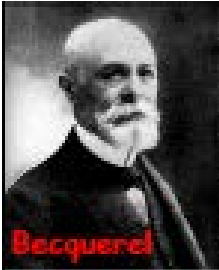


Les neutrinos



Les neutrinos, une collaboration fructueuse



1896 : Becquerel découvre la radioactivité



1913 : Les expériences de Rutherford (diffusion de particules α sur une feuille d'or) conduisent à une première image de l'atome, avec un noyau massif (contenant $2Z$ protons et Z électrons) entouré de Z électrons



1914 : Chadwick mesure le spectre en énergie des rayons β issus de la désintégration du ^{210}Bi : le spectre est continu, contrairement aux spectres α et γ qui présentent des raies discrètes (désintégration à deux corps ou désexcitation nucléaire). Il écrit à Rutherford : « there is probably some silly mistake somewhere ». Mais la suite de l'histoire confirme que la particule β n'emporte qu'une partie de l'énergie de la désintégration.

Crise du spin et de l'énergie

1928 : nouveau problème lié au spin-entier du noyau d'azote 14 (qui devrait contenir 14 protons + 7 électrons soit un nombre impair de fermions -> charge du noyau = +7).

Certains théoriciens comme Bohr vont jusqu'à remettre en cause la conservation de l'énergie, qui ne serait vérifiée que de façon statistique

Mais Pauli ne peut se résoudre à abandonner la conservation de l'énergie

Il soumet par **lettre en décembre 1930** une explication basée sur l'existence d'une **particule neutre de spin $1/2$ au sein du noyau**, qu'il appelle "neutron" (le neutron n'avait pas encore été découvert - 1932).



Wolfgang Pauli
(1900-1958)

Lettre de Wolfgang Pauli du 4 décembre 1930

Chers dames et messieurs radioactifs

4 Décembre 1930
Gloriastr.
Zürich



Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le message de cette lettre. Il vous dira que **pour pallier à la statistique « fausse » des noyaux N-14 et Li-6 et le spectre bêta continu**, j'ai découvert un **remède désespéré pour sauver les lois de la conservation de l'énergie et les statistiques**. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de **particules neutres, de spin 1/2, obéissant au principe d'exclusion**, mais différentes des photons parce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, **et que j'appelle neutrons**. **La masse des neutrons** devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et **ne doit en aucun cas excéder 0.01 fois la masse du proton**. Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que, pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron soit constant...

J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagner, et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre bêta, est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, monsieur Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : "Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts.". Dorénavant, on doit discuter sérieusement toute voie d'issue. **Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez**. **Malheureusement, je ne pourrai pas être moi même à Tubingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre**.

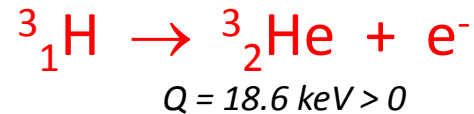
Votre serviteur le plus dévoué,

W. Pauli

Li-6 dont le noyau était censé à l'époque renfermer 6 protons et 3 électrons

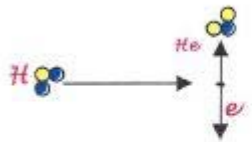
→ Explication

Désintégration β^-

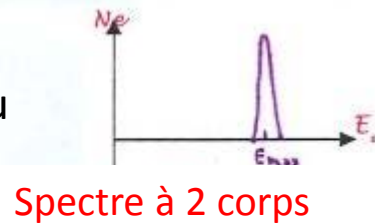


On détecte l'électron

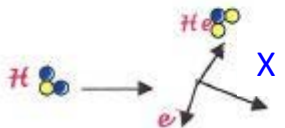
Observations



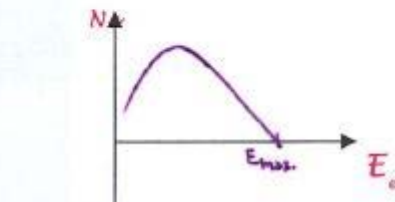
attendu



Spectre à 2 corps



observé



Spectre à 3 corps

Spectre continu observé !

Pour satisfaire la conservation de l'énergie et du moment cinétique et comprendre le spectre observé

⇒ Il faudrait une 3ème particule dans la désintégration (X)

→ de spin 1/2

→ de masse très petite devant $m_p c^2$

→ emportant une partie de l'énergie disponible



e^- et X se partagent l'énergie disponible

Crise du spin et de l'énergie



- $(7 \text{ protons} + 7 \text{ « neutrons »}) \times 1/2 = \text{entier !}$ *Crise du spin ok*
- Lors de la désintégration du noyau, cette particule est émise en même temps que l'électron *Crise du spectre continu ok*

Pauli vient d'inventer à la fois le terme neutron et le neutrino



1932 : Chadwick découvre expérimentalement le « vrai » neutron

1934 : Fermi propose une *théorie de la désintégration β* et appelle neutrino la particule de Pauli

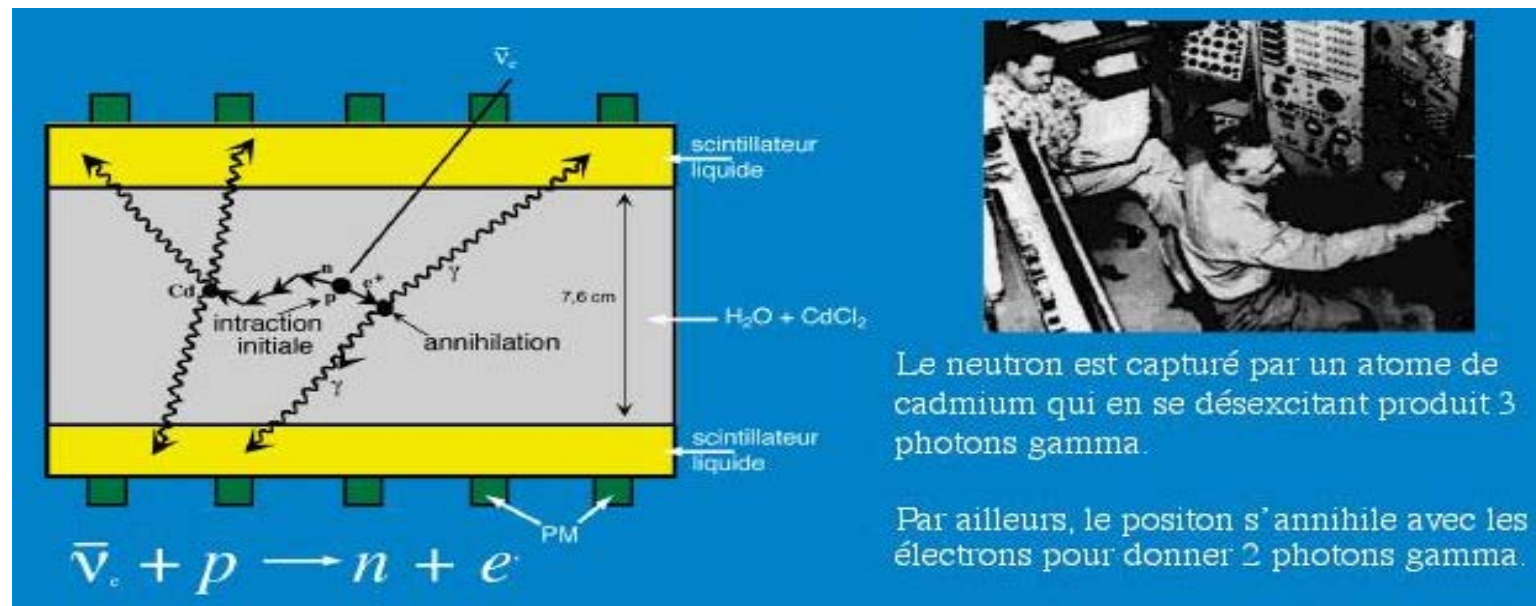
Origine : décroissance β
particule postulée par W. Pauli,
confirmée par Enrico Fermi dans sa théorie,
masse $\cong 0$ MeV, spin = 1/2, charge = 0
fermion élémentaire de la matière

Interagit très peu avec la matière

- Difficile à étudier car peut traverser la terre sans être arrêté
- Particule d'interaction faible

⇒ Il faut attendre 1956 pour que Cowan et Reines observent expérimentalement des (anti)neutrinos électronique issus de réacteurs (la section efficace de capture d'un neutrino ν_e par un nucléon est de l'ordre de 10^{-47} m² pour un neutrino de quelques MeV, et elle augmente avec l'énergie, jusqu'à des valeurs voisines de 10^{-42} m² à un GeV, et 10^{-40} m² à 100 GeV).

