

Une petite introduction historique à la physique des neutrinos

Véronique Van Elewyck

Laboratoire AstroParticules et Cosmologie

Université Paris 7 - Denis Diderot

La naissance d'une idée...

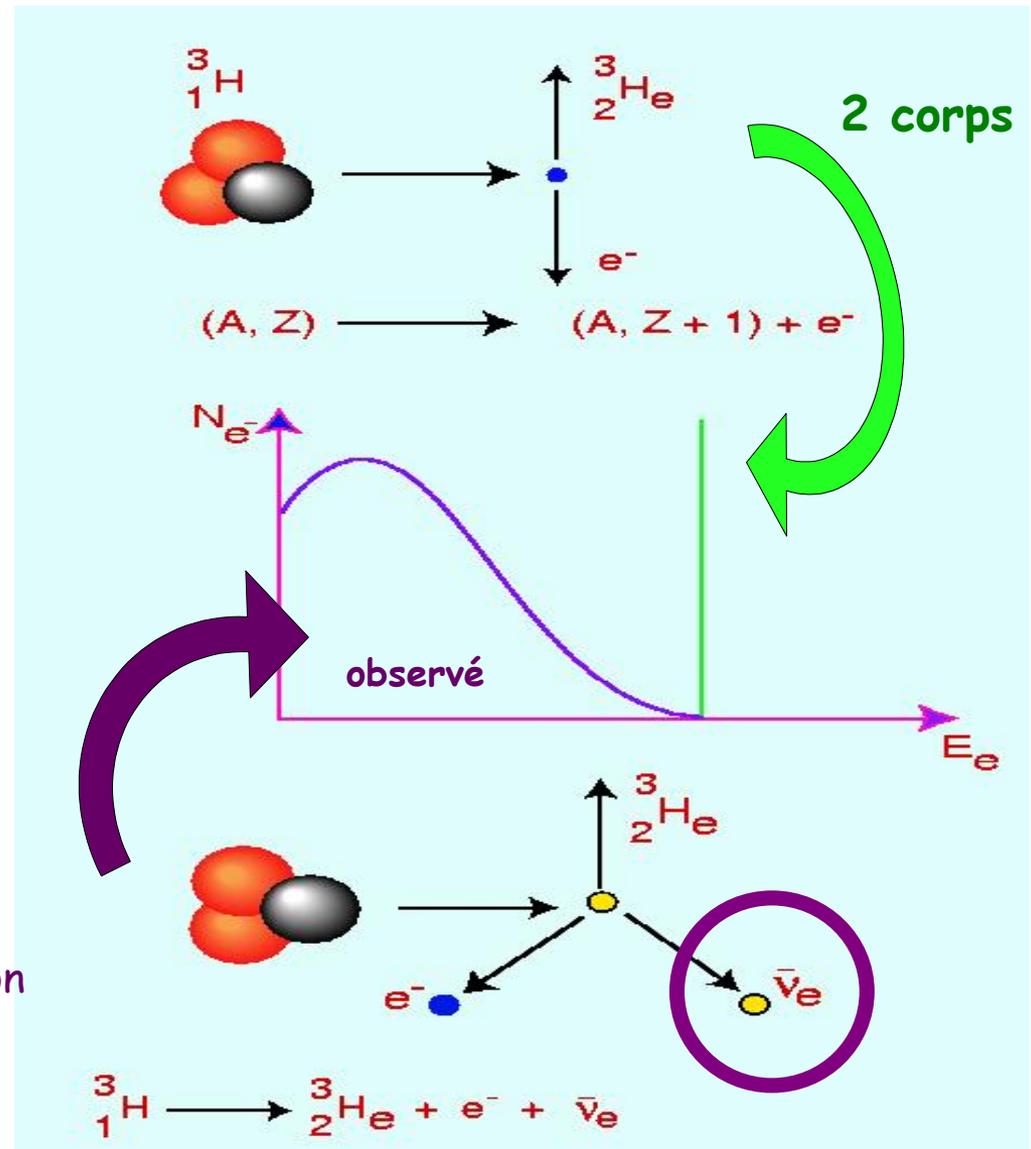
1930



Wolfgang Pauli:

Interprétation du spectre
d'émission β du tritium:

désintégration
à 3 corps



La naissance d'une idée

1930



Wolfgang Pauli:

Interprétation du spectre
d'émission β du tritium

Chères Mesdames, chers Messieurs les Radioactifs,

Comme va vous l'expliquer avec plus de détails celui qui vous apporte ces lignes et auquel je vous prie d'accorder toute votre bienveillante attention, **il m'est venu en désespoir de cause, face à la statistique "fausse" concernant les noyaux ^{14}N et ^6Li ainsi que le spectre β continu, l'idée d'un expédient pour sauver le principe d'échange de la statistique et le principe de conservation de l'énergie.** Il s'agit de **la possibilité qu'il existe dans les noyaux des particules électriquement neutres, que je propose d'appeler neutrons, dotées d'un spin de valeur $\frac{1}{2}$, obéissant au principe d'exclusion et qui de surcroît se distinguent des quanta de lumière par le fait qu'ils ne se déplacent pas à la vitesse de la lumière. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons, et en tous cas non supérieure à 0,01 de celle des protons.[...]**

A l'heure actuelle, cependant, je ne m'aventurerai pas à publier quelque chose sur cette idée, je me tourne d'abord en toute confiance vers vous, chers radioactifs, pour vous demander ce qu'il en serait **d'une expérimentation établissant l'existence d'un tel neutron si celui-ci devait présenter un pouvoir de pénétration égal ou supérieur d'un facteur 10 à celui d'un rayon gamma.**

chers Radioactifs, examinez et jugez.- **malheureusement, je ne peux pas venir moi-même à Tubingen, ma présence à Zurich étant absolument requise en raison d'un bal qui a lieu dans la nuit du 6 au 7 décembre.**- Je vous salue bien tous, ainsi que M.Back.

Votre très dévoué,



Les pionniers du neutrino

1932

Chadwick découvre le **neutron** (particule hautement pénétrante) mais celui-ci est trop lourd pour être la particule de Pauli.

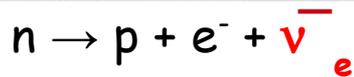
1933

Fermi la baptisera **neutrino**: le « petit neutron »

...quelques années, une guerre mondiale
et les premières centrales nucléaires plus tard...

