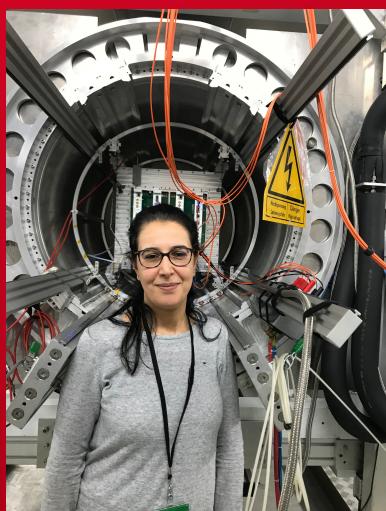


DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

LES NEUTRINOS

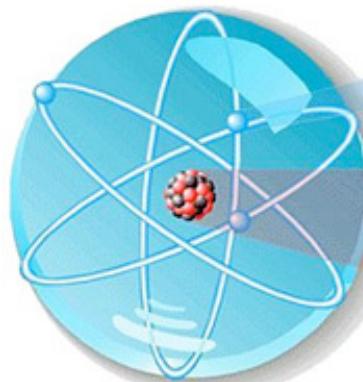
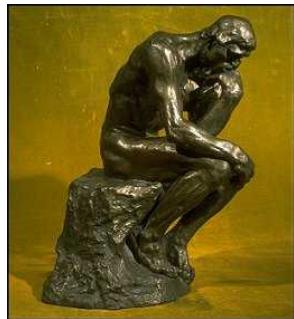
Samira Hassani

CEA-Saclay/DRF-IRFU-DPhP,
Université Paris – Saclay

21 Juillet 2022

X^{ième} Rencontres d'été de physique de
l'infiniment grand à l'infiniment petit

MATIERE ET PARTICULES



$\sim 1\text{m}$

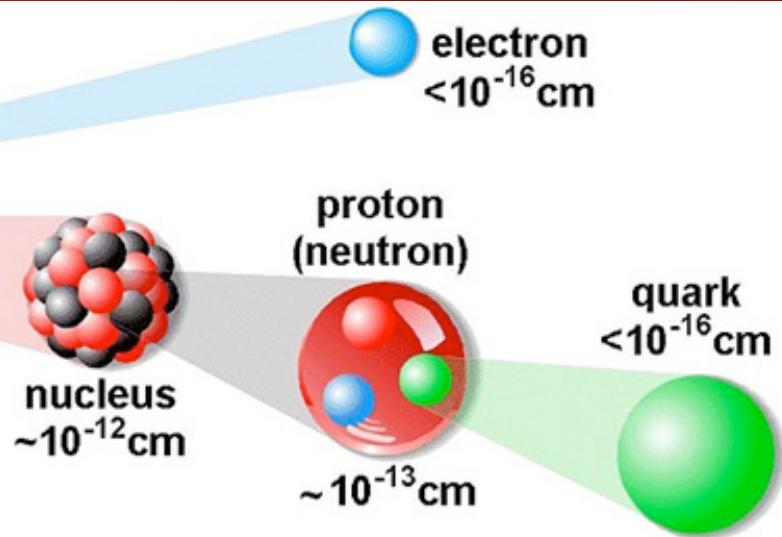
molécule $\sim 10^{-6}\text{m}$

atom $\sim 10^{-8}\text{cm}$

nucleus
 $\sim 10^{-12}\text{cm}$

proton
(neutron)

quark
 $\sim 10^{-13}\text{cm}$



LA MATIÈRE ORDINAIRE



	Fermions			Bosons	
Quarks	u up $\approx 2,3 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2	c charm $\approx 1275 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2	t top $\approx 173210 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2	g gluon 0 0 1	H boson Higgs $\approx 126000 \text{ MeV}/c^2$ 0 0 1
Léptons	d down $\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	s strange $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	b bottom $\approx 4180 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2	γ photon 0 0 1	?
neutrino électr.	ν_e neutrino électr. $< 0,0000022 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	ν_μ neutrino muon. $< 0,17 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	ν_τ neutrino tauique $< 15,5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2	Z boson Z $91200 \text{ MeV}/c^2$ 0 1	Bosons de Jauge
1ère	2ème	3ème	boson W $80400 \text{ MeV}/c^2$ ±1 1	← générations	

