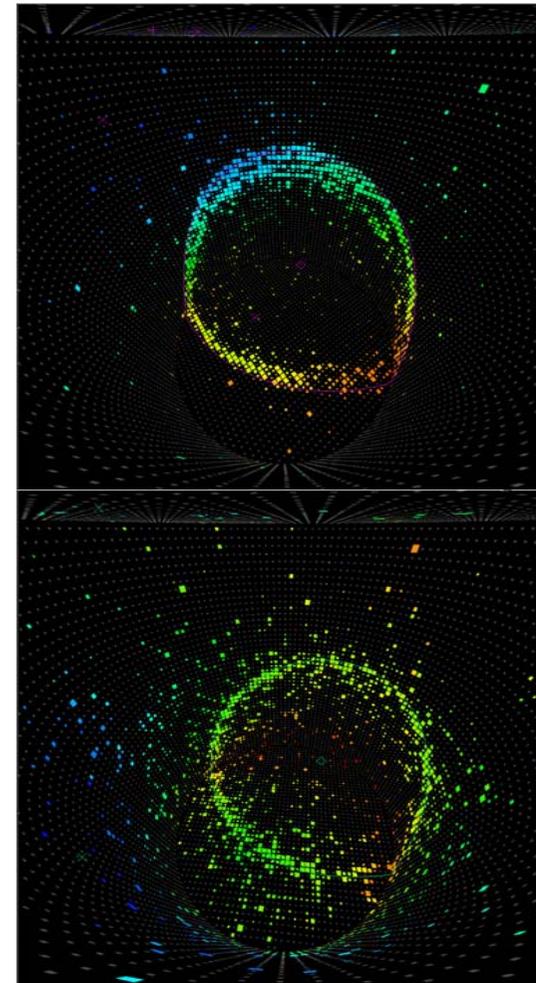
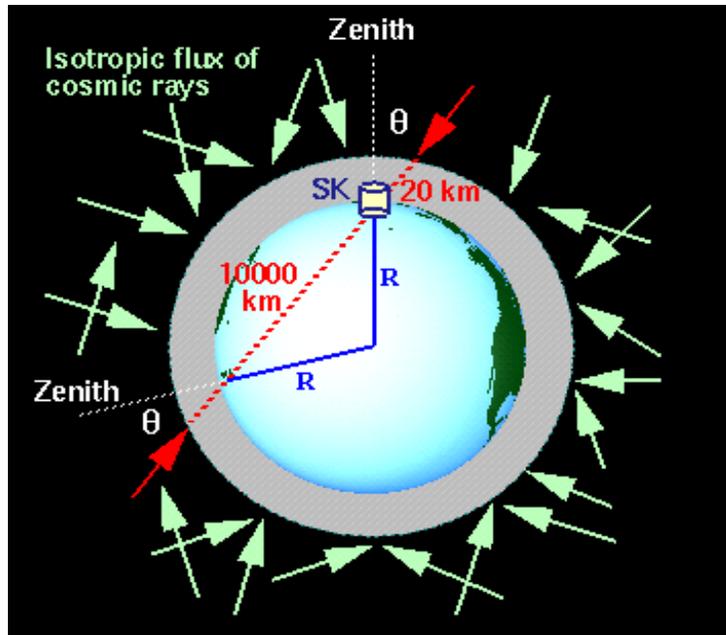
Neutrinos des réacteurs
japonais (et coréens)

Distance moyenne 180 km

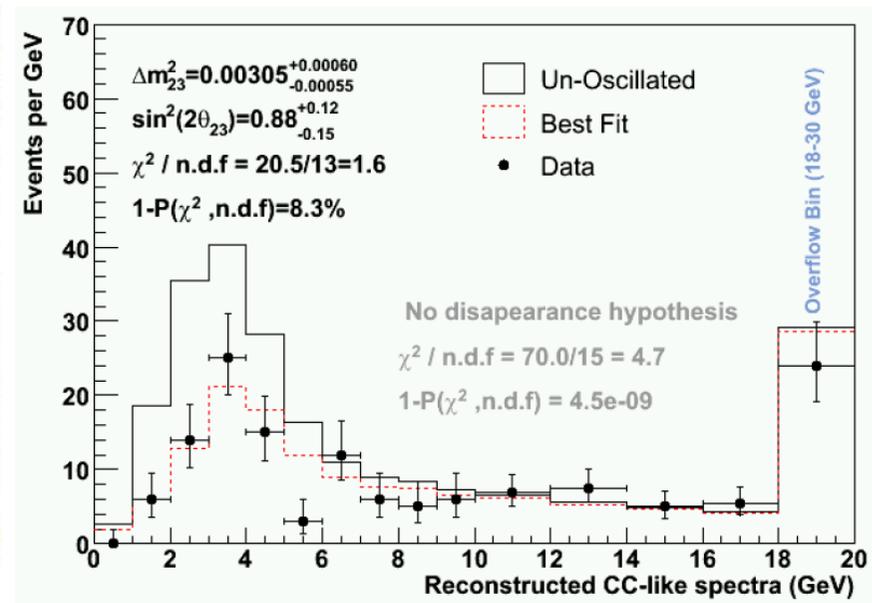
*Des neutrinos terrestres
disparaissent*



Les neutrinos atmosphériques

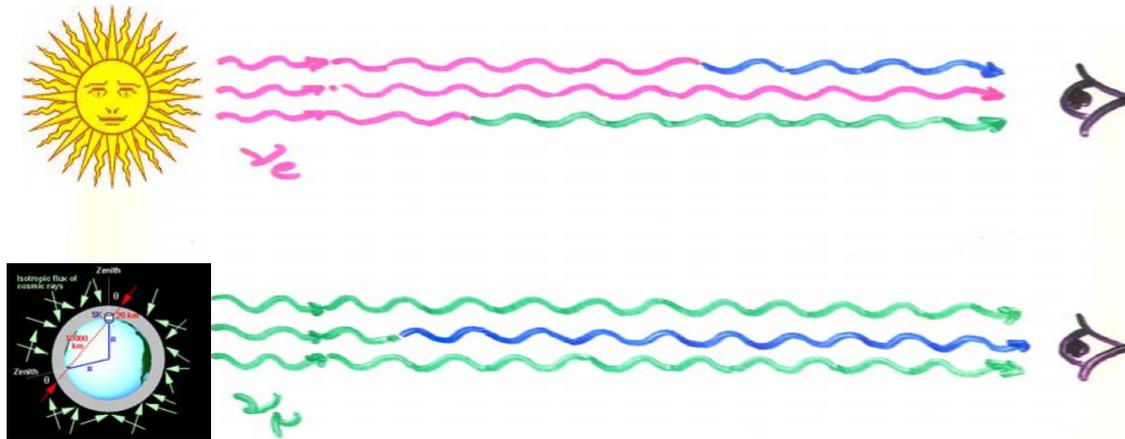


Confirmation par MINOS



OSCILLATIONS ?

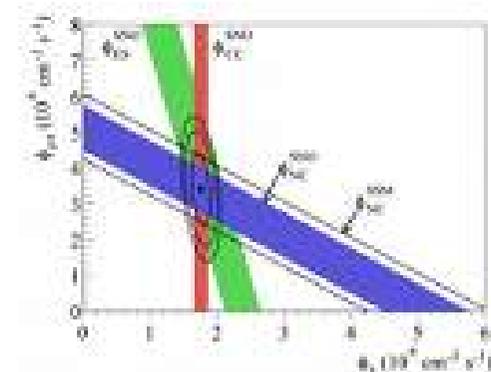
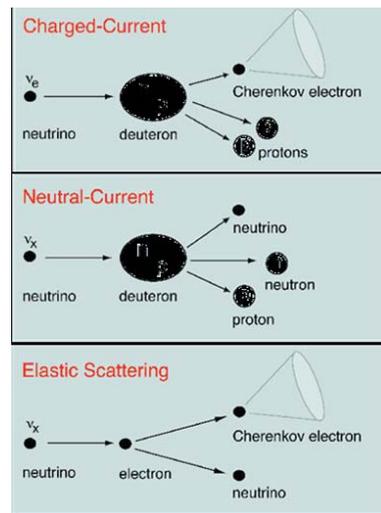
- Le *déficit* peut s'expliquer par le changement spontané des ν_e (du soleil) pendant leur propagation en neutrinos d'autres types ν_μ ou ν_τ (puisque le détecteur ne voit que les ν_e).