1956 : Cowan et Reines **découvrent** l'(anti)neutrino électronique (émis par des réacteurs nucléaires)



1955 : Violation maximale de parité dans les désintégrations β

1956 : Théorie V-A, postulant que seuls les neutrinos de chiralité/hélicité gauche interagissent

1962 : Découverte d'une deuxième saveur de neutrinos : $\nu_\mu \neq \nu_e$

1970-1990 : Utilisation intensive des neutrinos pour sonder la structure nucléaire

1990 : 3 familles de neutrinos à partir de la largeur du Z^0 au LEP

1994 : Annonce d'oscillations de neutrinos dans LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector)

1995 : Déficit de neutrinos solaires confirmé par GALLEX

1999 : Oscillations de neutrinos → GALLEX, SUPER-KAMIOKANDE

2000 : Découverte de la troisième saveur de neutrino ν_τ

MODELE STANDARD MINIMAL : 3 familles de neutrinos sans masse

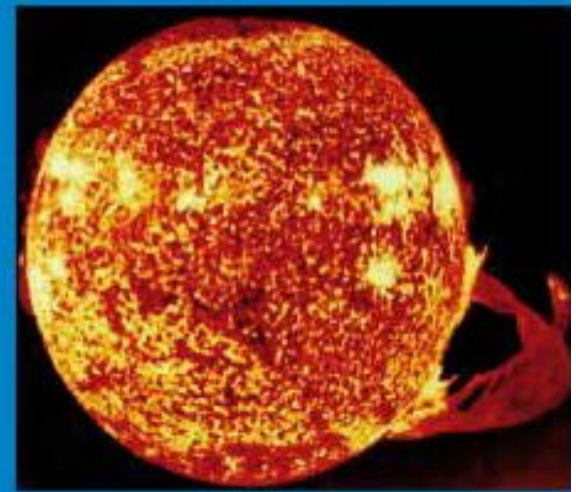
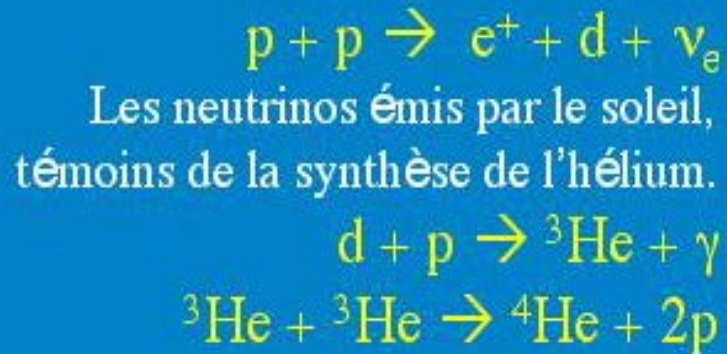
2002 : Prix Nobel de Physique conjoint (M. Koshiba de KAMIOKANDE).

1994-2008 : Oscillations de saveur des neutrinos → les neutrinos sont massifs

Les sources naturelles de neutrinos

Les désintégrations isobariques : émission d'(anti)neutrinos

Les neutrinos émis
par le soleil



Les (anti)neutrinos issus
d'explosion de
supernovae...
et les neutrinos
atmosphériques présents
dans les rayonnements
cosmiques



Neutrinos issus des supernovae



et du cosmos



Les sources artificielles de neutrinos

Les centrales nucléaires

La centrale nucléaire de Chooz, dans les Ardennes, représente 3×10^{20} fissions/s soit 18×10^{20} (anti)neutrinos/s

Le détecteur CHOOZ, situé à une distance de 1 km de la centrale, est installé à une profondeur de 100 m. Un deuxième détecteur est installé à 350 m de distance.



Les bombes thermonucléaires

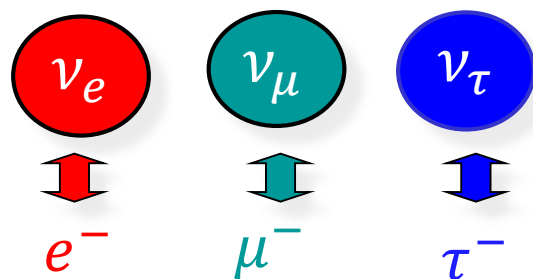


Oscillations, masse et nature des neutrinos

Neutrinos et modèle standard

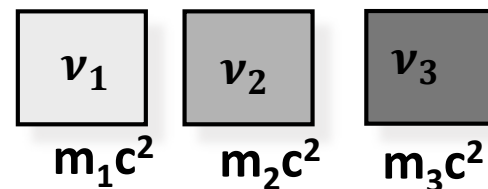
neutrino = fermion élémentaire de la matière, lepton neutre
3 saveurs pour 3 familles

Modèle standard minimal → les neutrinos sont de Dirac, $m_\nu c^2 = 0$,
théorie V-A → 3 doublets de chiralité
gauche $(l^-, \nu_l)_L$



Mais si neutrinos massifs

→ 3 états propres de masse



Mélange
(ou mixing)

oscillations

Etats
propres de
saveur

≠

Etats propres
de masse

Le neutrino : connaissance et questions

- Le neutrino a-t-il une masse ?

Masse nulle dans le modèle standard mais oscillations observées !

Question : si la masse des ν est non nulle, pourquoi est-elle si faible ?

Limites actuelles les plus contraignantes sont données par les observations cosmologiques

$\Sigma m_\nu < 0,12 \text{ eV}$ à 95% CL (N. Palanque-Delabrouille et al 2015 JCAP 11 011)

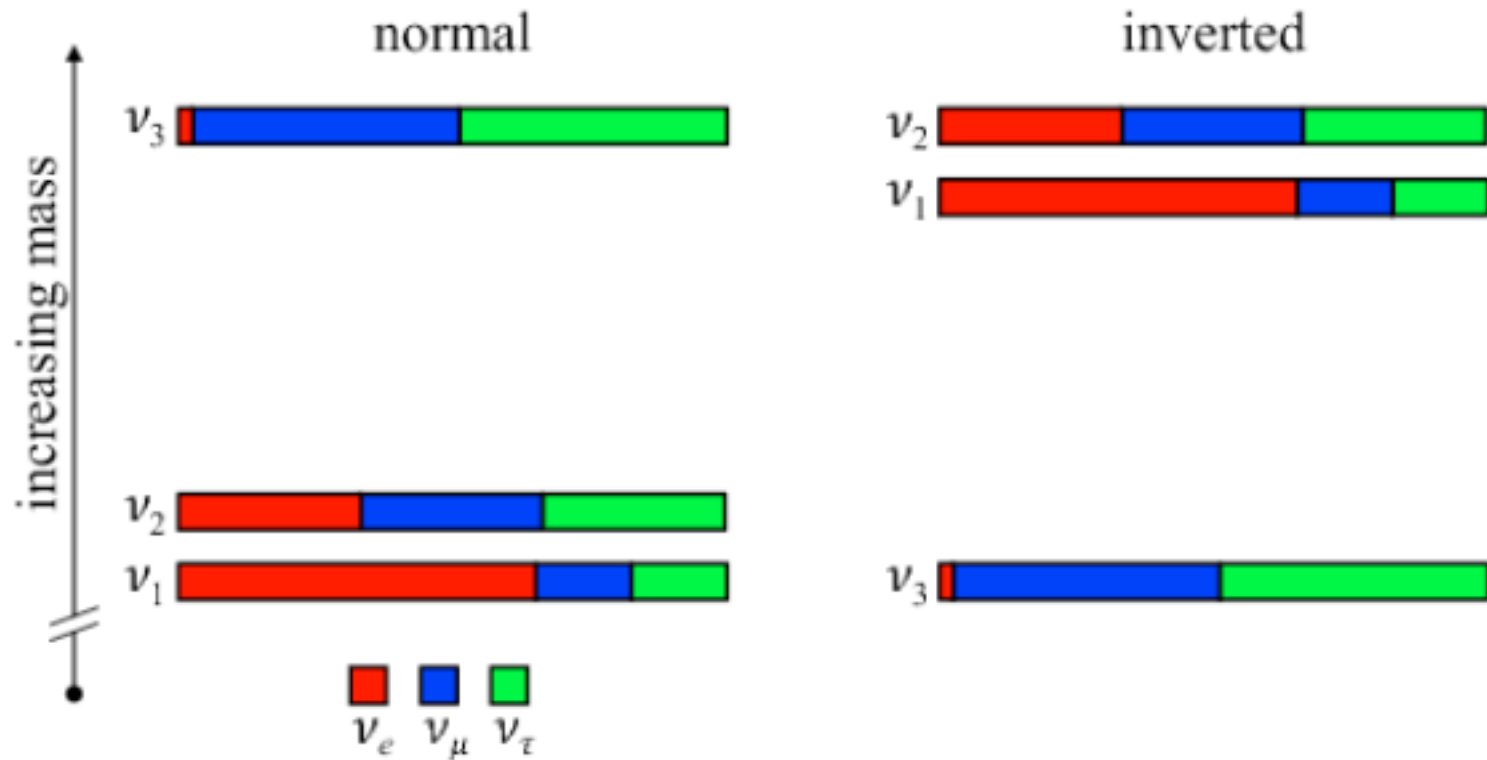
Rq. Si $m_\nu c^2 \sim 10^{-6} m_e c^2$ alors la masse de l'univers est dominée par les neutrinos

- Existe-t-il une échelle de masse absolue pour les neutrinos ?

Les oscillations donnent des écarts en masse carrée

→ insuffisant car une échelle de masse absolue est fondamentale pour la cosmologie et pour obtenir une théorie unifiée des interactions

Hiérarchie de masse ?



Le neutrino : connaissances et questions

- Le neutrino a-t-il un moment magnétique ?

Si oui alors il existe une interaction électromagnétique entre e^- et ν_e

- Quelle est la nature du neutrino ?

→ Dans le MS, les neutrinos sont gauches et les antineutrinos sont droits, et ce sont deux particules différentes (Dirac)



→ A-t-on $\nu \equiv \bar{\nu}$?