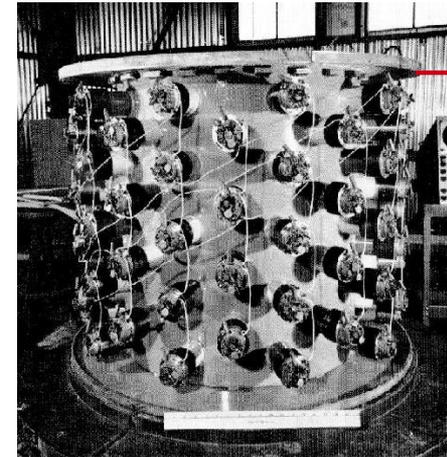
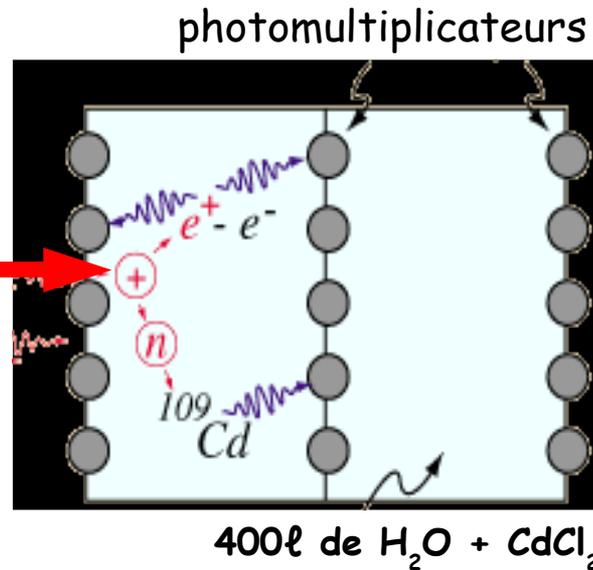
1956

Reines & Cowan: **première détection du neutrino (en l'occurrence $\bar{\nu}_e$)**



$$E_\nu \sim 4 \text{ MeV}$$

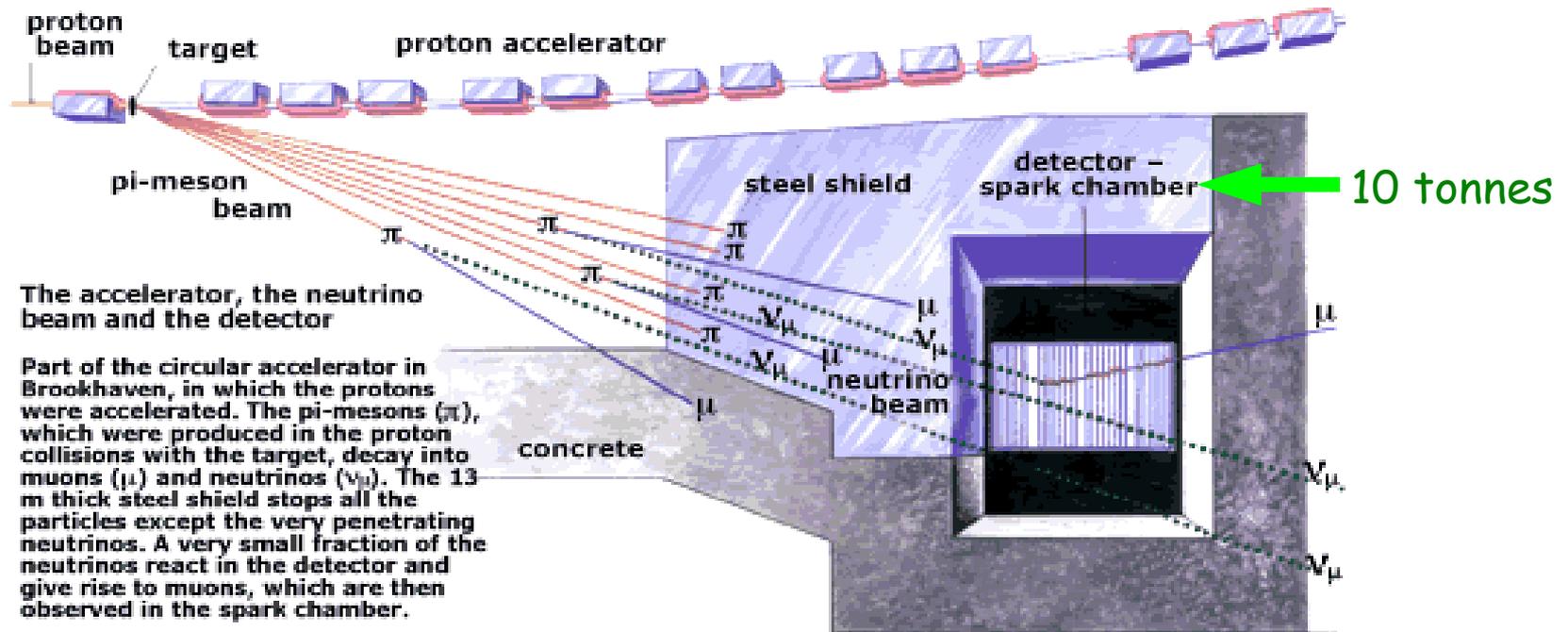
$\bar{\nu}_e$



Un monde de saveurs

1962

Schwartz, Lederman, Steinberger (Brookhaven):
observation du ν_μ issu de la désintégration de π