Qui donc es-tu neutrino?

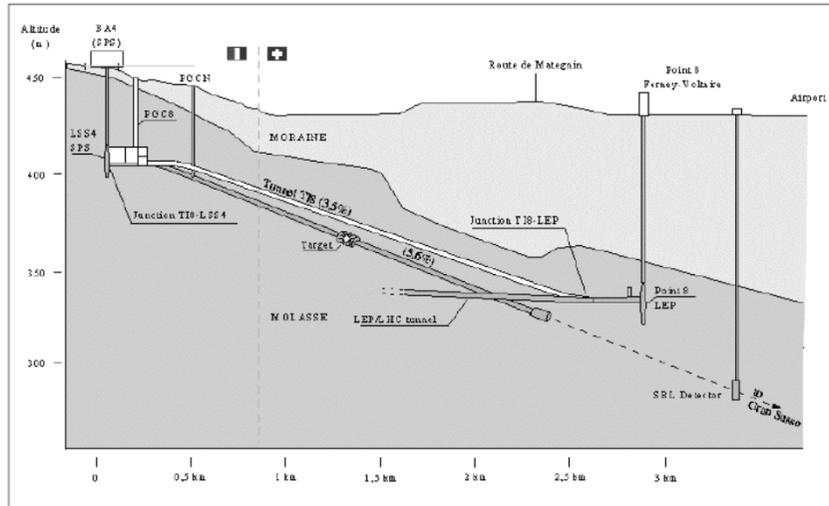
L'expérience SNO

- La cible consiste en 1000 tonnes d'eau lourde D_2O .
- SNO mesure séparément le flux de ν_e , et le flux de l'ensemble des types.

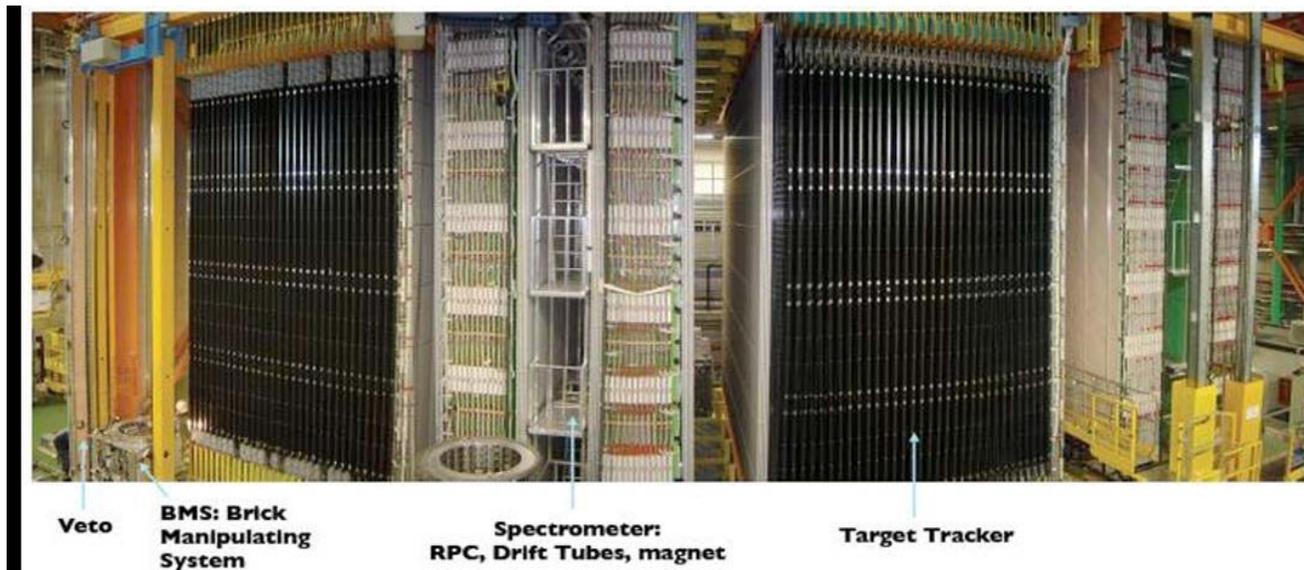
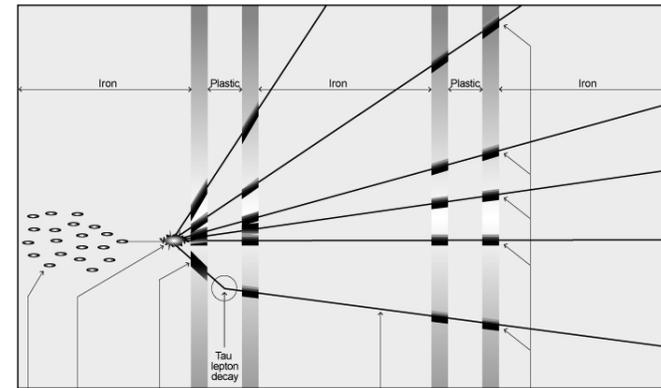


- Accord entre flux total et la prédiction, les ν_e représentant 1/3 du flux total.

OPERA



Detecting a Tau Neutrino



Phénoménologie de l'oscillation

Les états d'interactions $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$ diffèrent des états de masse (propagation) $\nu_1 \nu_2 \nu_3$

Matrice de mélange unitaire

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

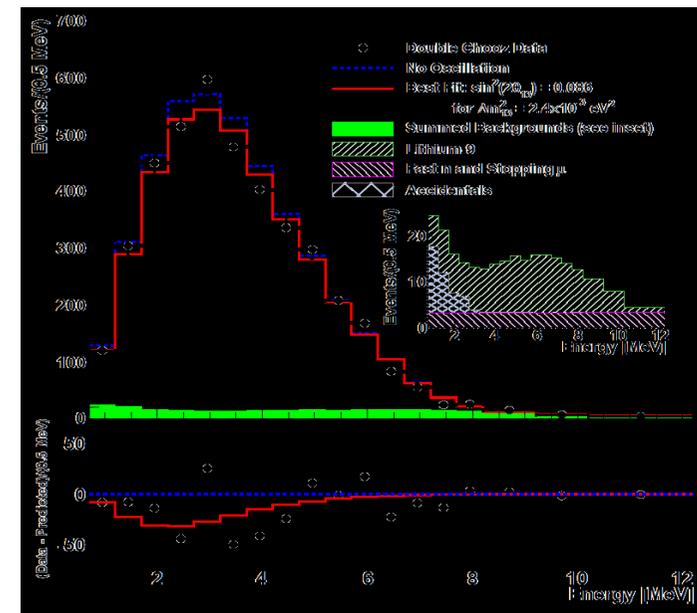
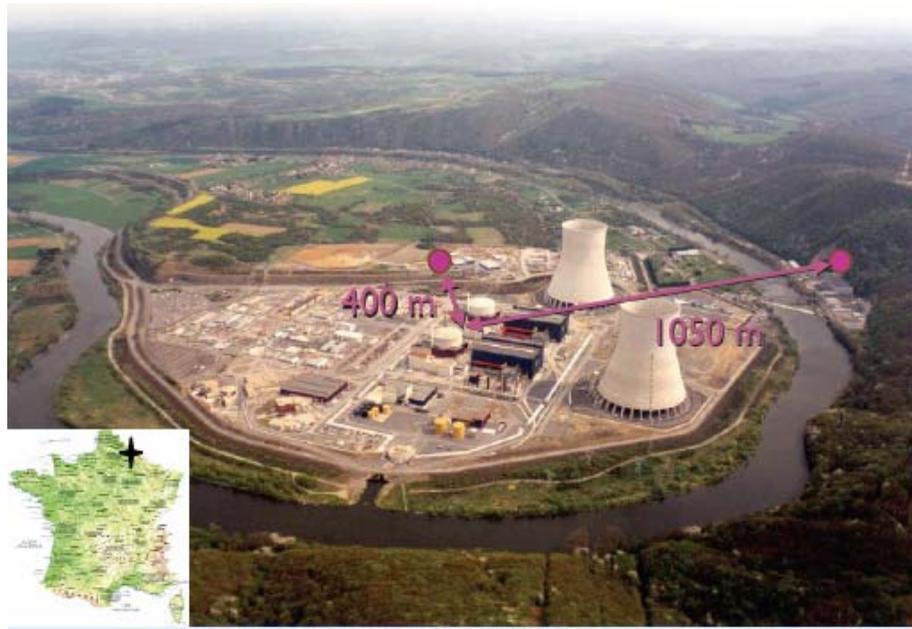
Probabilité d'oscillation

$$\mathcal{P} = \sin^2 2\theta \sin^2(\pi L/\Lambda)$$

Avec longueur d'oscillation $\Lambda = 2,5 E(\text{GeV})/\Delta m^2(\text{eV}^2)$