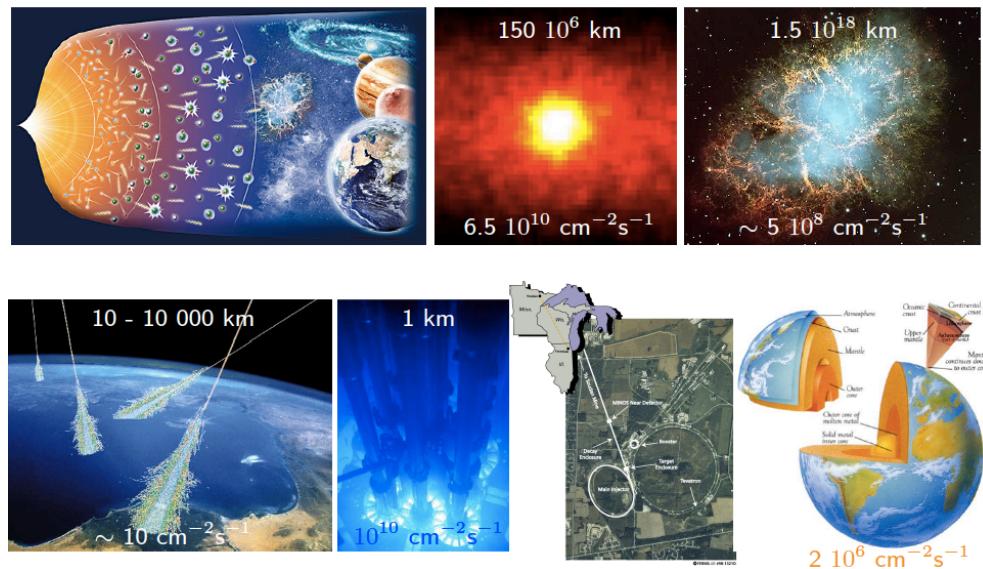
- Les électrons et les quarks u et d les constituants élémentaires de la matière (càd sans structure interne).
- Le neutrino joue un rôle important dans la transformation de la matière
- Les neutrinos sont des messagers de très grande valeur.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