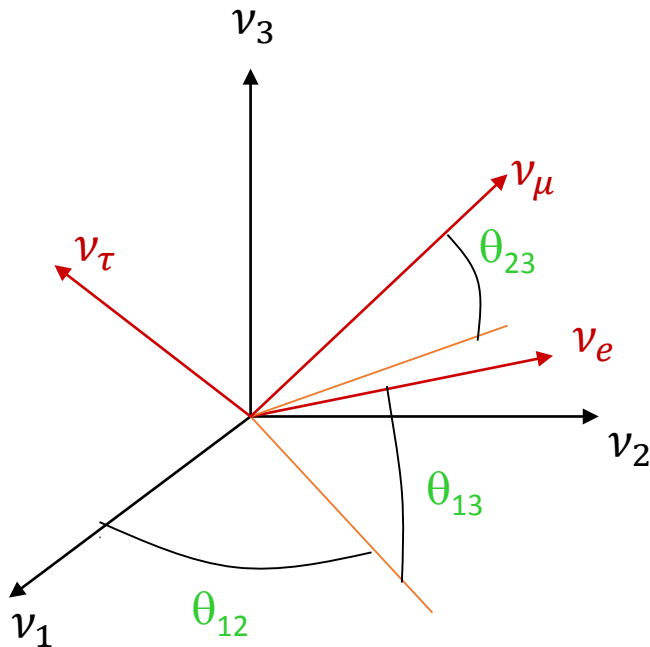
⇔ neutrino de Majorana

→ un seul état de neutrino,
avec deux états de chiralité ν_L, ν_R

Si masse et $\left\{ \begin{array}{l} \text{Dirac} \\ \text{ou} \\ \text{Majorana} \end{array} \right. \Leftrightarrow \text{oscillations possibles}$

Oscillations de saveur

La matrice de mélange : les paramètres manquants



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

U = Matrice de mélange MNSP
(Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo)

3 masses m_1, m_2, m_3

3 angles : $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$

plus 1 phase de violation de CP δ_{CP}



La matrice de mélange : les paramètres manquants

**Atmosphérique
K2K**

**Réacteurs (CHOOZ)
Accélérateurs (JPARC)**

**Solaire
Réacteurs**

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \text{Diag}\{1, e^{i\phi_1}, e^{i\phi_2}\}$$

δ_{CP} = phase Dirac de
violation de CP

ϕ_1, ϕ_2 = phases Majorana
de violation de CP

Si les neutrinos sont de Dirac (pas de phases de Majorana), le produit des trois matrices donnant la matrice MNSP est exactement de la forme de la matrice CKM de mélange des quarks



1 - échelle de masse absolue

Temps de vol des neutrinos – Explosion de SN $m_\nu < 20 \text{ eV}$

Fin du spectre β du Tritium $m_\nu < 2,2 \text{ eV}$

Fluctuations du CMB (cosmologie) : WMAP $m_\nu < 0,33 \text{ eV}$ (conservatif)

2 - nature Dirac/Majorana

Recherche de la double désintégration sans neutrinos $\beta\beta 0\nu$ (qui peut être reliée à l'échelle de masse absolue)

3 - matrice de mélange, violation de CP, hiérarchie de masse

Les oscillations de saveur

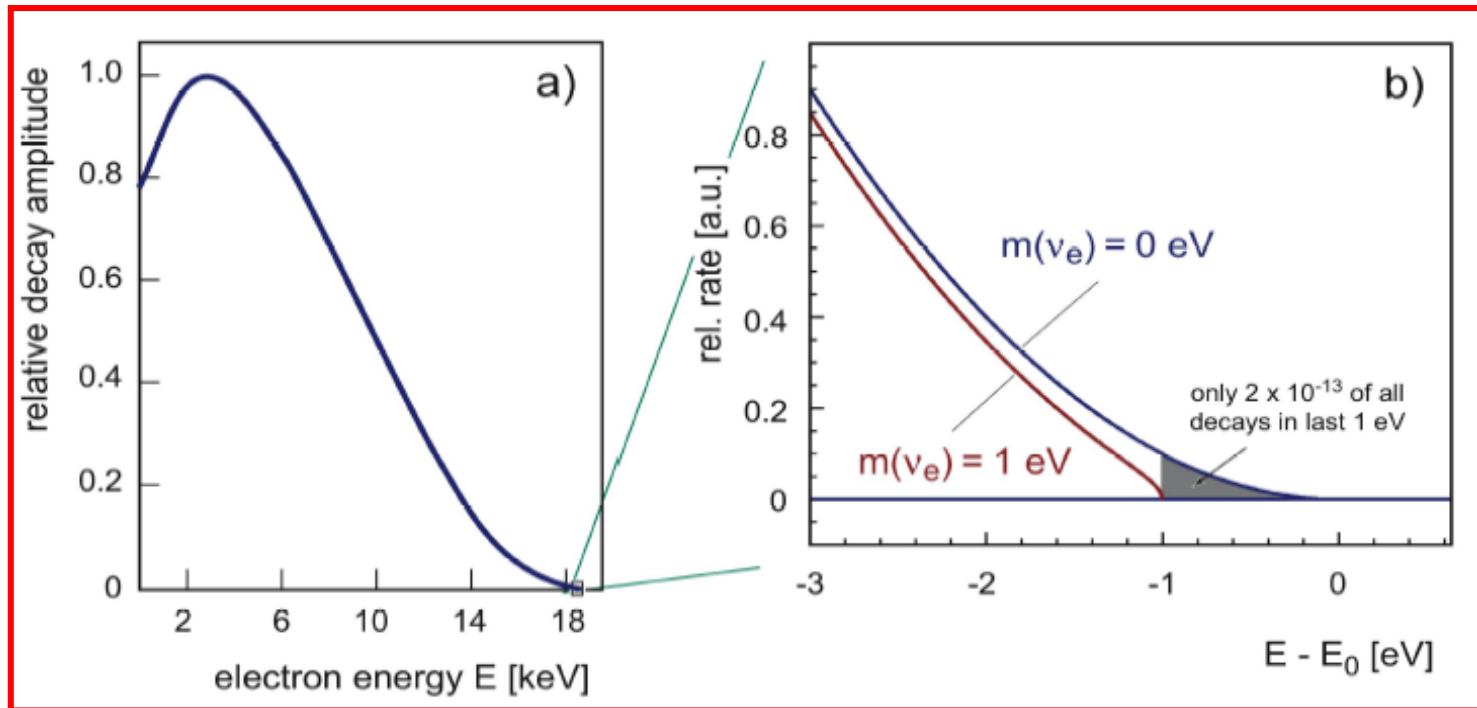
Il faut utiliser toutes les sources possibles de neutrinos : radioactivité naturelle, soleil, réacteurs, ν atmosphériques, accélérateurs à des énergies diverses + astronomie neutrino (ANTARES, AMANDA) ...

mesures directes de la masse



désintégration bêta du tritium

Spectre en énergie de l'électron (a), et région proche de la fin du spectre (b), pour une masse nulle de neutrino et pour $m_{\nu}c^2 = 1 \text{ eV}$.



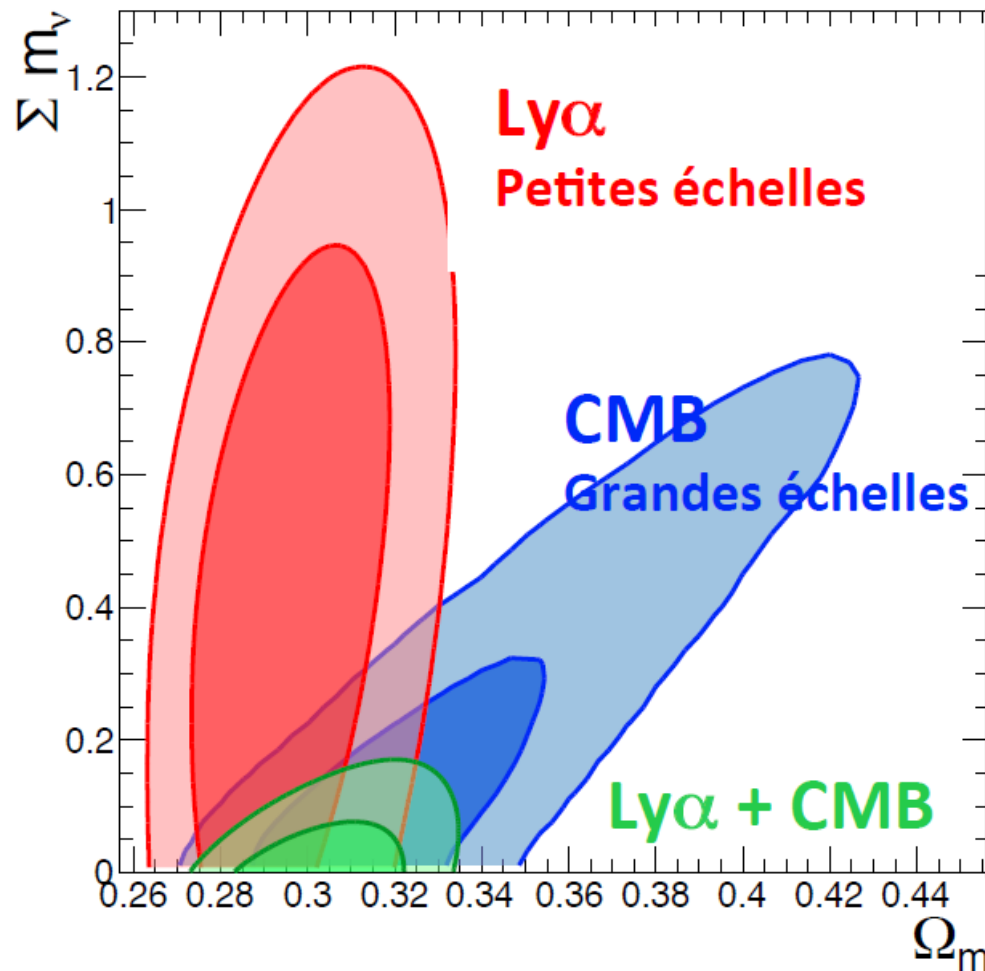
Expériences MAINZ et TROITSK : $m_{\nu_e}c^2 < 2,2 \text{ eV}$ (95% C.L.)