\Rightarrow deux types d'inconnues Δm^2 et $\sin^2 2\theta$

Le dernier angle de mélange: Double Chooz, Daya Bay, Reno



$$\sin^2 (2\theta_{13}) = 0.096 \pm 0.013$$

La masse des neutrinos

Dans le scénario simple (hiérarchie normale, non dégénérée), on obtient:

$$m(\nu_\tau) \sim 50 \text{ meV}/c^2$$

$$m(\nu_\mu) \sim 9 \text{ meV}/c^2$$

avec $m(\nu_e)$ encore plus petite

Le plus lourd des neutrinos a une masse 2 milliards de fois plus petite que celle du proton. Le modèle du Big Bang prédit 3 milliards de fois plus de neutrinos que de protons.

Conclusion éplapourdissante : les neutrinos pèsent autant que toutes les étoiles réunies!

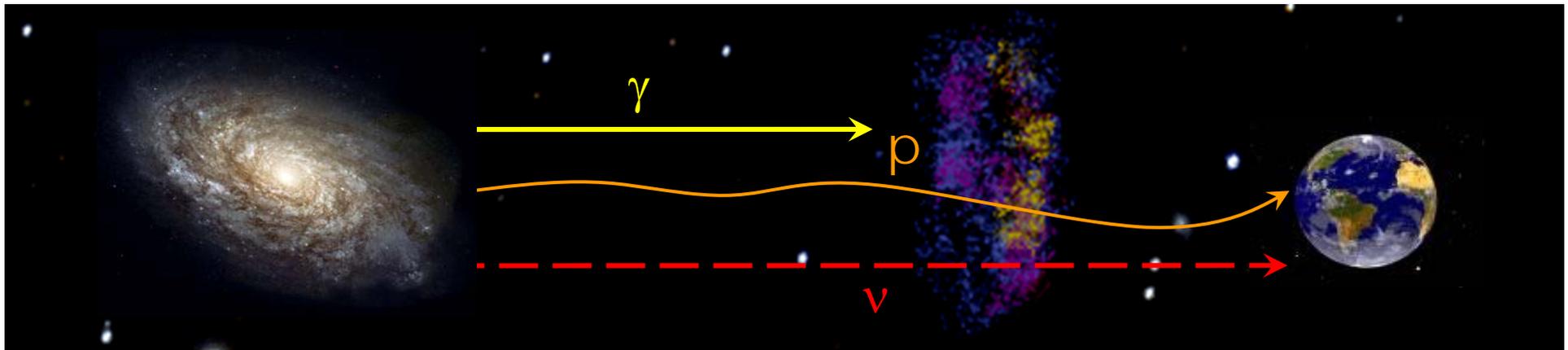
Mais il y a beaucoup plus dans l'Univers!!

L'astronomie des neutrinos

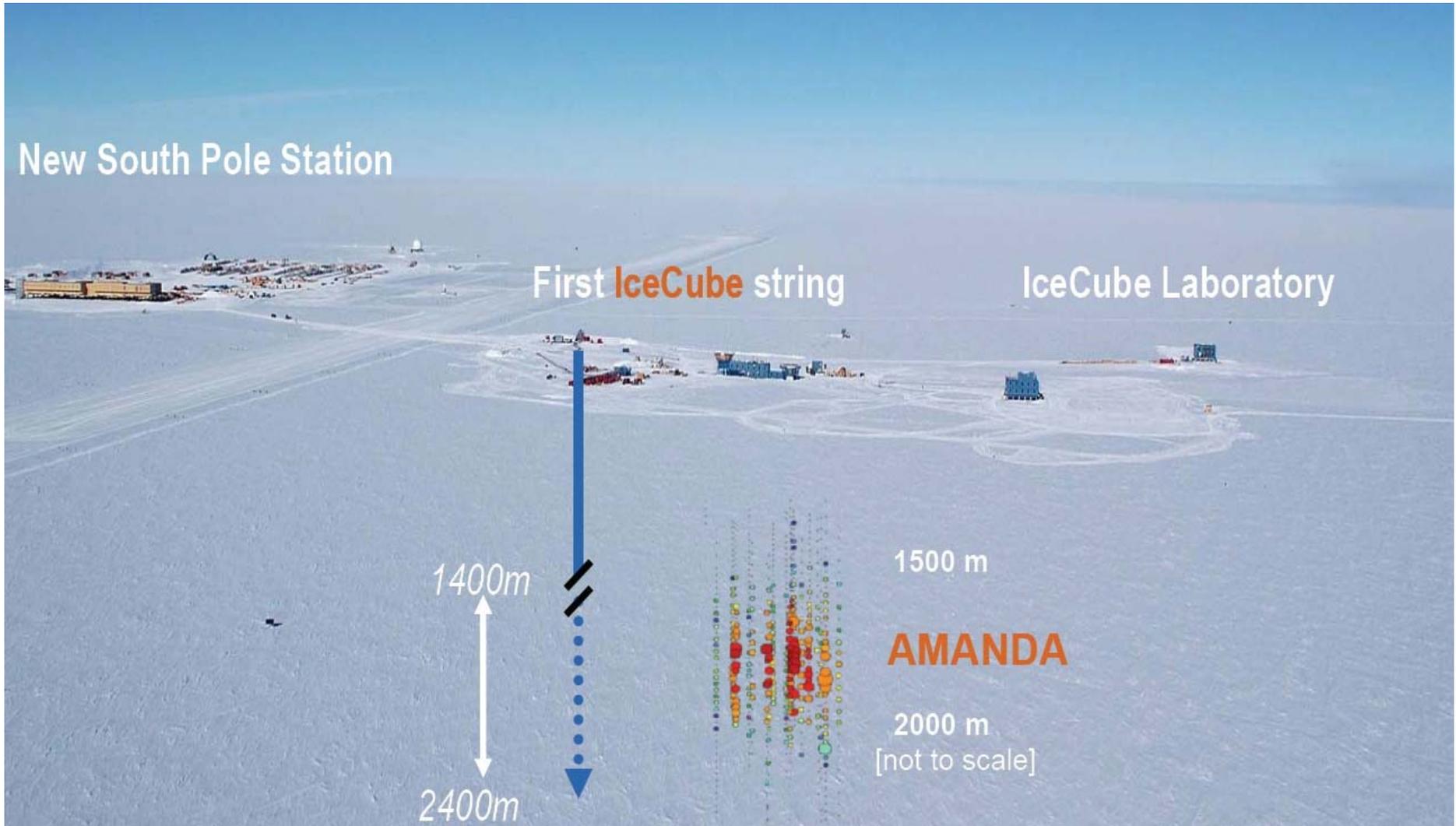
Deux sources dans le ciel:

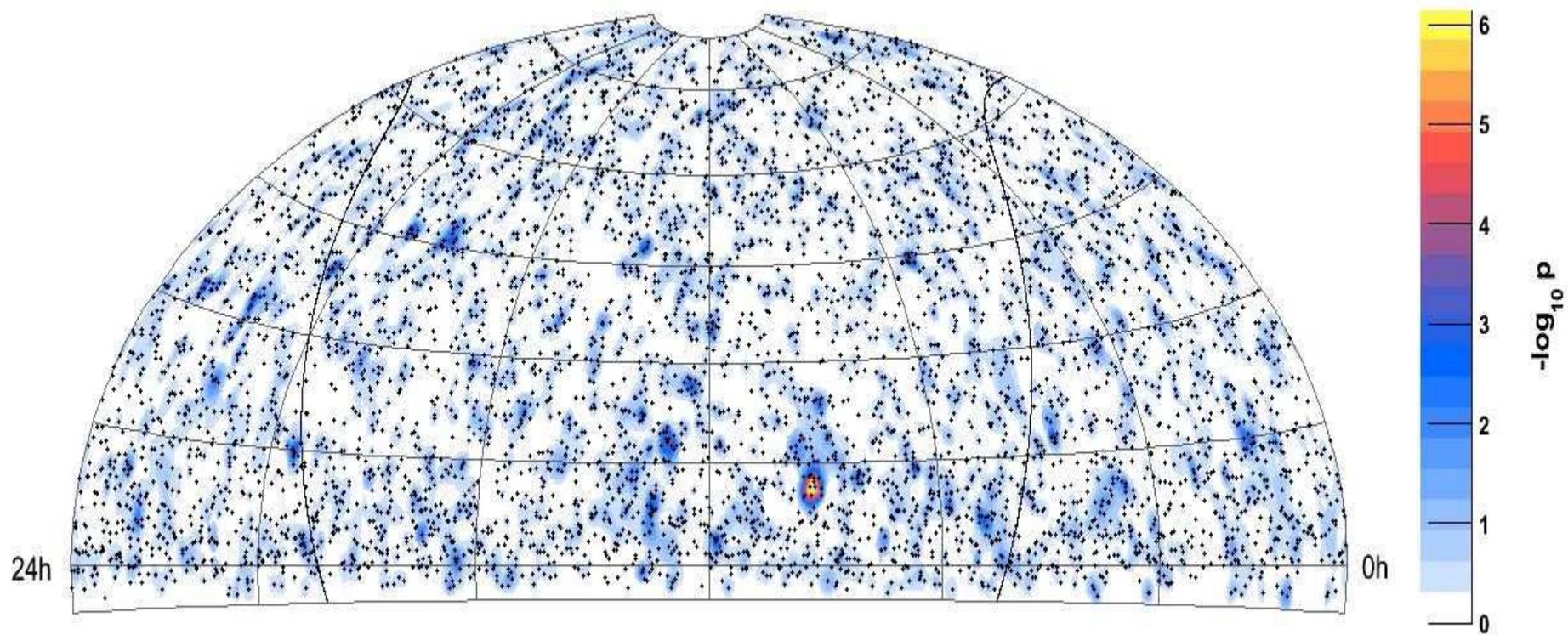
- *Le Soleil*
- *La supernova 1987A*

Vers une carte du ciel en émetteurs ν ?

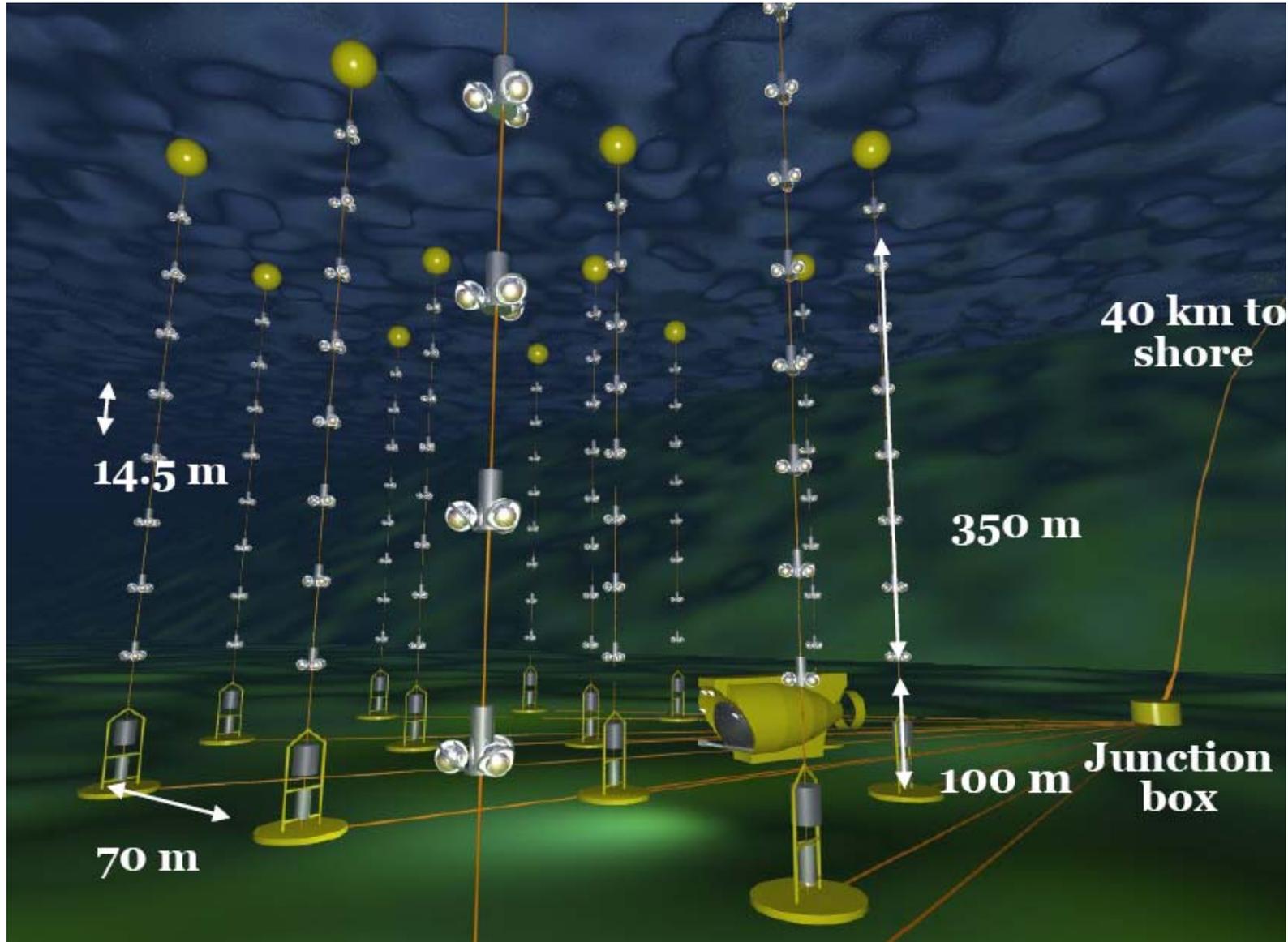


IceCube





Antarès



La kyrielle des questions

Pourquoi 3 neutrinos actifs ?

Hierarchie normale ou inversée ?

Violation de CP ?

Nature des neutrinos, Dirac ou Majorana?