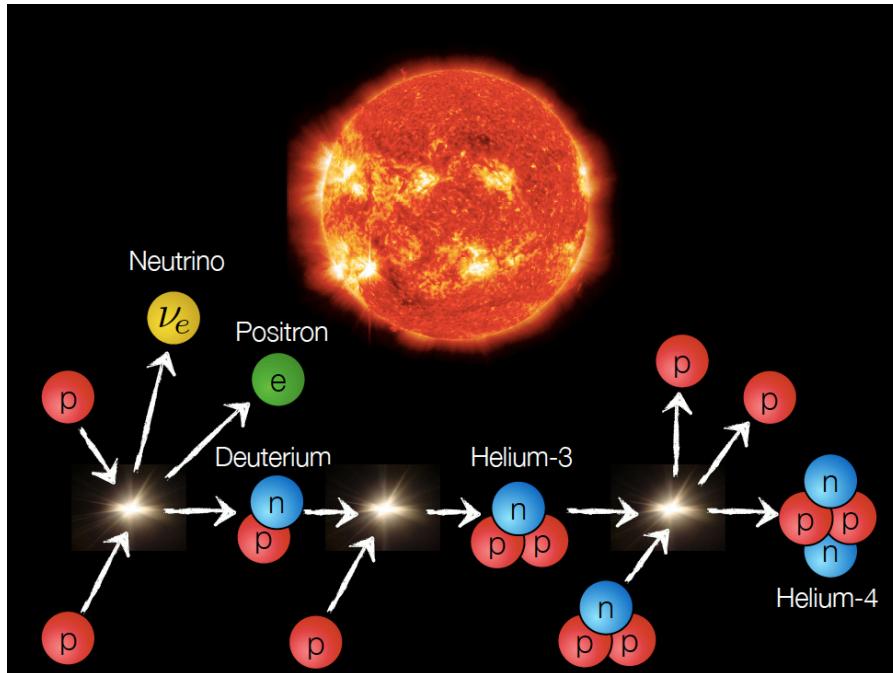


www.cea.fr

SOURCES DE NEUTRINOS



Soleil : Fusion thermonucléaire



65 milliard /cm²/sec

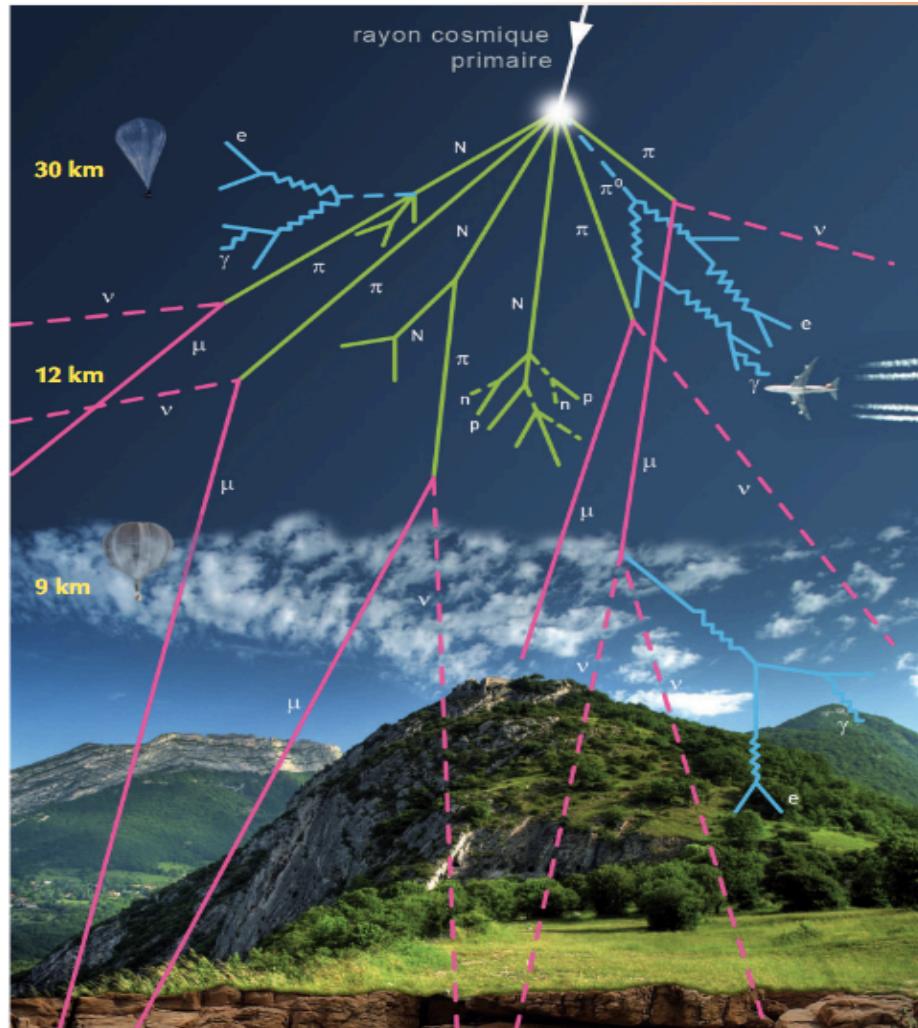
Nous sommes littéralement baignés dans les neutrinos !



LES NEUTRINOS SONT PARTOUT



Atmosphère : Cascade de rayons cosmiques

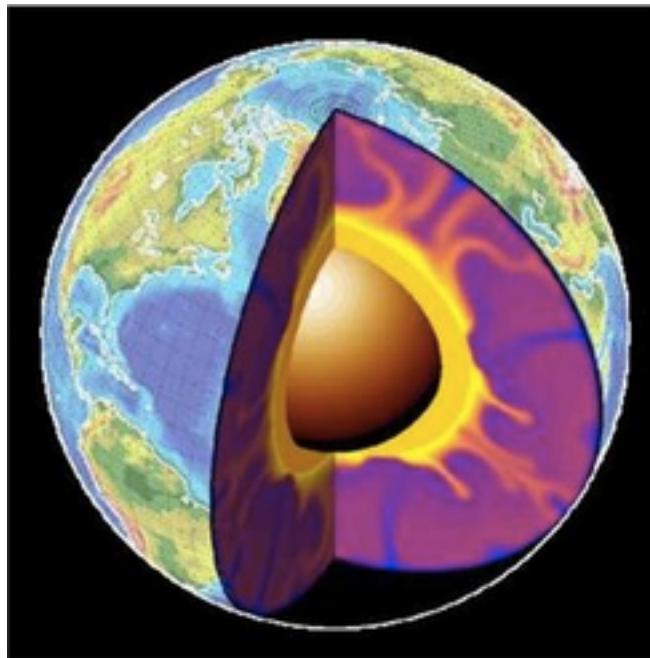


1/cm²/sec



LES NEUTRINOS SONT PARTOUT

Terre : Radioactivité naturelle (^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K)