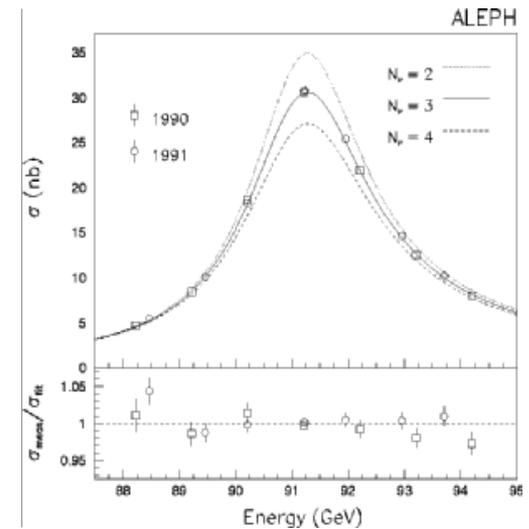
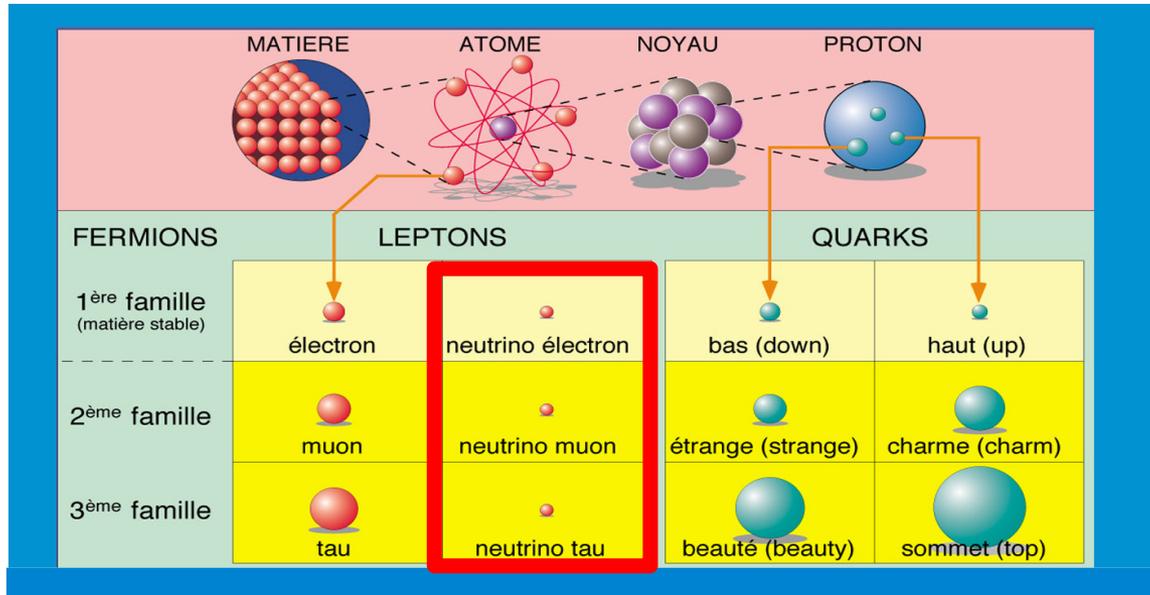


Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

2000

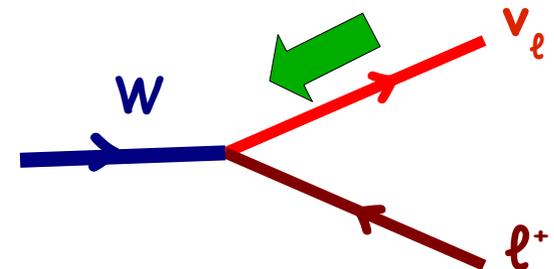
Expérience DONUT (Fermilab):
observation du ν_τ issu de la désintégration du τ

Les neutrinos dans le Modèle Standard



Caractéristiques du neutrino:

- Subit uniquement l'**interaction faible**
- **3 saveurs** définies par le couplage au lepton chargé (confirmé par la mesure de la largeur du Z au LEP)
- **Chiralité gauche** (spineur à 2 degrés de liberté): on n'observe que le ν_{Left} (et l' $\bar{\nu}_{\text{Right}}$)
- **Masse nulle** (en accord avec les limites sup. directes)

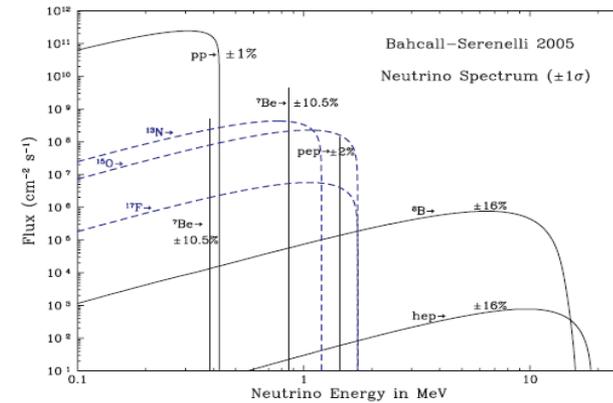
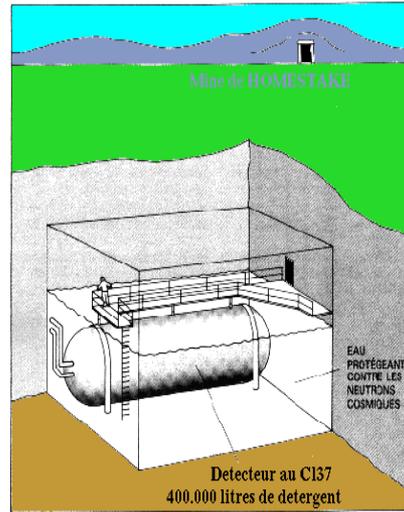
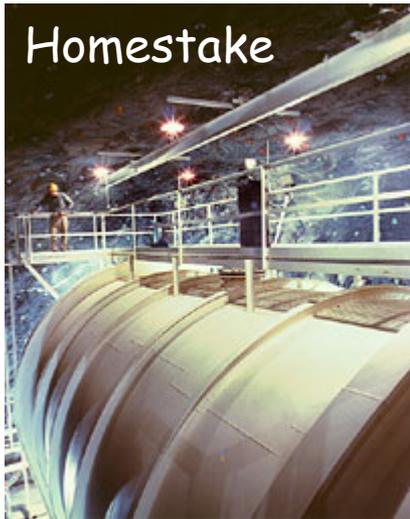


Quand l'astrophysique s'en mêle...

1968

Davis: première détection de ν_e solaires

(sur une idée de Bruno Pontecorvo, 1946)



- expérience radiochimique:
400 000l de chlorure

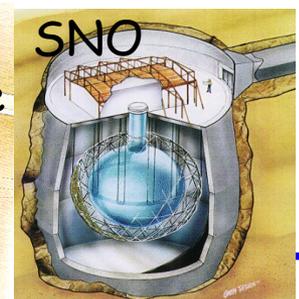


$$\Phi_{\text{obs}}(\nu_e) / \Phi_{\text{MSS}}(\nu_e) \sim 1/3$$

Bahcall: déficit important de ν_e par rapport au Modèle Standard du Soleil (MSS)

... déficit confirmé par plusieurs autres expériences:

$\Phi_{\text{obs}} / \Phi_{\text{theo}}$ dépend de E_{seuil} !