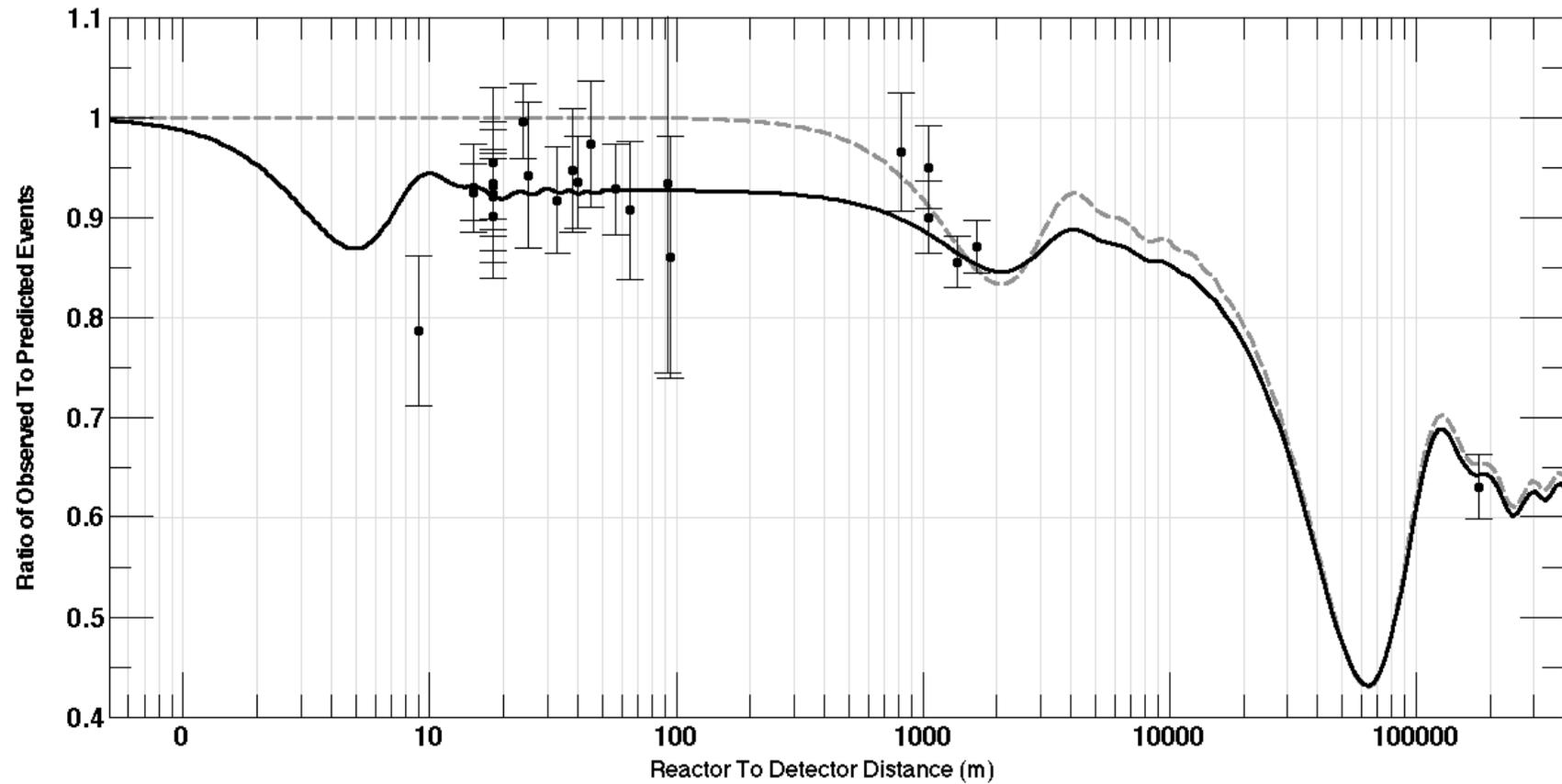
Moment magnétique/désintégrations radiatives?

Neutrinos stériles?

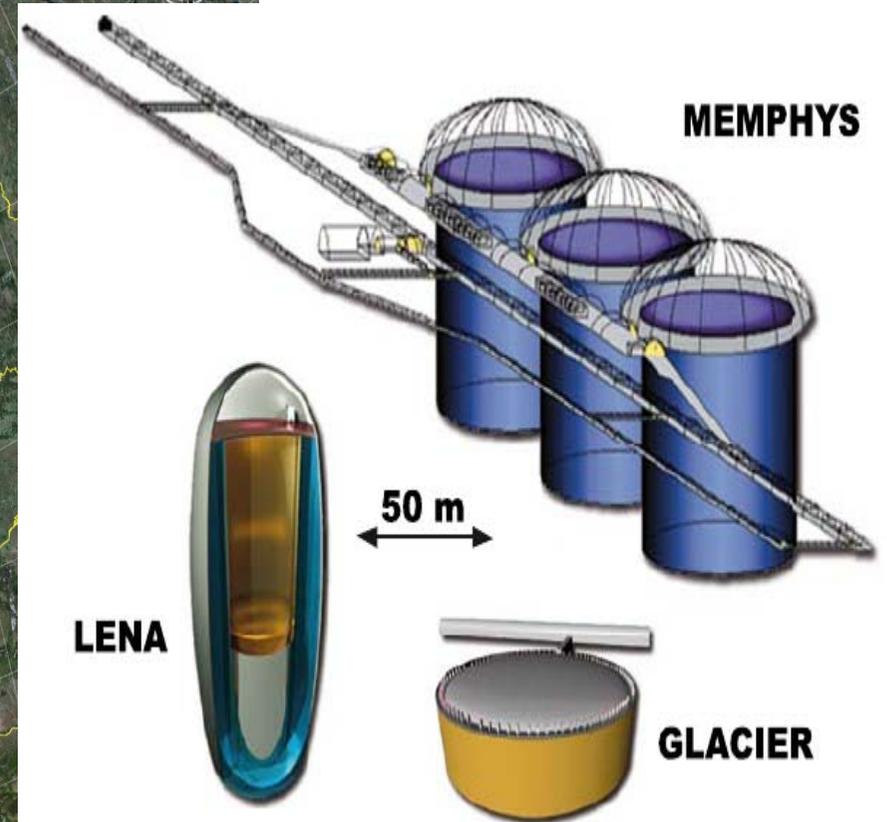
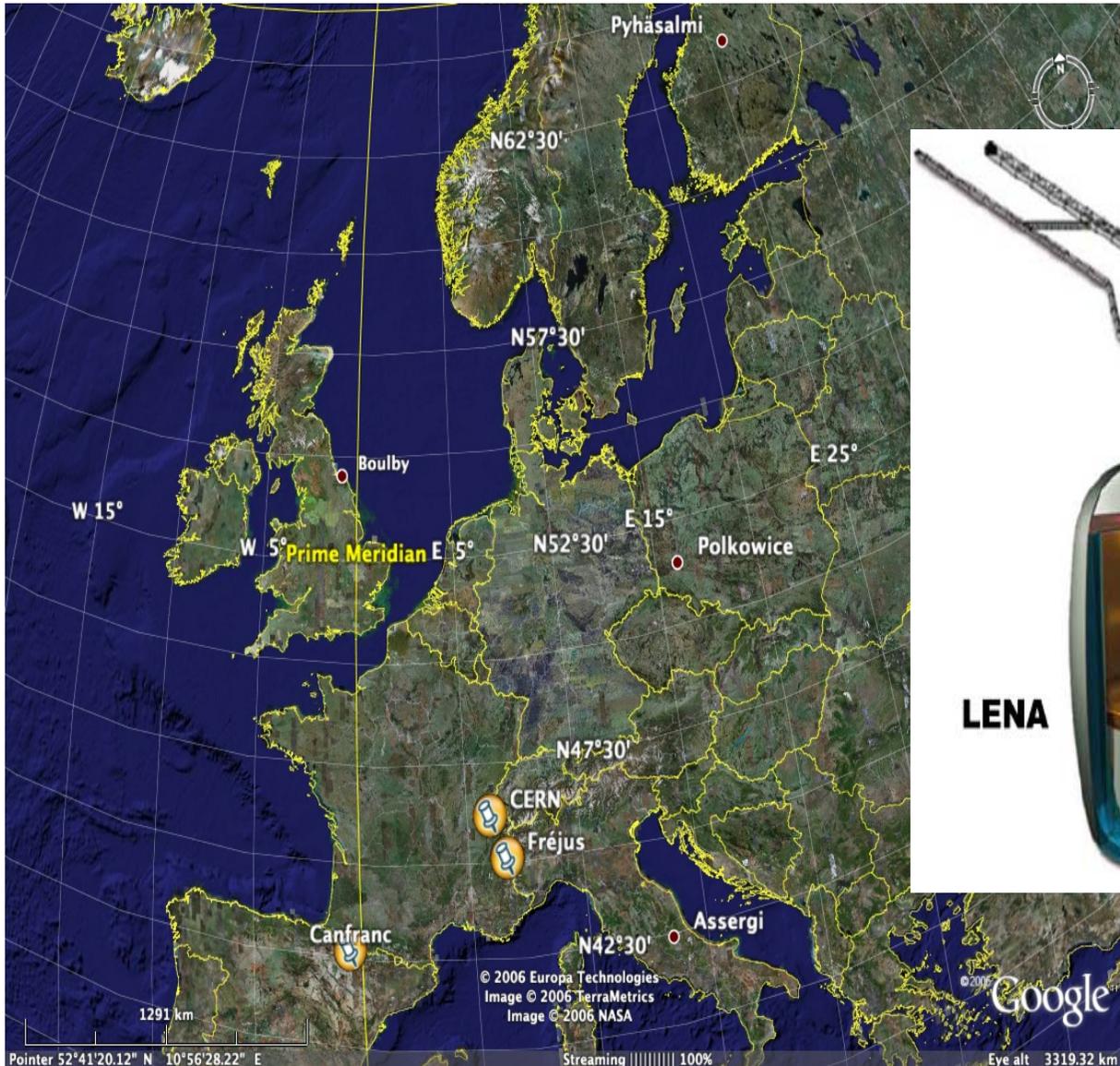
Neutrinos de Très Haute Énergie?