7 millions /cm²/sec



LES NEUTRINOS SONT PARTOUT

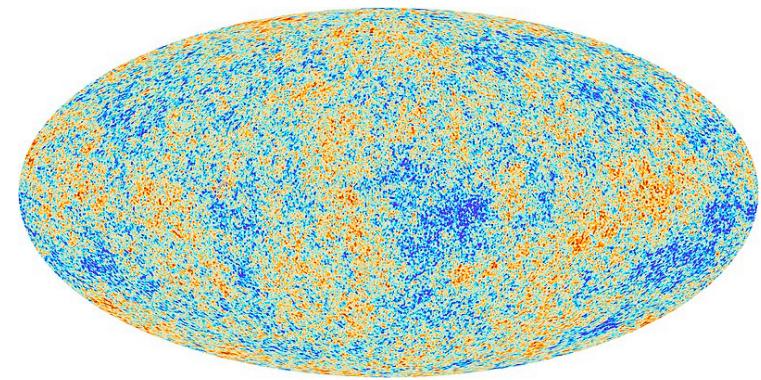


Univers:
Supernova :
(explosion d'étoiles)



SN 1987A produit 10^{58} neutrinos
(90 % de l'énergie de l'explosion)
25 détectés par 3 expériences

Neutrinos Cosmiques du Big Bang



300 /cm^3



LES NEUTRINOS PEUVENT ÊTRE PRODUITS SUR TERRE



Réacteurs Nucléaires

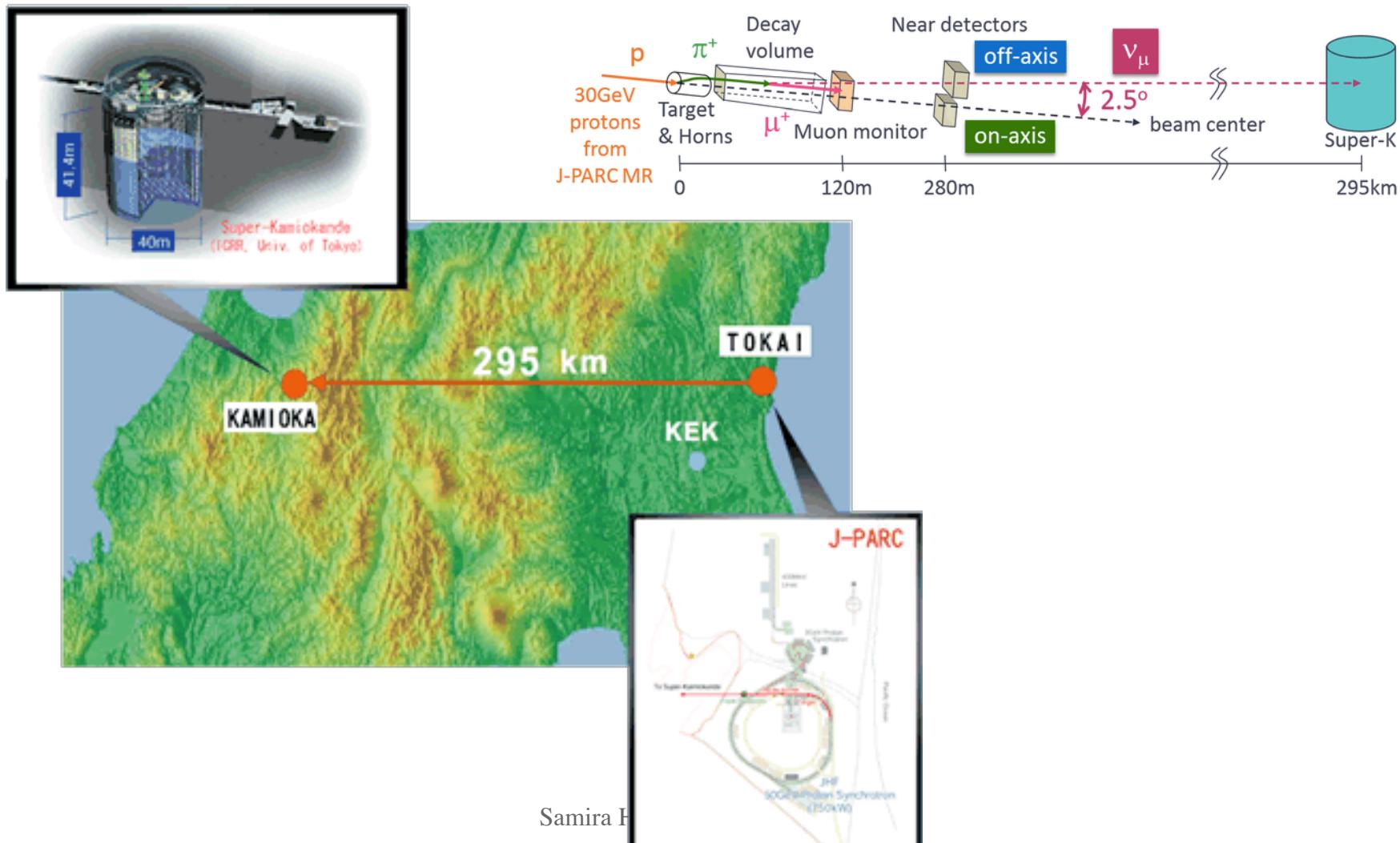


Flux 10^{13} /cm²/sec



LES NEUTRINOS PEUVENT ÊTRE PRODUITS SUR TERRE