Projet en cours de construction : KATRIN, pour mesurer $m_{\nu_e}c^2 < 0,2 \text{ eV}$

mesures directes de la masse

cosmologie

Les expériences comme PLANCK et SDSS permettent de calculer la somme des masses des neutrinos $\Sigma_i m_i$



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

(2015)

nature Dirac/Majorana : double désintégration bêta sans émission de neutrinos

$$\text{Processus } \beta\beta 0\nu : (A, Z) \rightarrow (A, Z+2) + 2e^-$$

Une découverte impliquerait pour le nombre leptonique $\Delta L = 2$ et **neutrino de Majorana**
 $\nu \equiv \bar{\nu}$

→ physique au-delà du Modèle Standard

Si le processus se produit par échange d'un neutrino massif léger alors la demi-vie $T_{1/2}^{0\nu}$ (temps au bout duquel la moitié des atomes se sont désintégrés) dépendra de la masse effective du neutrino.

$\langle m_\nu \rangle$: masse effective du neutrino

$$\langle m_\nu \rangle = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei}^2 m_i \right|$$

m_i : masse des états propres de ν
 U_{ei} : éléments de la matrice de mélange
(voir plus loin dans ce cours)

$\langle m_\nu \rangle$ pourrait donner une échelle absolue pour la masse des neutrinos

Limites $\beta\beta 0\nu$ obtenues sur les différents isotopes

Isotope	$T_{1/2}(90\%CL)$ (ans)	$\langle m_\nu \rangle$ (eV)	Masse (kg.an)	Expérience
^{48}Ca	$> 1.4 \cdot 10^{22}$	$< 7.2 - 44.7$	0.005	Candles
^{76}Ge	$> 1.9 \cdot 10^{25}$	$< 0.35 - 1.05$	35.5	Heidelberg-Moscou
^{76}Ge	$> 1.57 \cdot 10^{25}$	$< 0.33 - 1.31$	8.9	IGEX
^{82}Se	$> 1.0 \cdot 10^{23}$	$< 1.71 - 4.86$	1.007	NEMO3
^{96}Zr	$> 1.0 \cdot 10^{21}$	< 23	0.008	NEMO2
^{100}Mo	$> 4.6 \cdot 10^{23}$	$< 0.66 - 2.81$	7.47	NEMO3
^{116}Cd	$> 0.7 \cdot 10^{23}$	< 1.7	0.159	Solotvina
^{130}Te	$> 2.4 \cdot 10^{24}$	$< 0.18 - 0.97$	3.16	CUORICINO
^{136}Xe	$> 4.4 \cdot 10^{23}$	$< 1.8 - 5.2$	2.27	Gotthard
^{150}Nd	$> 1.2 \cdot 10^{21}$	< 3	0.009	TPC M.Moe

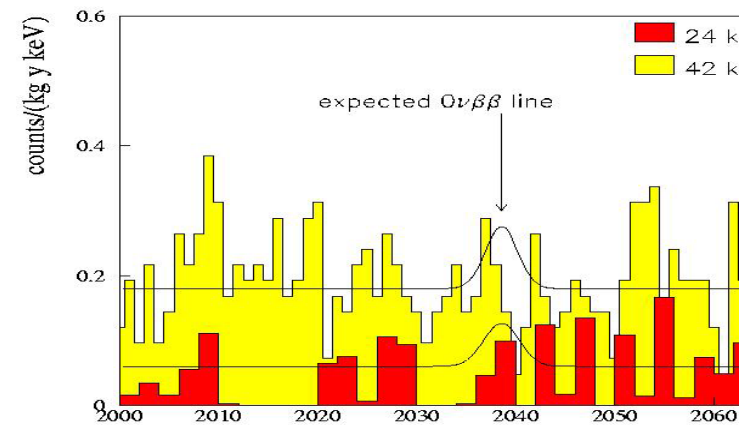
Résultat conservatif utilisé : $\langle m_\nu c^2 \rangle < 1\text{eV}$

Expérience NEMO3 (Neutrino Ettore Majorana Observatory) au LSM (tunnel du Fréjus)



Meilleure limite actuelle ^{76}Ge
(Heidelberg-Moscou / IGEX)

$$m_{\text{eff}} < 0.4-0.8 \text{ eV}$$



Résultat : $m_\nu < 0,5 \text{ à } 1 \text{ eV}$

Futurs projets : SuperNEMO

Oscillations de saveur

Exemple du mélange de 2 saveurs $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$

Un état propre de saveur $|\nu_e\rangle$, $|\nu_\mu\rangle$ ou $|\nu_\tau\rangle$ correspond au mélange d'angle θ de deux états propres de masse $|\nu_1\rangle$ et $|\nu_2\rangle$

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

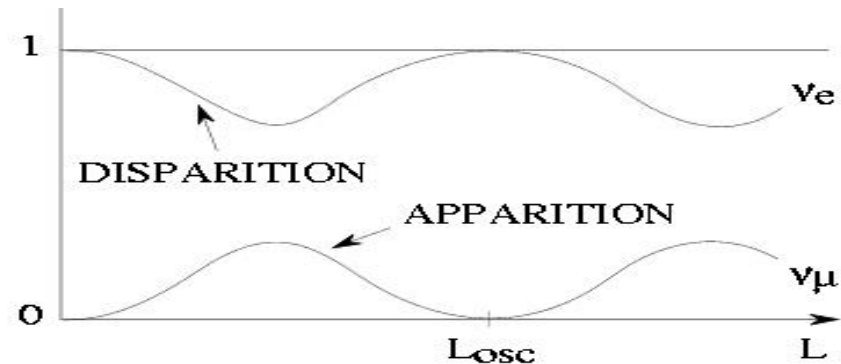
A $t = 0$, seulement des ν_e , avec $|\nu(t = 0)\rangle = |\nu_e\rangle$

A $t > 0$, $|\nu(t)\rangle = e^{-iE_1 t} \cos \theta |\nu_1\rangle + e^{-iE_2 t} \sin \theta |\nu_2\rangle$

La probabilité d'oscillation $\nu_e \rightarrow \nu_\mu$ est définie par : $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = |\langle \nu_\mu | \nu(t) \rangle|^2$

On peut démontrer (voir par exemple Thomson chap 13) que cette probabilité est proportionnelle à : $\sin^2 \left(\frac{(m_1^2 - m_2^2).L}{4E_\nu} \right)$

Avec $m_1^2 - m_2^2$ la différence des masses au carré des neutrinos et L la distance parcourue.



oscillations de saveur

Neutrinos atmosphériques

$p + \text{Azote} \rightarrow \text{pions}$

$$\pi \rightarrow \mu + \nu_{\mu}$$

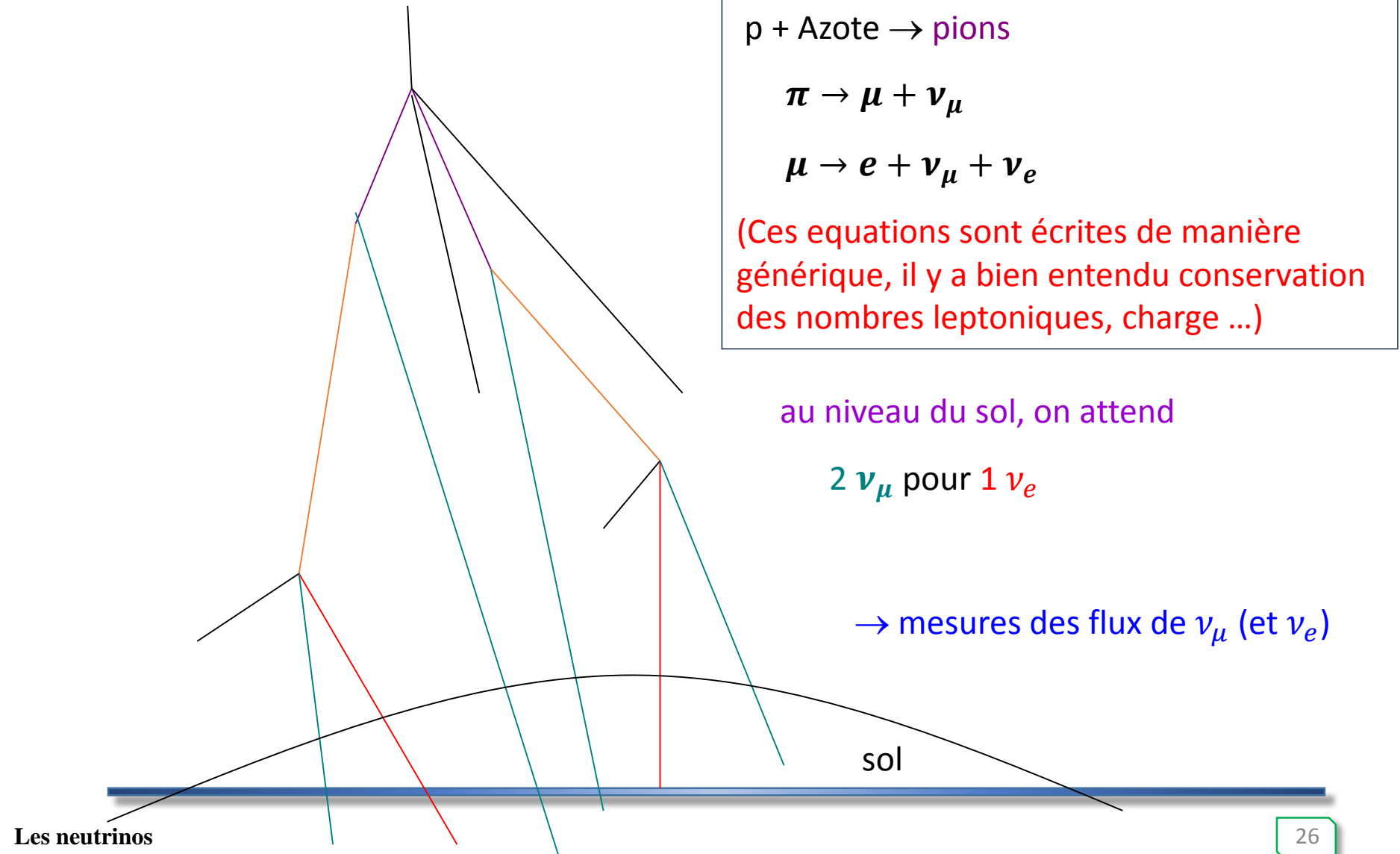
$$\mu \rightarrow e + \nu_{\mu} + \nu_e$$