Neutrinos du Big Bang?

Neutrinos « stériles »



LAGUNA



Conclusions

Progrès très récents: les neutrinos sont massifs.

$$m(\nu_\tau) = 50 \text{ meV}, m(\nu_\mu) = 9 \text{ meV}, m(\nu_e) = ?$$

Ils représenteraient $\approx 0,5-1\%$ de la masse-énergie de l'Univers.

Responsables de la disparition d'antimatière?

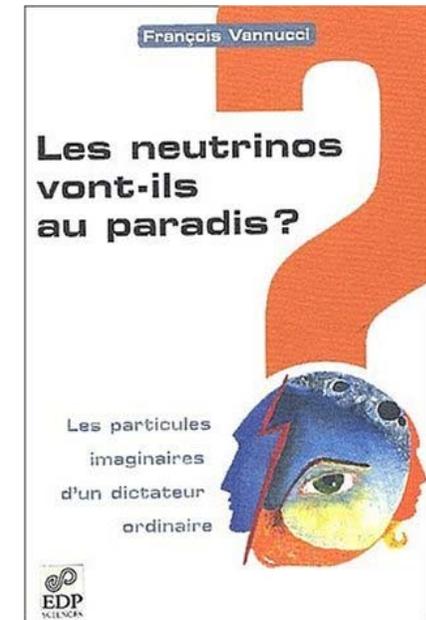
Solution au problème de la masse manquante?

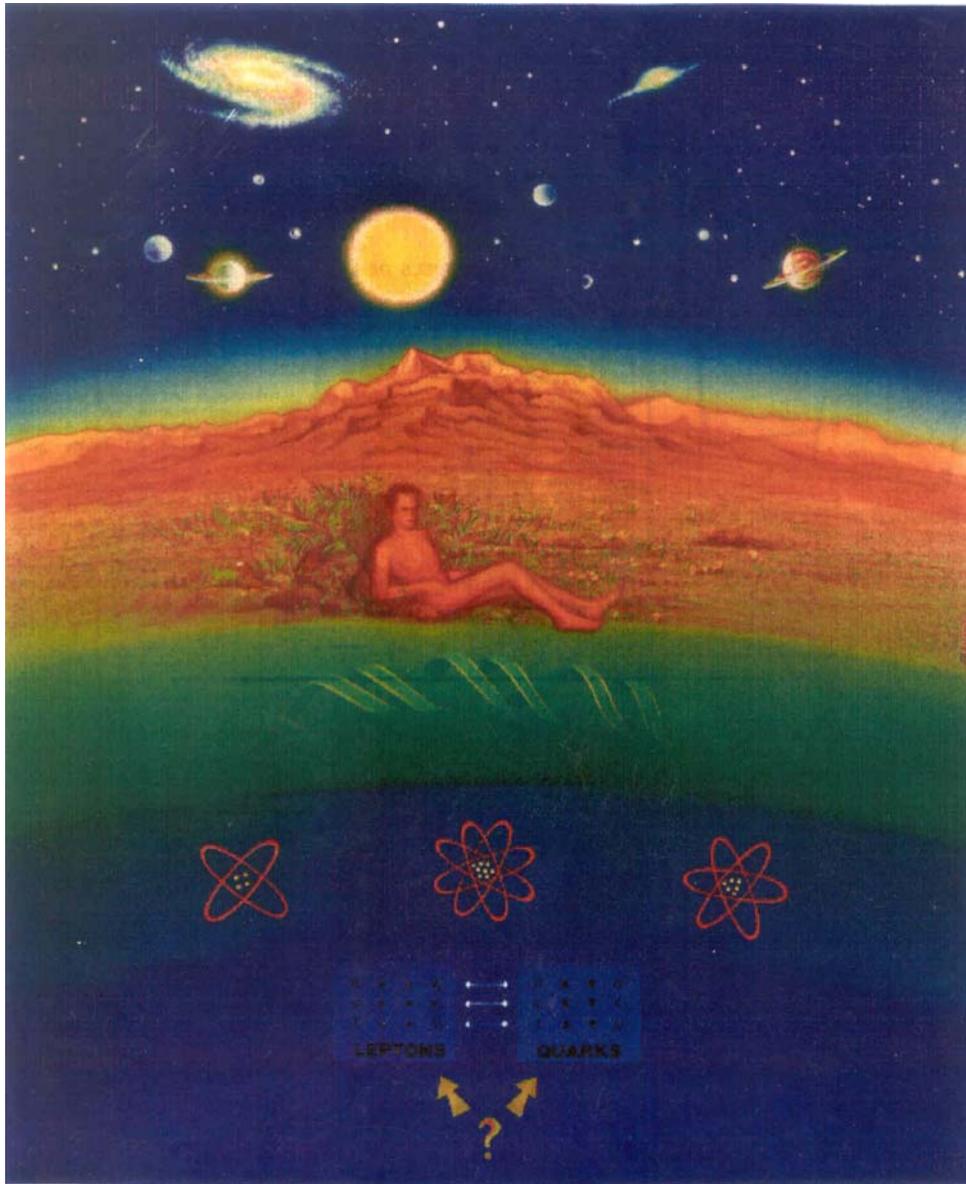
Solution au problème de l'énergie noire?

A quoi servent les neutrinos?

*Neutrinos, they are very small
They have no charge and have no mass
And do not interact at all.
The earth is just a silly ball
To them, through which they simply pass,
Like dustmaids down a drafty hall
Or photons through a sheet of glass.
They snub the most exquisite gas,
Ignore the most substantial wall,
Cold-shoulder steel and sounding brass,
Insult the stallion in his stall,
And, scoring barriers of class,
Infiltrate you and me. Like tall
And painless guillotines, they fall
Down through our heads into the grass.
At night, they enter at Nepal
And pierce the lover and his lass
From underneath the bed-you call
It wonderful: I call it crass.*

John Updike





*Le plus
incompréhensible de
toute cette histoire est
que le monde est
compréhensible.*

A. Einstein

Neutrinos de SN1987

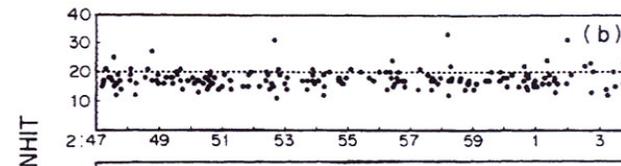
Kamiokande/IMB 3000
tonnes d'eau

Vu par 1000 PMs

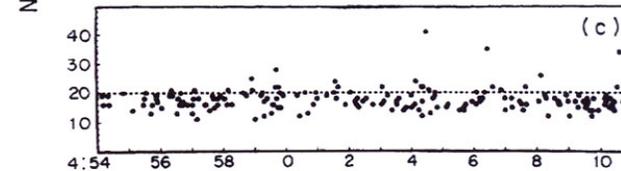
Détecteur souterrain
cherchant la désintégration
du proton