Accélérateurs : faisceaux de particules au Japon, USA, CERN, ...

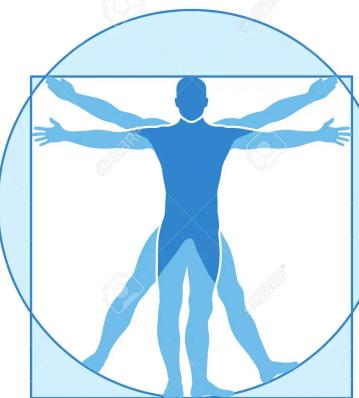


LES NEUTRINOS PEUVENT ÊTRE PRODUITS SUR TERRE



Chacun de nous est émetteur de neutrinos:

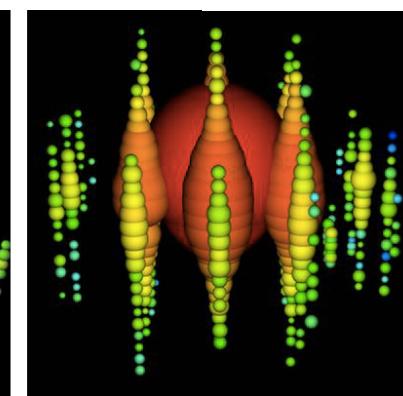
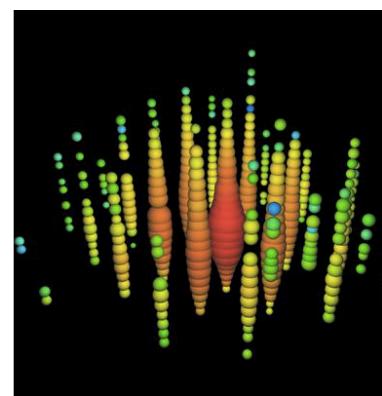
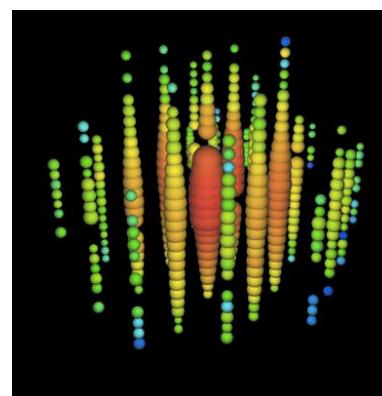
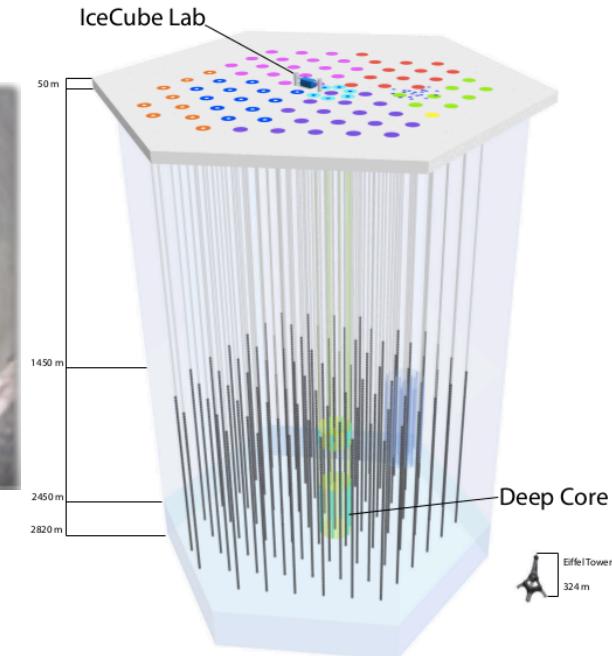
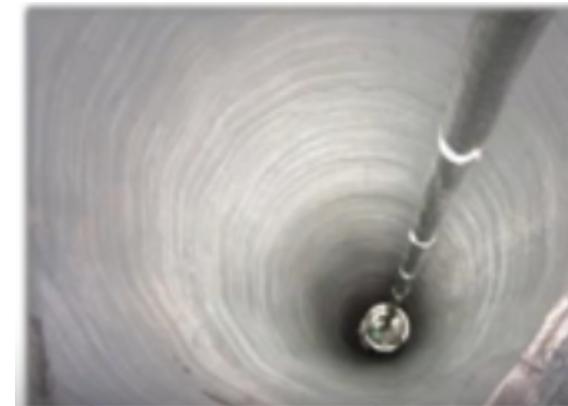
(20 mg de potassium ^{40}K radioactif dans le corps humain
4000 neutrinos /sec → 340 millions /jour)