(Ces equations sont écrites de manière générique, il y a bien entendu conservation des nombres leptoniques, charge ...)

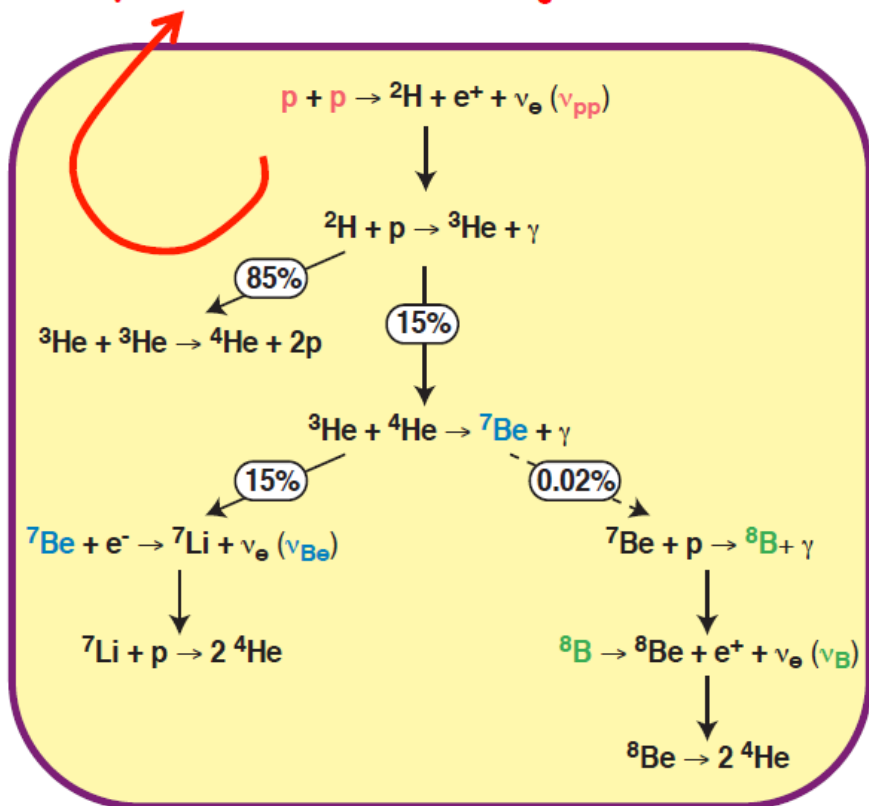
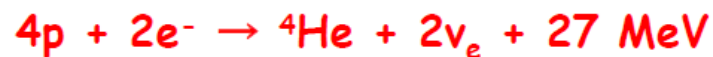
au niveau du sol, on attend

$2 \nu_{\mu}$ pour $1 \nu_e$

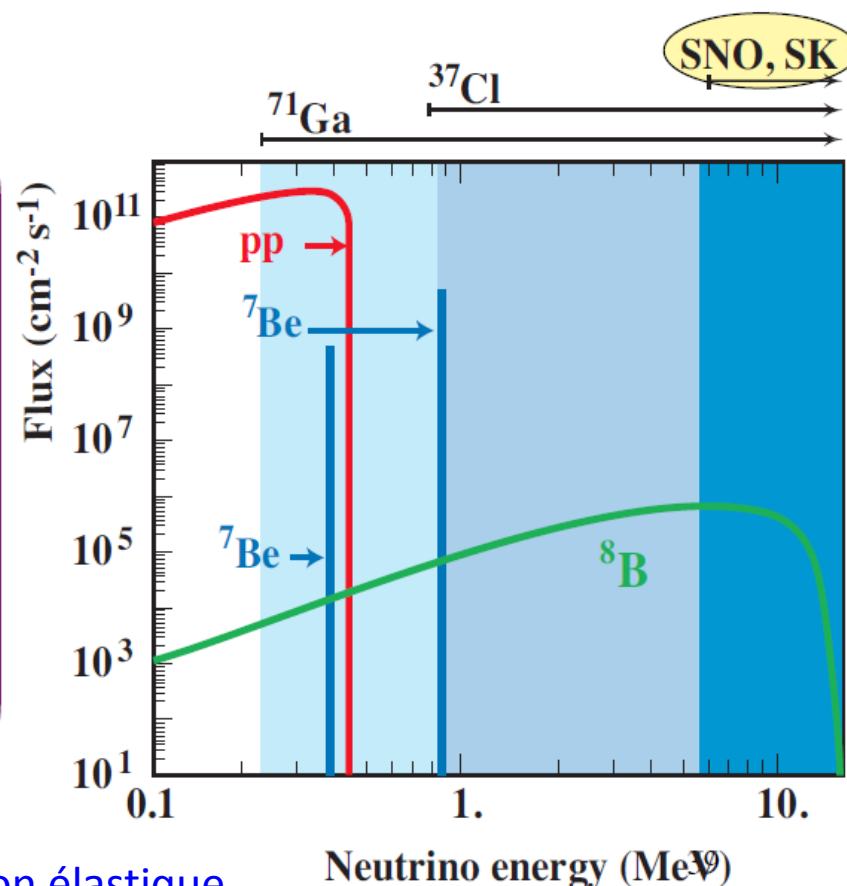
→ mesures des flux de ν_{μ} (et ν_e)



Neutrinos solaires



Il faut un modèle solaire pour les différents flux



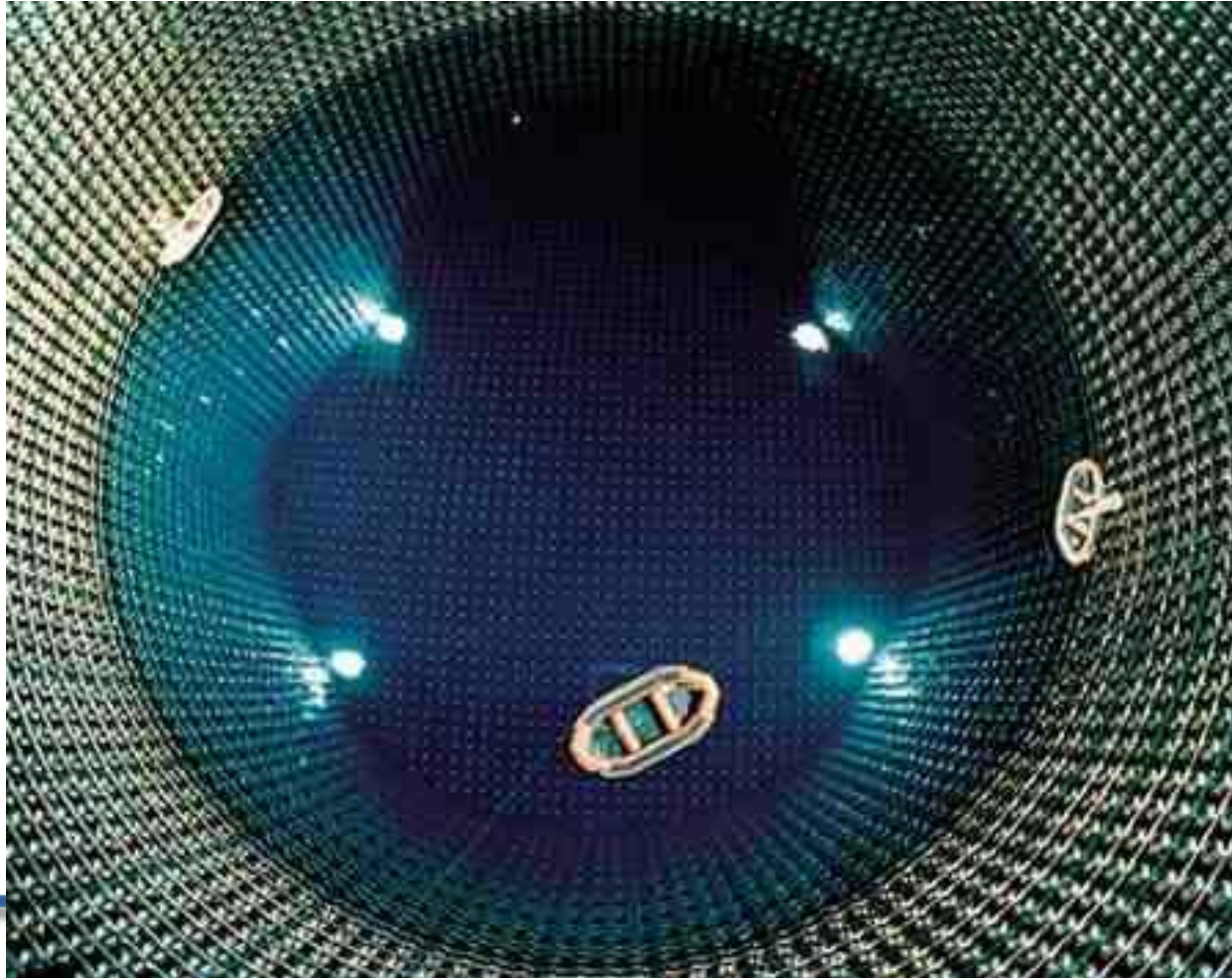
Détection des neutrinos solaires par diffusion élastique