Où sont passés les neutrinos solaires ?

...et si les neutrinos oscillaient ?

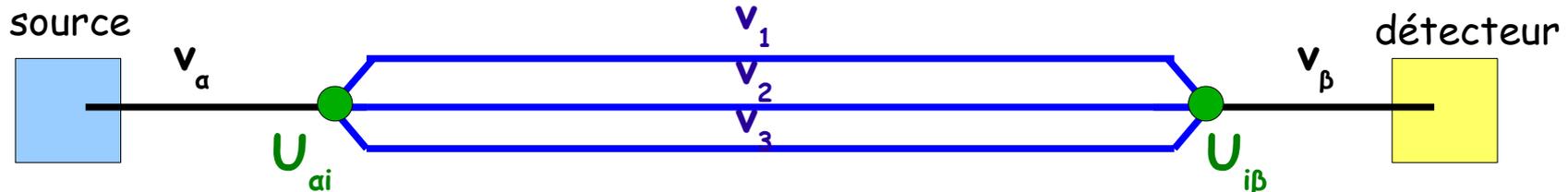
(sur une idée de Bruno Pontecorvo, 1957)

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}s_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

états propres
de saveur

matrice de mélange U:
3 angles ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) + 1 phase (δ)

états propres
de masse



Probabilité de transition $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$: $P_{\alpha \rightarrow \beta}(x=L) = \left| \sum_i U_{\alpha i} e^{-im_i^2 (L/2E)} U_{i\beta}^* \right|^2$

pour une
oscillation à
2 neutrinos:

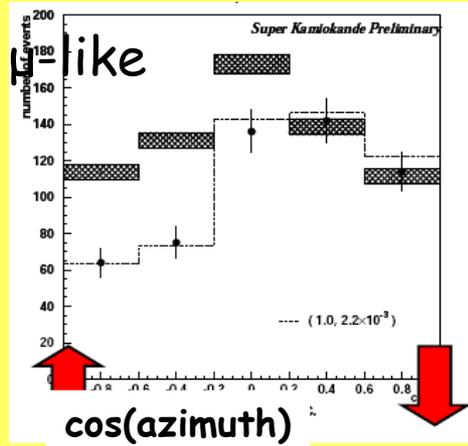
$$P_{\alpha \rightarrow \beta}(x=L) = \sin^2(2\theta) \sin^2(\Delta m^2 L/E)$$

L, E: paramètres
expérimentaux

Bingo !

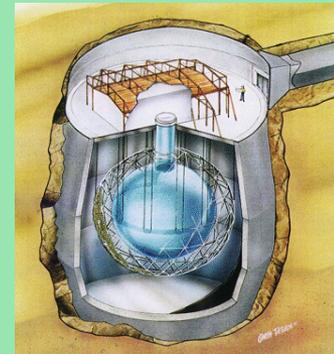
- De nouvelles évidences expérimentales:

SuperKamiokande observe la dépendance angulaire du flux de neutrinos atmosphériques ν_e et ν_μ ($E \sim \text{GeV}$, $L \sim 10 - 10^4 \text{ km}$)

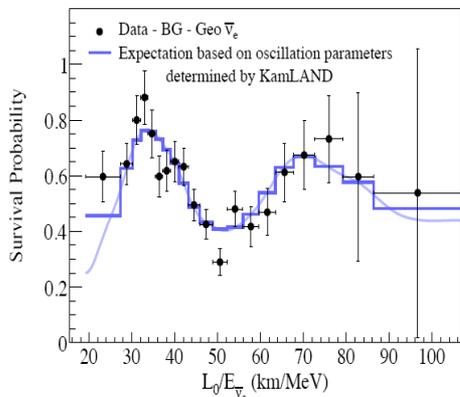


SNO observe les réactions CC et NC des neutrinos provenant du Soleil:

$\Phi^{CC}(\nu_e) \approx 0.35 \Phi^{NC}(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$
 et Φ^{NC} en accord avec les prédictions du MSS



1000 tonnes de D₂O

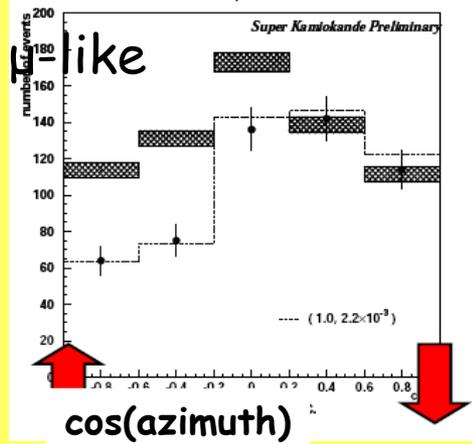


KamLAND observe la longueur d'oscillation dans la Terre des ν_e provenant de centrales nucléaires et confirme le modèle MSW (oscillations dans la matière)

Bingo !

- De nouvelles évidences expérimentales:

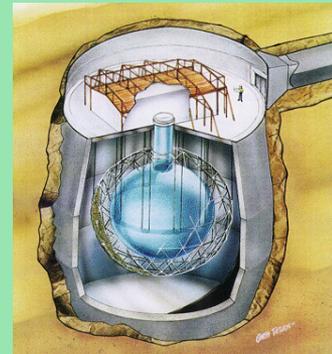
SuperKamiokande observe la dépendance angulaire du flux de neutrinos atmosphériques ν_e et ν_μ ($E \sim \text{GeV}$, $L \sim 10 - 10^4 \text{ km}$)



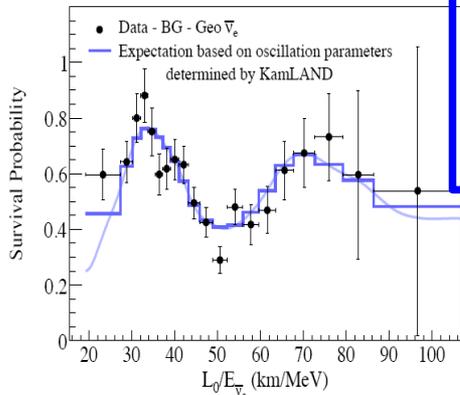
oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$:
 $\sin^2 2\theta_{\text{atm}} \sim 1$
 $\Delta m_{\text{atm}}^2 \sim 2 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$