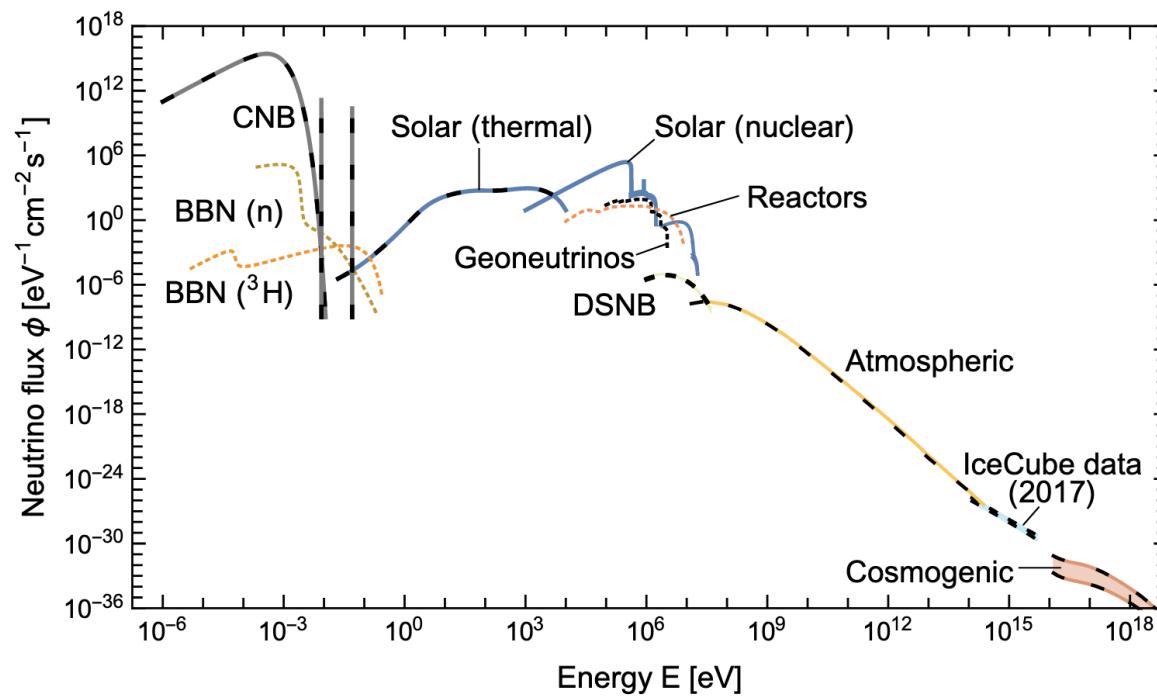
Une banane émet ≈ 10 neutrinos/ sec

Détection extra-ordinaire :

IceCube a observé des événements ν avec des énergies de PeV (10^{15} eV) !