ES (elastic scattering) : $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$

SK = SuperKamiokande (Japon)

Piscine remplie d'eau ultra-pure entourée de PMs

Détection des neutrinos solaires et neutrinos atmosphériques



Super Kamiokande au Japon

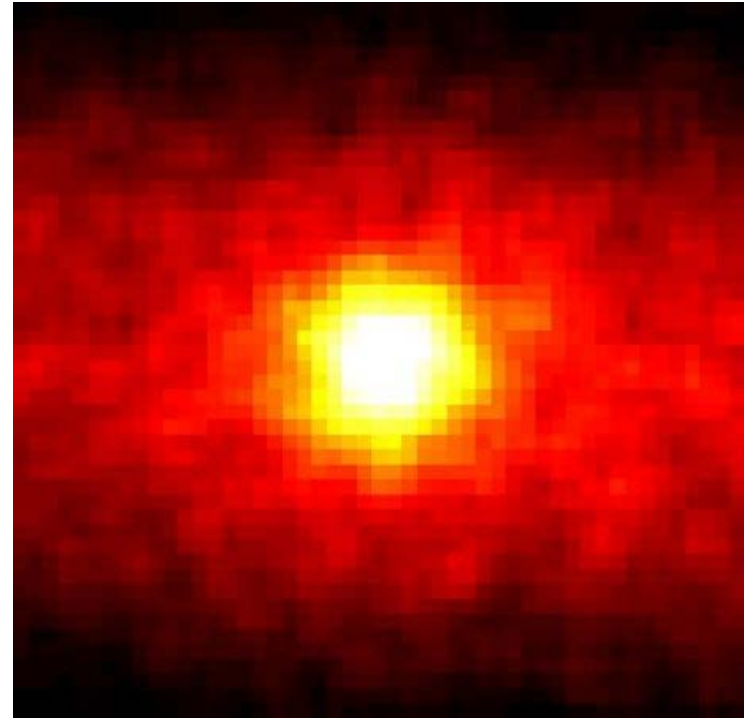
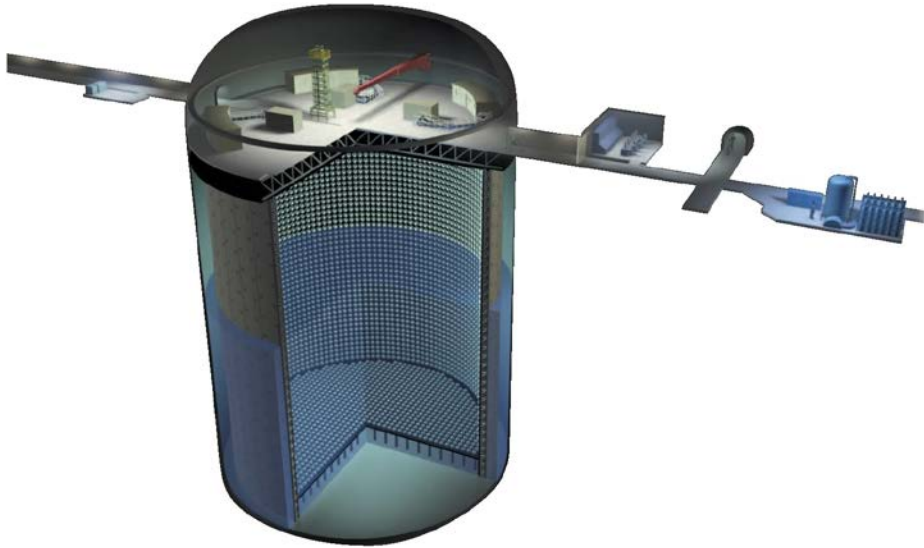
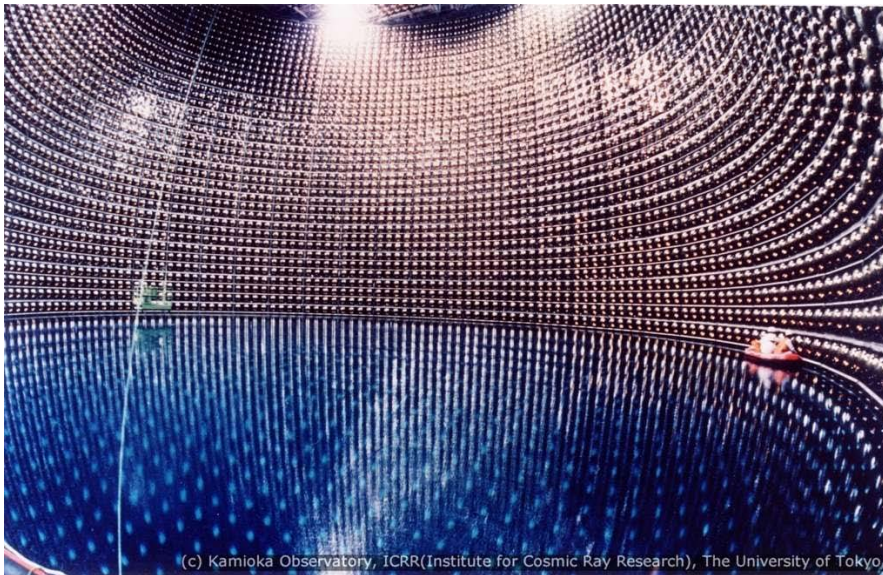


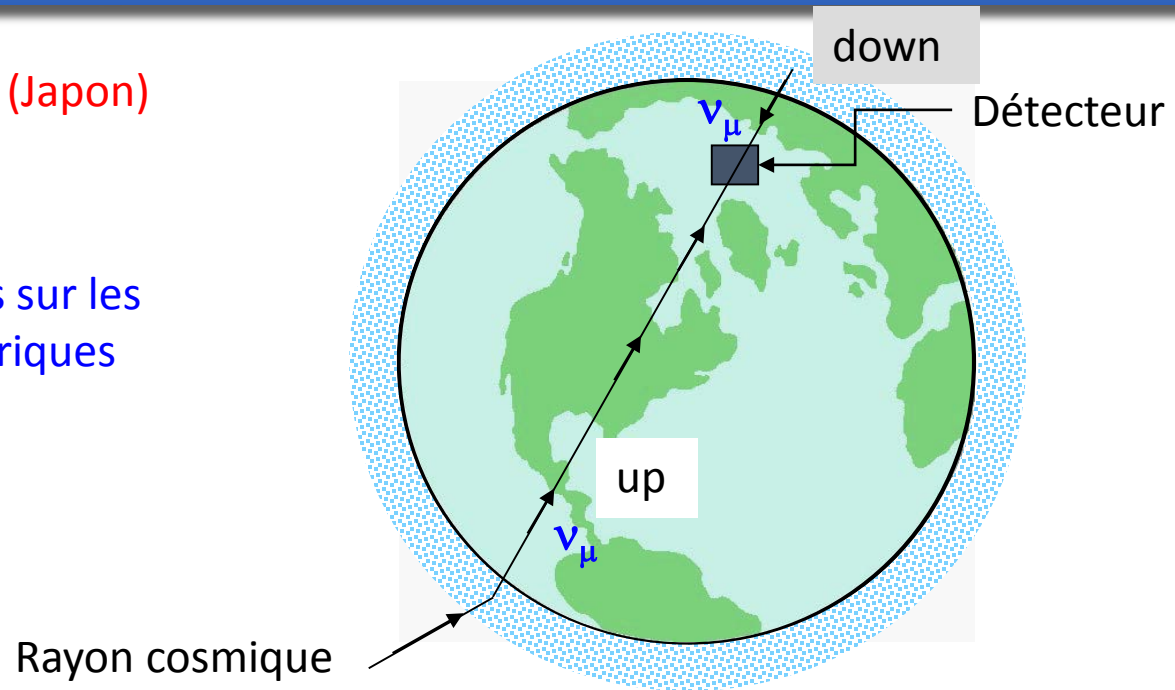
Image en neutrinos du soleil pris par Super Kamiokande. Temps de pose pour la "photo" : 500 jours...