23 février 1987

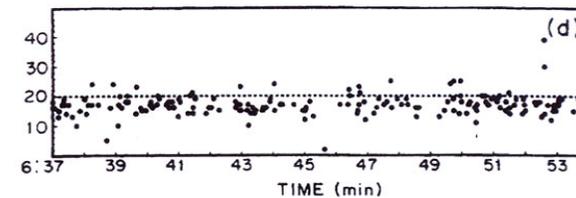
2h47



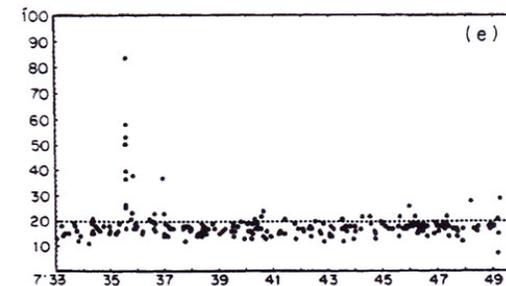
4h34



6h37

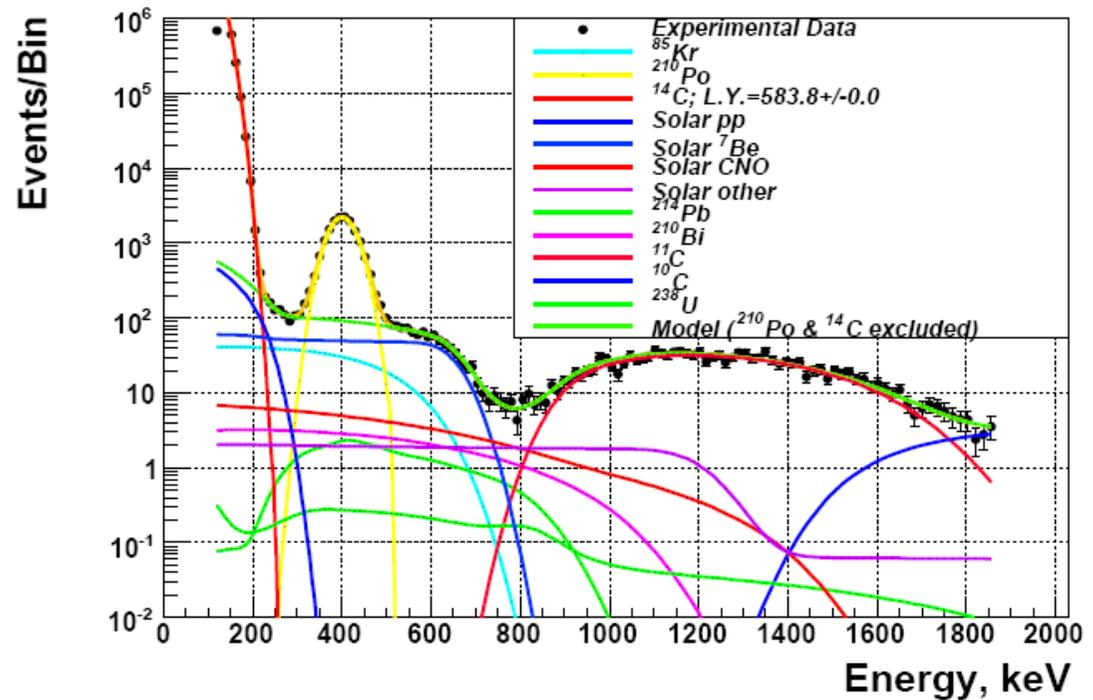
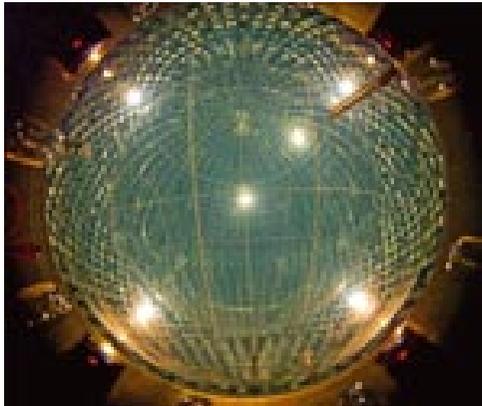


7h32

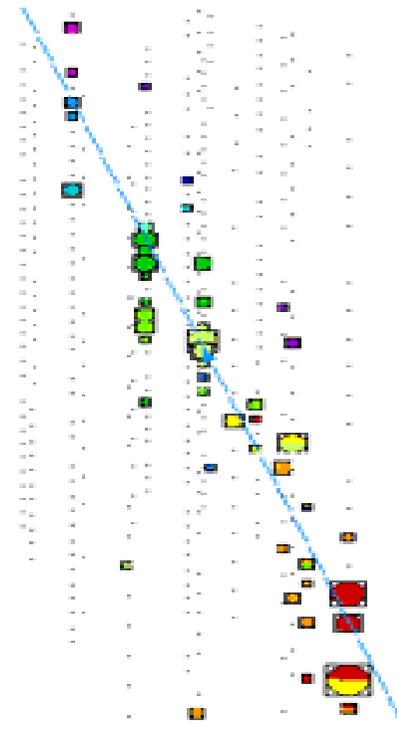
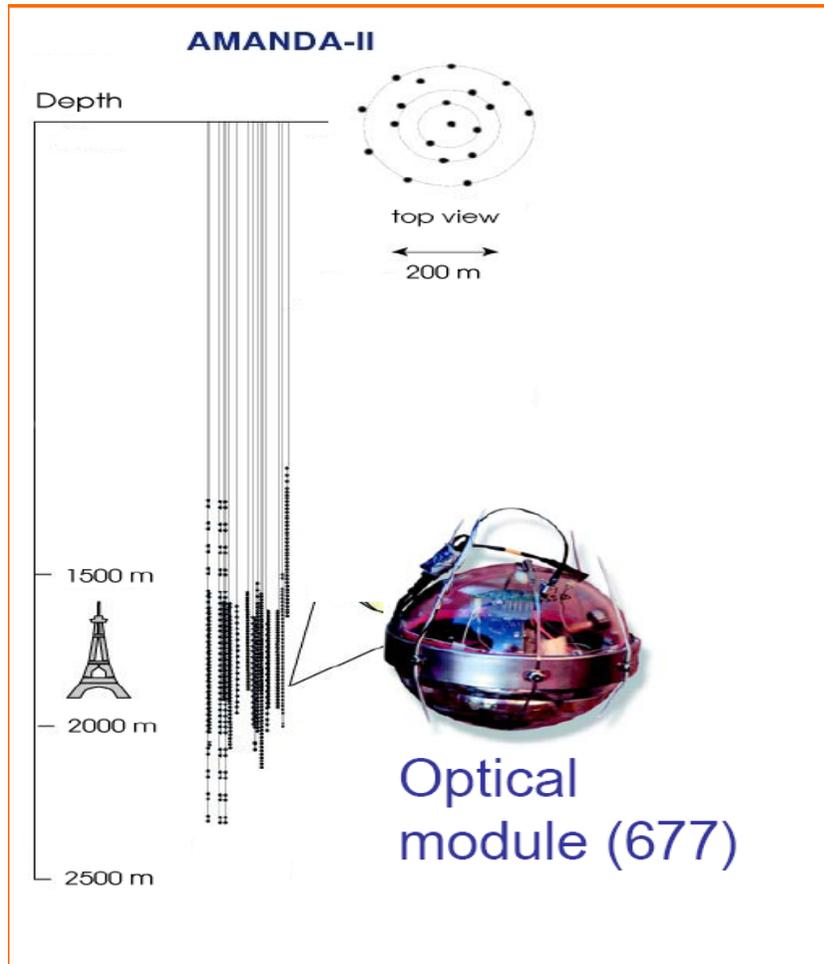