SNO observe les réactions CC et NC des neutrinos provenant du Soleil:

$\Phi^{CC}(\nu_e) \approx 0.35 \Phi^{NC}(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$
 et Φ^{NC} en accord avec les prédictions du MSS



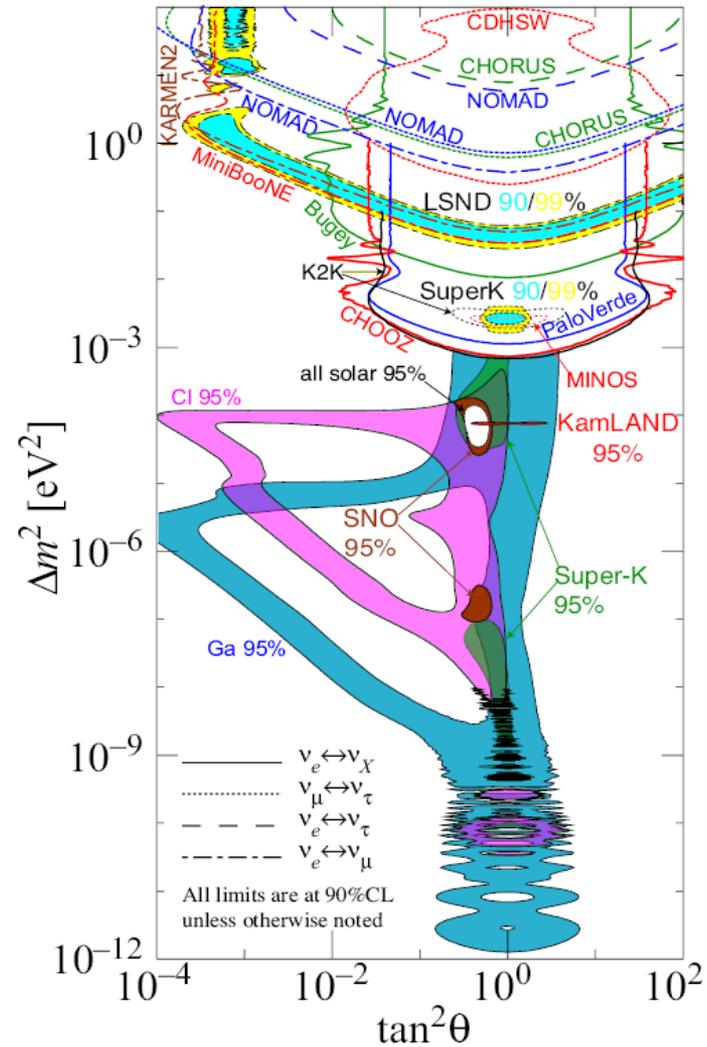
1000 tonnes de D₂O



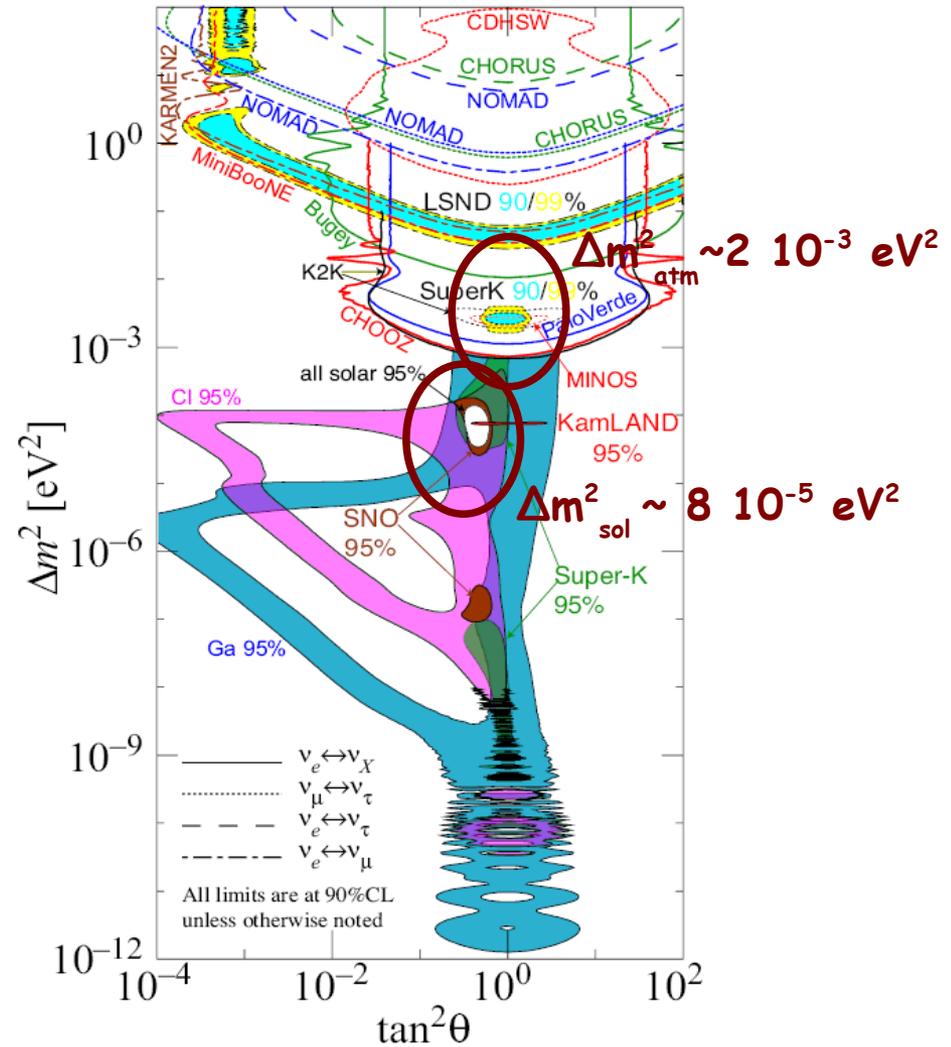
oscillation $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$:
 $\sin^2 2\theta_{\text{sol}} \sim 0,89$
 $\Delta m_{\text{sol}}^2 \sim 8 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$

KamLAND observe la longueur d'oscillation dans la Terre des ν_e provenant de centrales nucléaires et confirme le modèle MSW (oscillations dans la matière)

Les neutrinos oscillent !