(c) Kamioka Observatory, ICRR(Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo,

SK = SuperKamiokande (Japon)

Exemple de résultats sur les neutrinos atmosphériques



Pour des rayons cosmiques de plus de 2 GeV sans disparition de ν_μ (c'est-à-dire sans oscillations), on attend

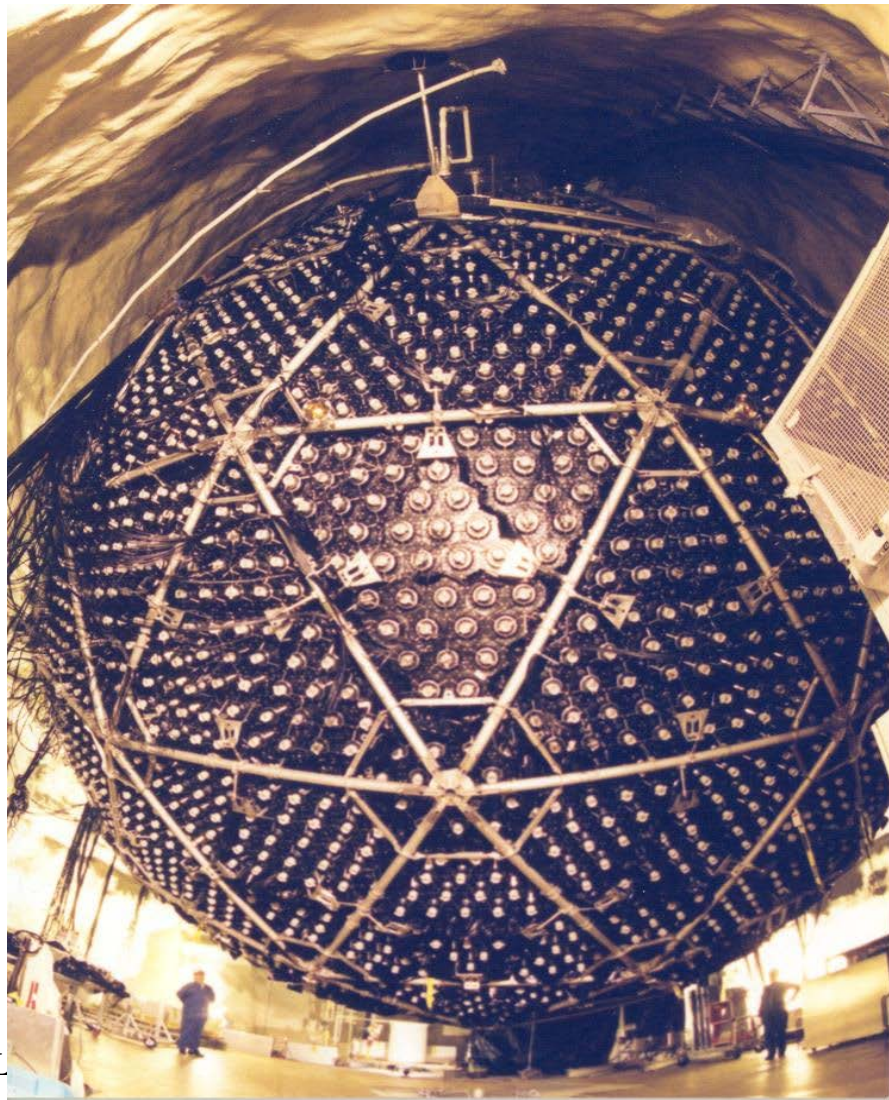
$$\Rightarrow \frac{\phi_{\nu_\mu}(up)}{\phi_{\nu_\mu}(down)} = 1$$

mais Super-Kamiokande a montré que pour $E_\nu > 1.3 \text{ GeV}$: $\frac{\phi_{\nu_\mu}(up)}{\phi_{\nu_\mu}(down)} = 0,54 \pm 0,04$

(asymétrie up/down)

SNO = Sudbury Neutrino Observatory (Canada)

(détecteur rempli de deutérium)



ν Reactions in SNO

CC $\nu_e + d \Rightarrow p + p + e^-$ charged current

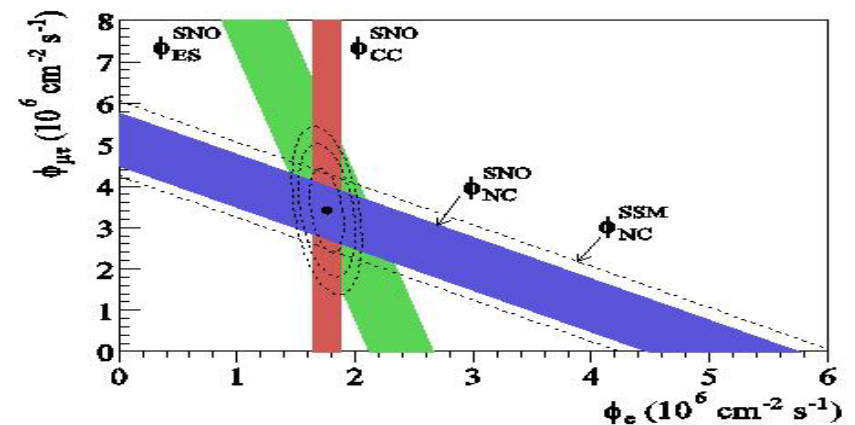
- Good measurement of ν_e energy spectrum
- Weak directional sensitivity $\propto 1 - 1/3 \cos(\theta)$
- ν_e only.

NC $\nu_x + d \Rightarrow p + n + \nu_x$ neutral current

- Equal cross section for all ν types
- Measure total ^8B ν flux from the sun.

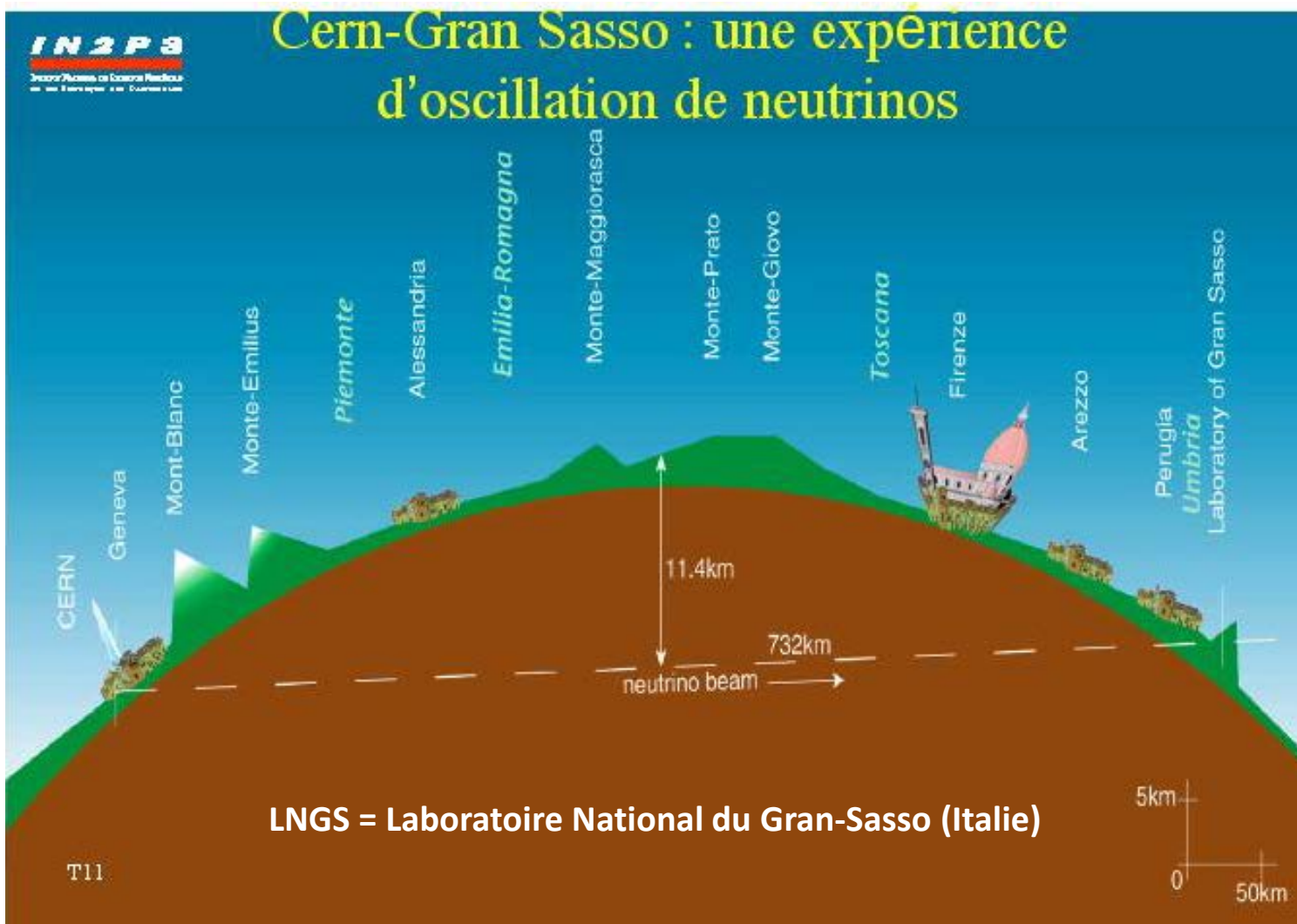
ES $\nu_x + e^- \Rightarrow \nu_x + e^-$ elastic scattering

$$\Phi_{\text{ssm}} = 5.05^{+1.01}_{-0.81} \quad \Phi_{\text{sno}} = 5.09^{+0.44+0.46}_{-0.43-0.43}$$