LES ORIGINES DES NEUTRINOS



- Les énergies des neutrinos couvrent 24 ordres de grandeur
- **Différentes sources de neutrinos et différents mécanismes de production et de détection**
- Une physique des neutrinos passionnante et beaucoup de choses à apprendre !

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

HISTOIRE DES NEUTRINOS

Credit to APS

The Growing Excitement of Neutrino Physics

- ❖ 1930: On-paper appearance as “desperate” remedy by W. Pauli
- ❖ 1956: $\bar{\nu}_e$ first experimentally discovered by Reines and Cowan
- ❖ 1962: ν_μ existence confirmed by Lederman *et al.*
- ❖ 1998: Atmospheric neutrino oscillations discovered by Super-K
- ❖ 2000: ν_τ first evidence reported by DONUT experiment
- ❖ 2001: Solar neutrino oscillations detected by SNO (KamLAND 2002)
- ❖ 2011: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ transitions observed by OPERA
- ❖ 2011-13: $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ by T2K, $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$ deficit observed by Daya Bay(2012)
- ❖ 2015: Nobel prizes for ν oscillations, Breakthrough prize (2016)

Pauli predicts the Neutrino
Fermi's theory of weak interactions

Reines & Cowan discover (anti)neutrinos

2 distinct flavors identified
Davis discovers the solar deficit

Nobel & Breakthrough for ν oscillations
T2K observe $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ appearance
Daya Bay observe theta 13 at 5 sigma
K2K confirms atmospheric oscillations
KamLAND confirms solar oscillations
Nobel Prize for neutrino astroparticle physics!
SNO shows solar oscillation to active flavor
Super K confirms solar deficit and “images” sun
Super K sees evidence of atmospheric neutrino oscillations
Nobel Prize for ν discovery
LSND sees possible indication of oscillation signal
Nobel Prize for discovery of distinct flavors!
Kamioka II and IMB see supernova neutrinos
Kamioka II and IMB see atmospheric neutrino anomaly
SAGE and Gallex see the solar deficit
LEP shows 3 active flavors
Kamioka II confirms solar deficit

1930

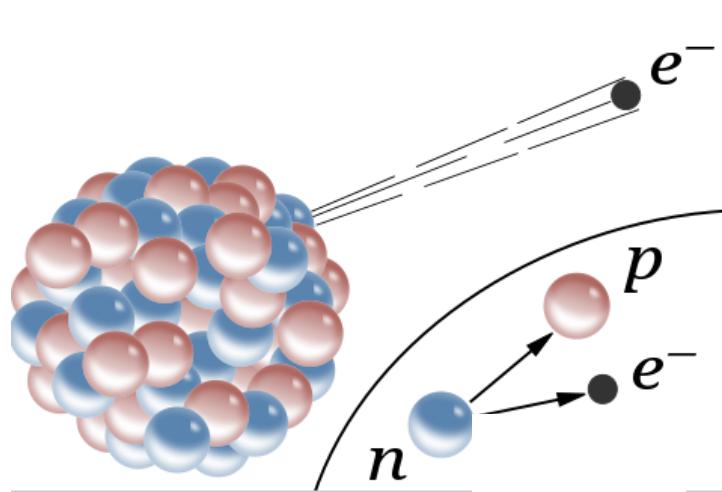
1955

1980

2015

L'HISTOIRE DES NEUTRINOS

1911-1914 : La radioactivité β présente une anomalie !



Principe de conservation de l'énergie :

$$E_{\text{electron}} = (M_N - M_{N'}) \times c^2 = Q = \text{constante}$$

L'HISTOIRE DES NEUTRINOS

1911-1914: La radioactivité β présente une anomalie !



L. Meitner & O. Hahn (1911) observent que le spectre en énergie de l'électron est continu (confirmé par Chadwick en 1914)



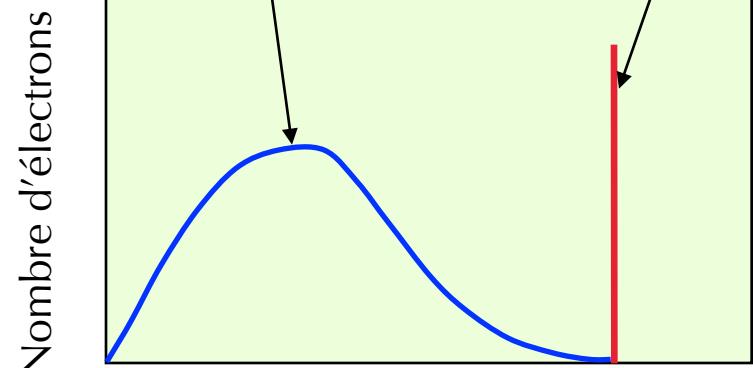
L. Meitner & O. Hahn
(Nobel 1944 à Hahn seul!!)