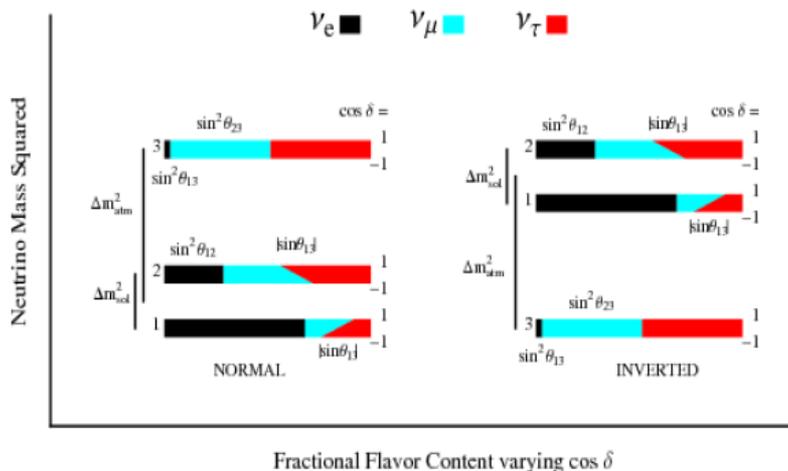
Les neutrinos oscillent !



Les neutrinos oscillent !

3 masses, 2 Δm^2 ...
ce n'est pas encore gagné:

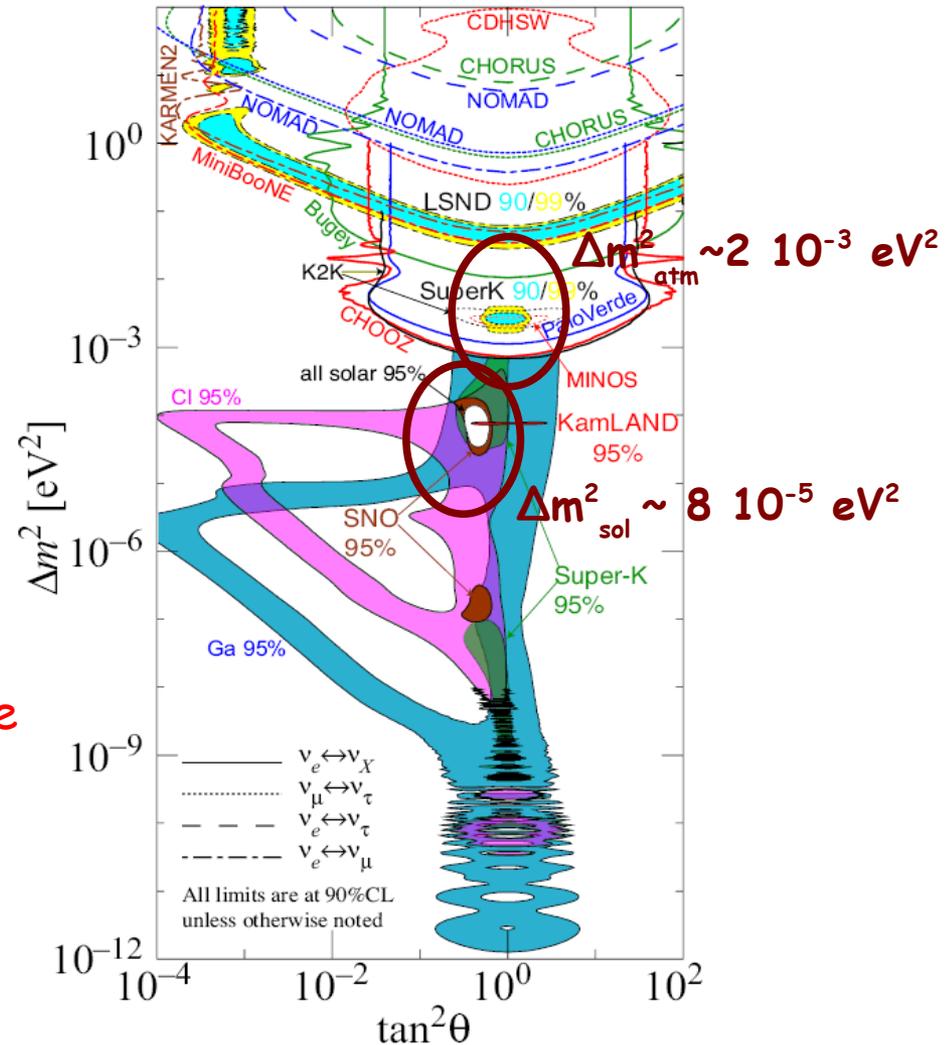
Two possible hierarchies:



...et nous n'avons toujours pas d'échelle absolue de masse...

contraintes actuelles: $m_\nu < 0.1-1 \text{ eV}$

- mesures directes (spectre d'émission β du Tritium)
- cosmologie

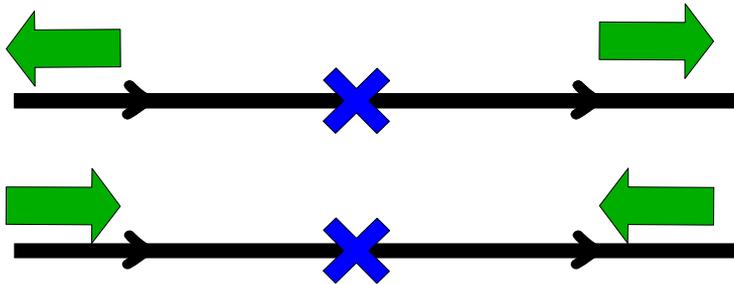


Les neutrinos ont donc une masse...

...mais laquelle ?