Borexino

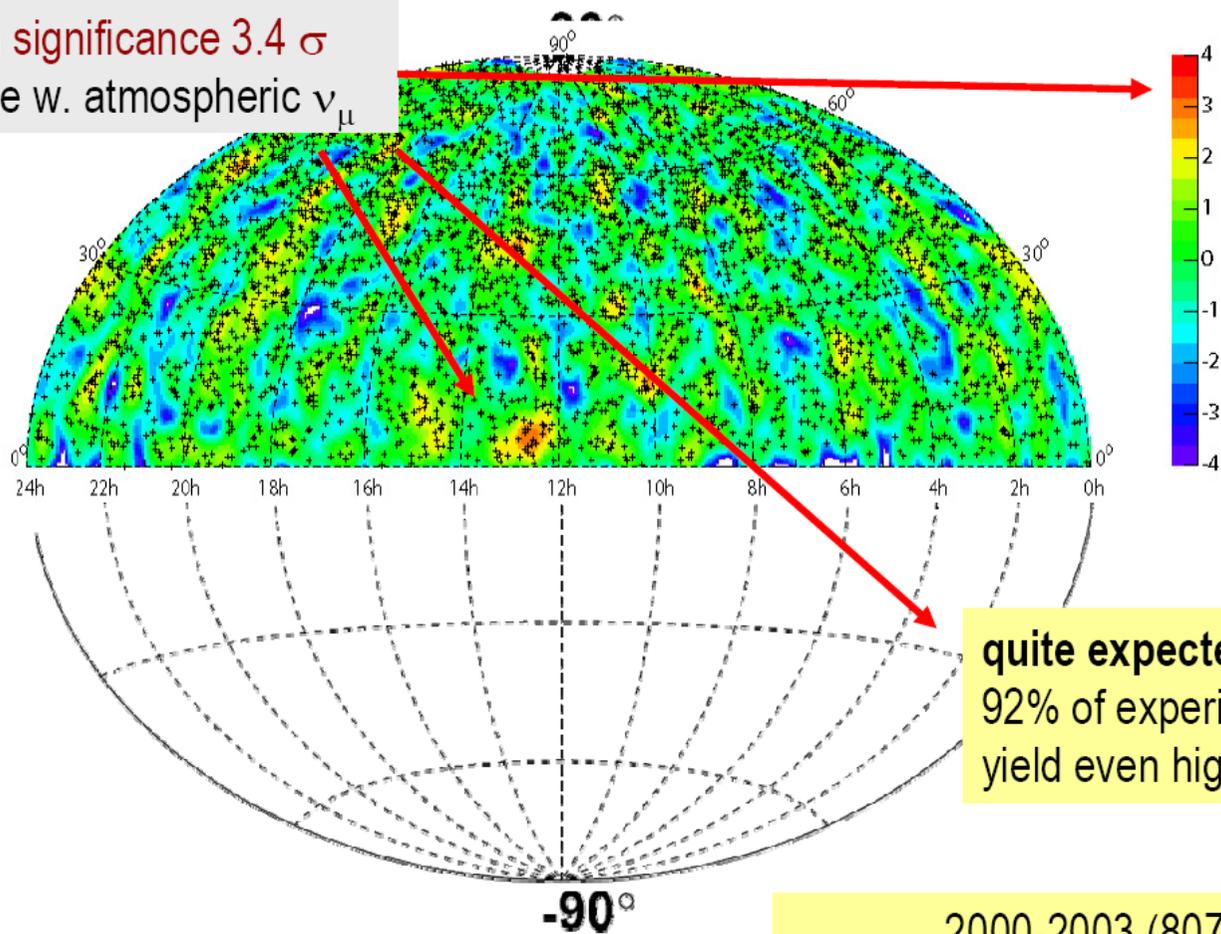
Optimisé pour neutrinos du ${}^7\text{Be}$
Très bas bruit radioactif



Amanda



Maximum significance 3.4σ
compatible w. atmospheric ν_{μ}



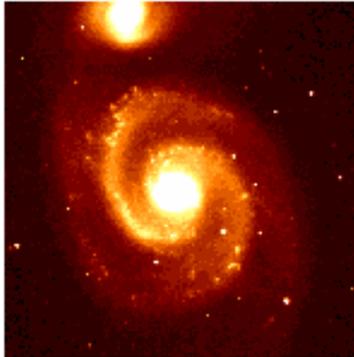
Preliminary

quite expected ...
92% of experiments would
yield even higher maximum

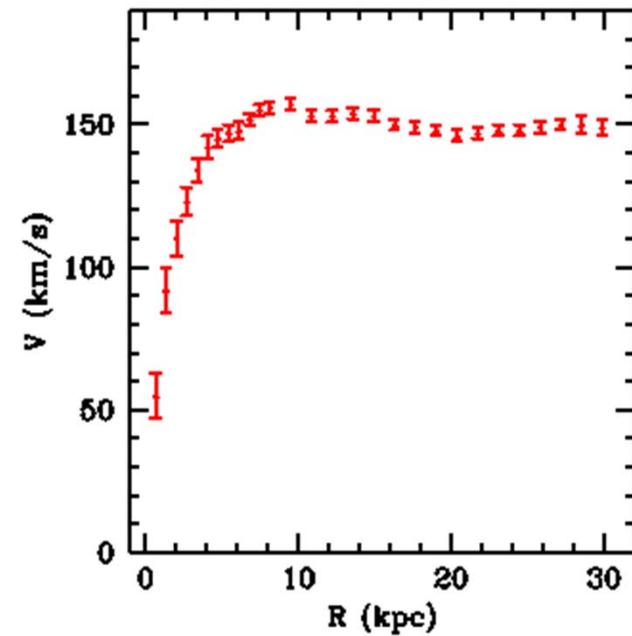
cluster search radius
between 2.25° - 3.75° w.r.t.
the declination

2000-2003 (807 days)
3329 μ from northern hemisphere
3438 μ expected from atmospheric ν_{μ}

LA MASSE MANQUANTE



$$V = \sqrt{GM/r}$$



Localement 300 MeV/cm^3

Indication de masse invisible... 25% du contenu de l'Univers

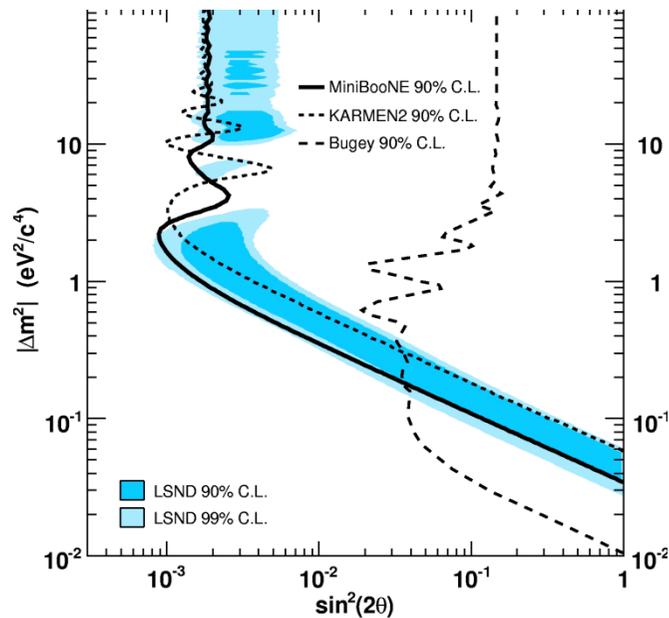
Enigmes LSND et MiniBoone

Détecteur de 150 tonnes dans beam-stop à Los Alamos(1993-1998)

Intense faisceau d'anti- ν_μ

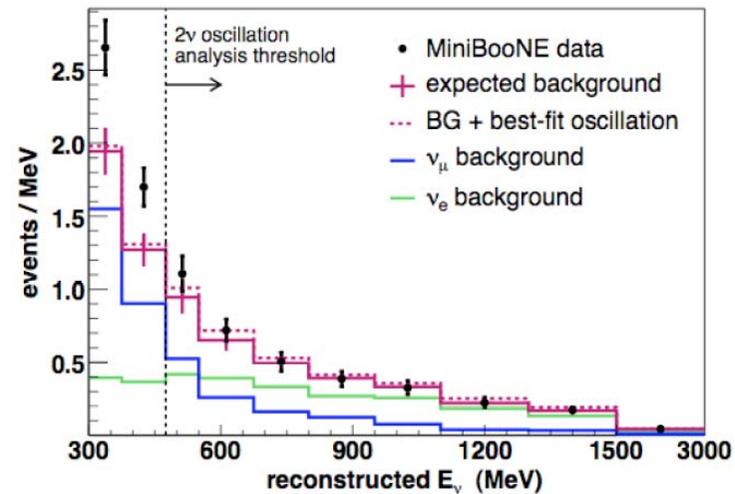
$88 \pm 22 \pm 6$ événements compatibles avec anti- ν_e

« Evidence » d'oscillations au niveau 0.2%



Répété à Fermilab

De 30 m/30 MeV à 800 m/800 MeV



Expérience PS191 (1984!)