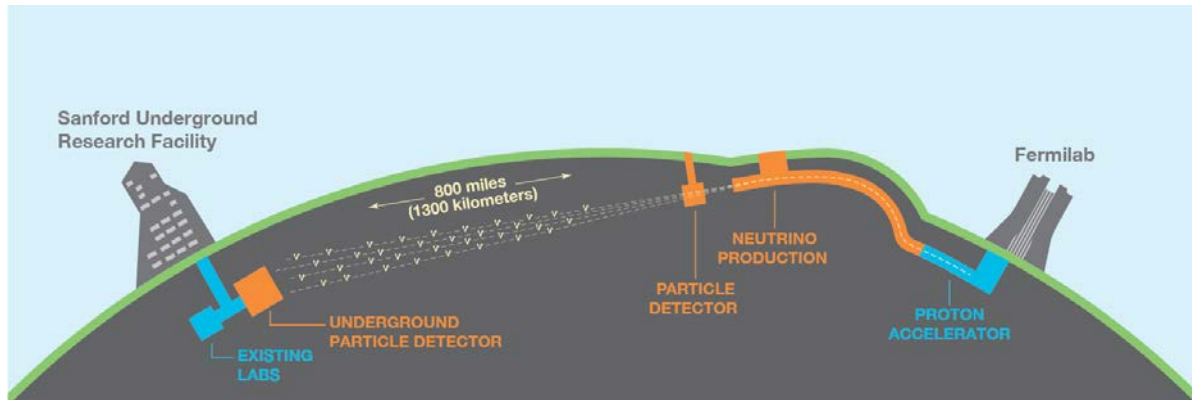
Strong evidence of flavor change

Expériences MINOS aux USA et OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus), du CERN au Gran Sasso...

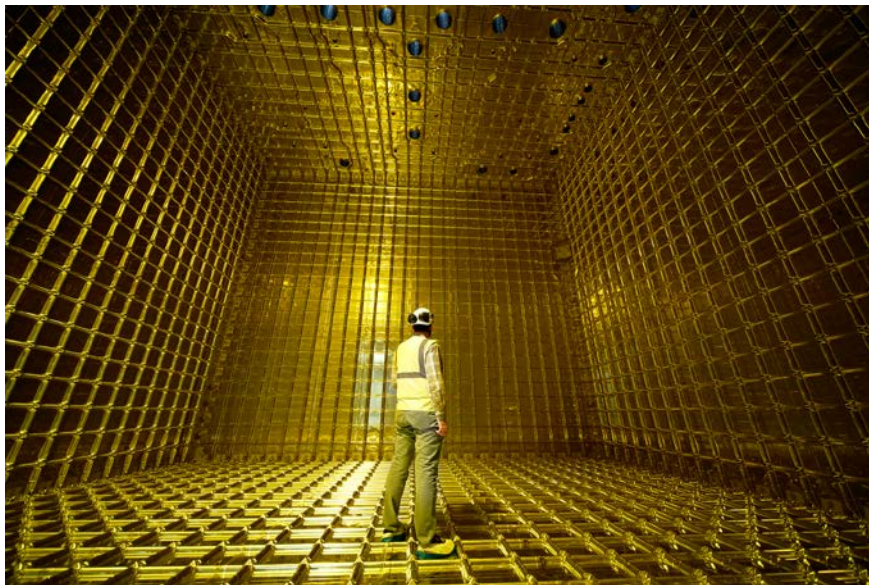


OPERA au LNGS pour détecter l'apparition des ν_τ produits par les oscillations $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ sur les 730 km de trajet CERN-Gran Sasso

DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment)



Le plus intense faisceau de neutrinos au monde.
Prototype du détecteur DUNE construit au CERN



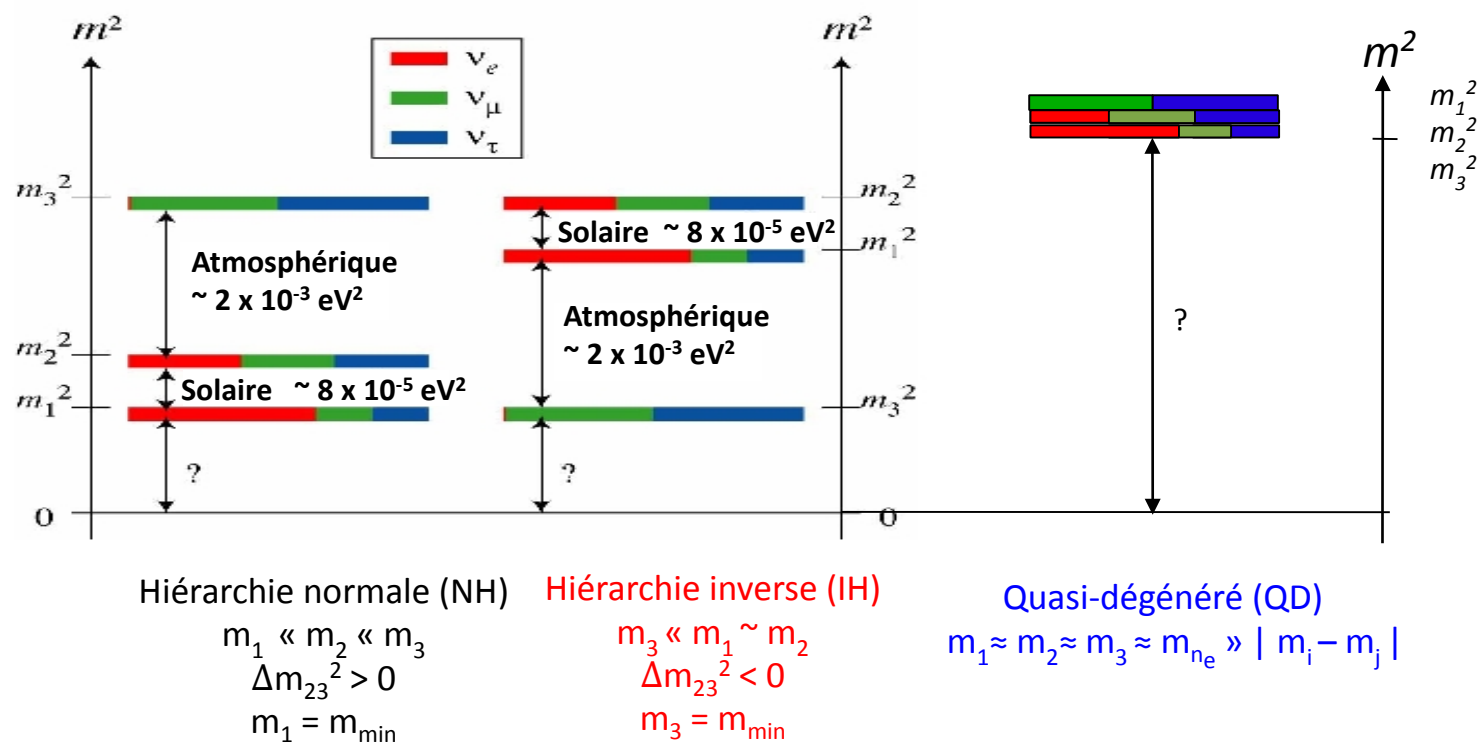
Prototype de 12 m x 12 m x 12 m
pouvant contenir 800 tonnes d'argon
liquide

Les 2 détecteurs définitifs seront 20 fois
plus grands !

<http://www.dunescience.org/>
<https://home.cern/fr/about/updates/2017/10/meet-dunes>

La matrice de mélange : les paramètres manquants

Trois hiérarchies de masse sont compatibles avec les différents résultats (notamment du fait de la non-connaissance du signe de Δm_{23}^2) : hiérarchie normale (NH), hiérarchie inverse (IH) et masses quasi-dégénérées (QD)



Résultats en faveur de neutrinos massifs

(ν solaires, ν atmosphérique, ν de réacteurs).

Oscillations observées et confirmées (SK, SNO et KamLAND)

→ donc neutrinos massifs (pas dans le modèle standard minimal)

Mais la relation entre états propres de saveur et états propres de masse n'est que partiellement connue (paramètres de la matrice de mélange des neutrinos).

Notons que les nombres leptoniques de saveur ne sont pas conservés pendant le phénomène d'oscillation.

Questions ouvertes sur les neutrinos

Les neutrinos sont-ils stables ?

Echelle de masse absolue de neutrino ?

Nature du neutrino ? (Dirac ou Majorana)

Y a-t-il violation de CP dans le secteur des neutrinos ?

(c'est-à-dire leptogénèse au lieu de baryogénèse)

Physique au-delà du MS ? (si $\beta\beta 0\nu$ alors $\Delta L = 2$)

Existe-t-il des neutrinos droits stériles (LSND) ?

Lecture pour aller plus loin : Thomson : Chap 9