DIRAC

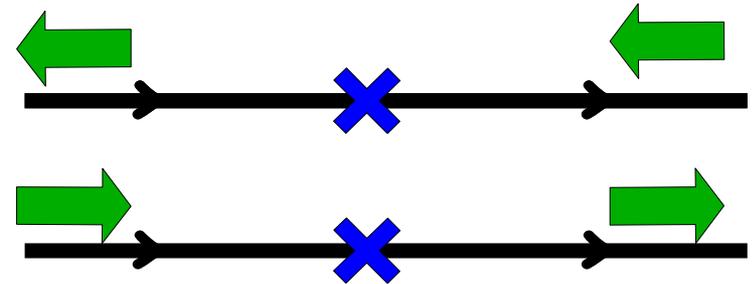
$$L_D = m_D [\bar{\Psi}_L \Psi_R + \bar{\Psi}_R \Psi_L]$$



- spineurs à 4 degrés de liberté
- Ψ_L et Ψ_R nécessaires
- conservation de L

MAJORANA

$$L_M = M_L \bar{\Psi}_L^c \Psi_L + M_R \bar{\Psi}_R^c \Psi_R$$



- spineurs à 2 degrés de liberté
- Ψ_L (ou Ψ_R) suffit
- violation de L

Matrice de masse dans le cas général (Dirac + Majorana)

$$\begin{bmatrix} M_L & m_D \\ m_D & M_R \end{bmatrix}$$

diagonalisation



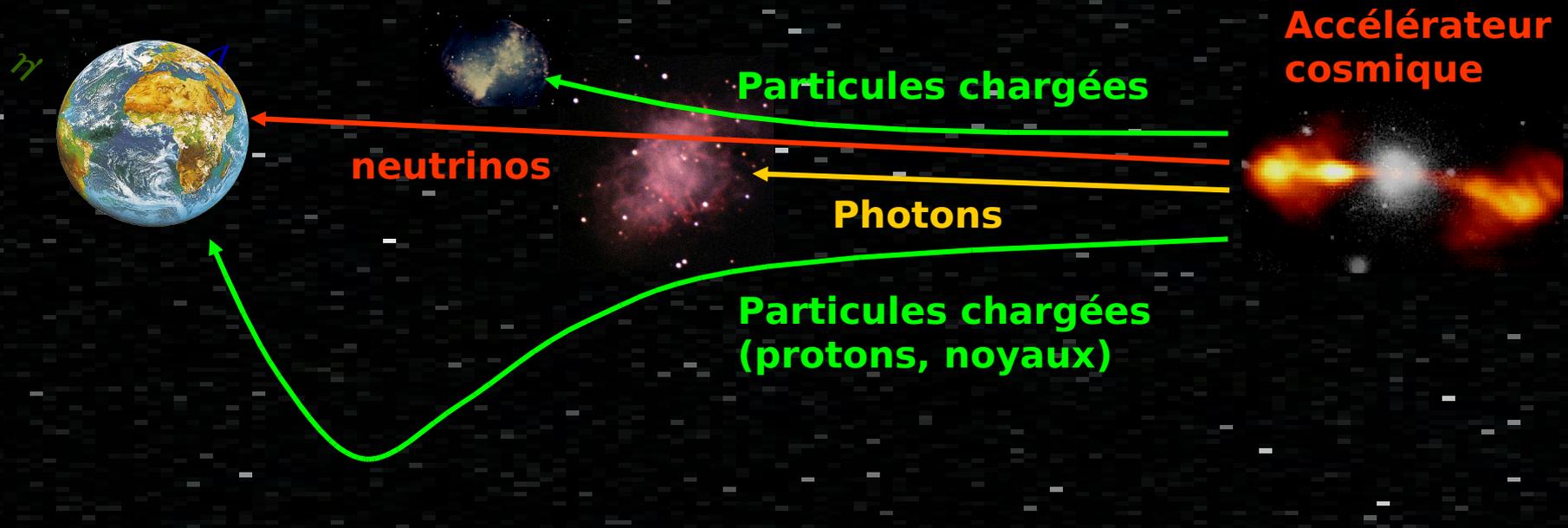
$$M_L \ll M_R$$

$$\begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}$$

$$m \ll M \approx m_D^2$$

Mécanisme SEE-SAW (balançoire)

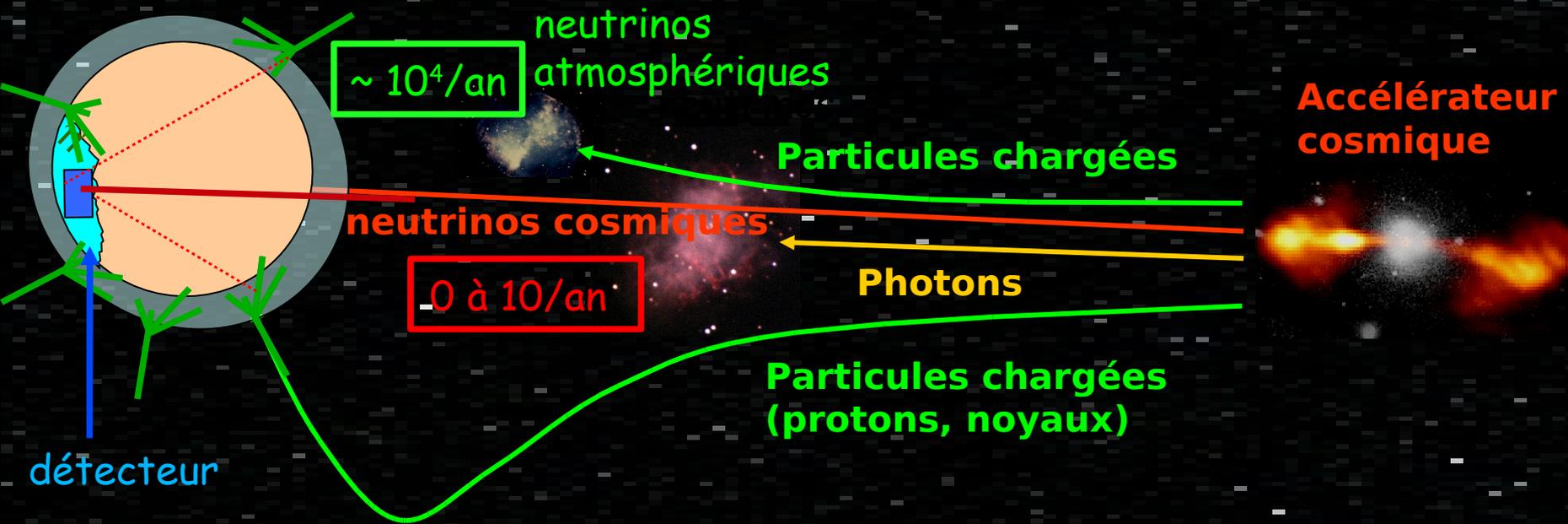
Des neutrinos pour faire de l'astronomie ?



Les neutrinos sont de bons messagers cosmiques:

- particules neutres: ne ressentent pas les interactions électromagnétiques
➡ information directionnelle sur les sources
- interagissent très faiblement avec la matière
➡ propagation sur des distances cosmologiques sans absorption par la matière/le rayonnement diffus

Des neutrinos pour faire de l'astronomie ?



...mais ils sont rares et difficiles à détecter

- particules neutres: ne ressentent pas les interactions électromagnétiques

détection indirecte (particules associées: e^- , μ^- , τ^-)

- faibles flux, faible probabilité d'interaction

- « bruit de fond » important:

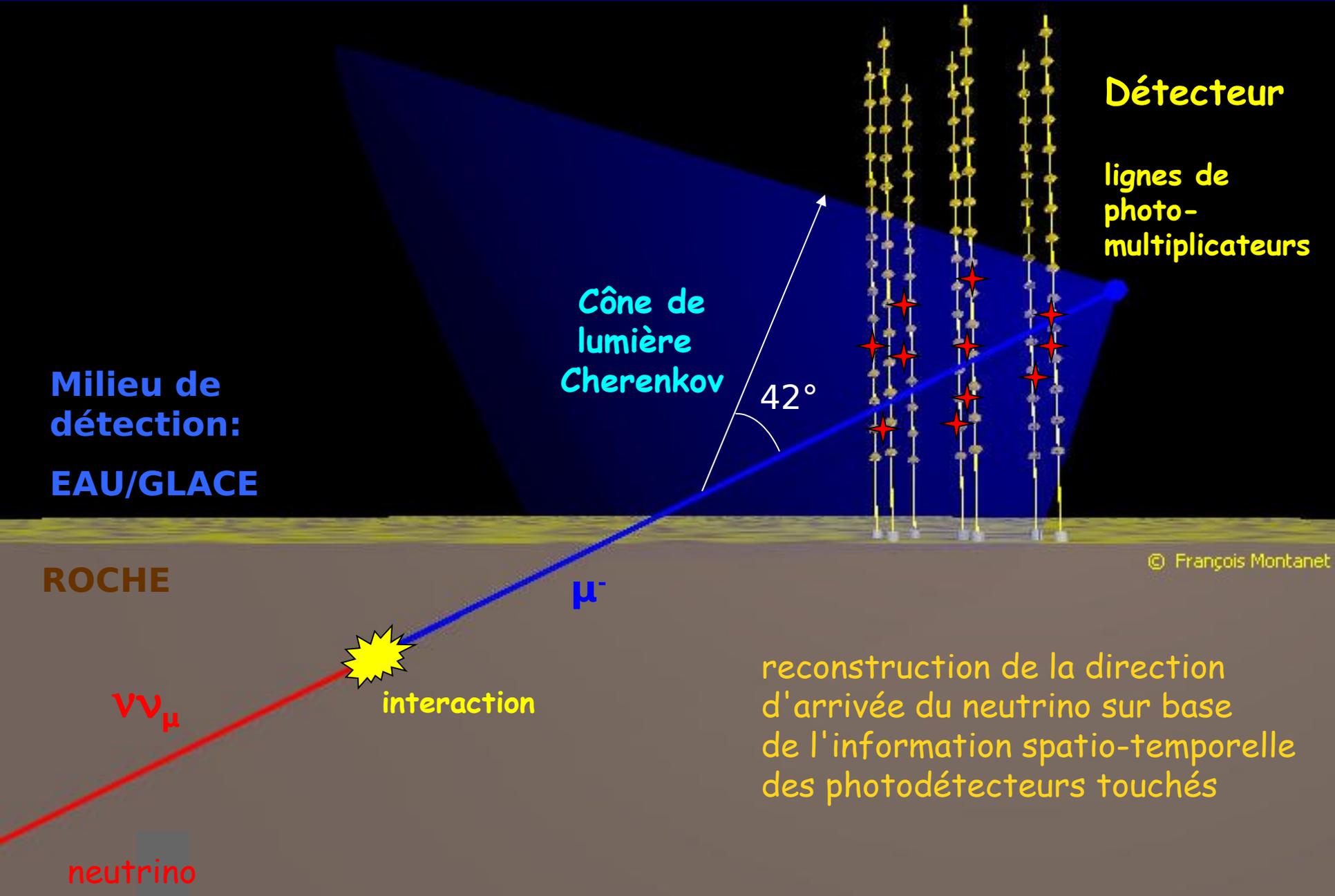
neutrinos produits dans les gerbes atmosphériques

Milieu transparent: eau/glace

Grand volume ($\sim \text{km}^3$!)
Longue durée

Grande profondeur
« yeux » vers le bas

Les télescopes à neutrinos: principe de détection



Quelques perspectives...

➤ Les neutrinos oscillent, donc ils ont une masse !
... et ils ouvrent une fenêtre vers la physique au-delà du Modèle Standard

• la détermination des paramètres d'oscillation entre dans une ère de mesures de précision: Δm_{ij}^2 , θ_{ij} connus à 3σ avec une précision $\sim 10-45\%$

SAUF θ_{13} : uniquement limite supérieure ($\sin 2\theta_{13} < 0.05$ à 3σ)

• la nature du neutrino (Dirac/Majorana) pourrait se révéler dans les expériences sur le « $\beta\beta 0\nu$ »: double désintégration β sans émission de neutrinos

CHOOZ
Rachel Quéval

MEMPHYNO
Michela Marafini
(demain)

➤ Les neutrinos sont de bons messagers cosmiques

• après l'observation des neutrinos du Soleil et de SN1987a, de nouveaux instruments basés sur l'effet Cherenkov démarrent l'astronomie neutrino de haute énergie ($E > 100 \text{ GeV}$).

• Peut-être aussi une nouvelle manière de mettre en évidence des effets de la physique au-delà du Modèle Standard ?

ANTARES
Garabed Halladjian
Nicolas Picot-Clemente