Chadwick
(Nobel 1935)

ce qui **DEVRAIT**
être observé !!!

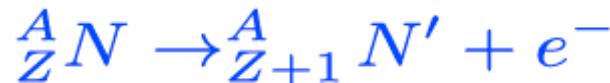
ce qui est observé



L'HISTOIRE DES NEUTRINOS



Avant 1930 : La radioactivité β présente une anomalie !



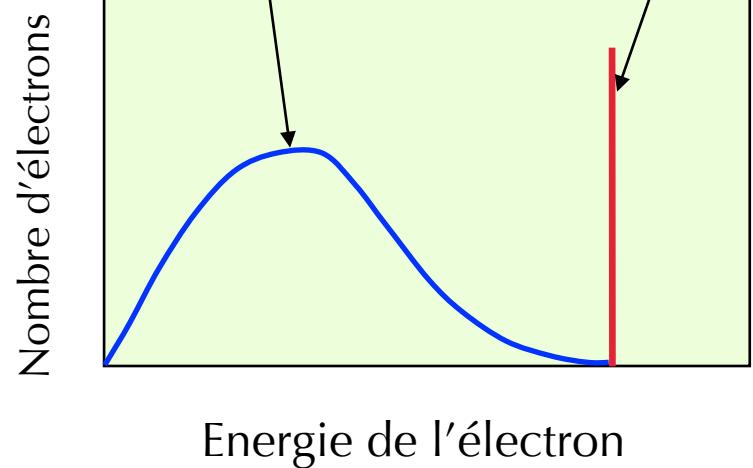
L. Meitner & O. Hahn (1911) observent que le spectre en énergie de l'électron est continu (confirmé par Chadwick en 1914)

Violation du principe de la conservation de l'énergie?! Autre raison ?

"At the present stage of atomic theory, however, we may say that we have no argument, either empirical or theoretical, for upholding the energy principle in the case of β -ray disintegrations". Niels Bohr

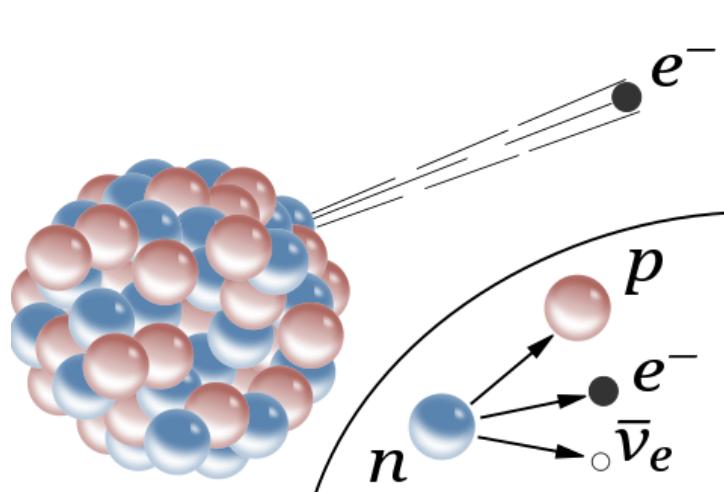
ce qui **DEVRAIT**
être observé !!!

ce qui est observé



L'HISTOIRE DES NEUTRINOS

Décembre 1930 : Une idée géniale de Wolfgang Pauli



Wolfgang Pauli
(Nobel 1945)

Il existe une particule inconnue
qui emporte l'énergie manquante !

Décembre 1930 : Pauli invente le neutrino ! « remède désespéré » !

4th December, 1930,

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, how because of the "wrong" statistics of the N and Li⁶ nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a **desperate remedy** to save the "exchange theorem" of statistics and the **law of conservation of energy**. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons, which have spin 1/2 and obey the **exclusion principle** and which further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the **same order of magnitude as the electron mass** and in any event not larger than 0.01 proton masses. The continuous beta spectrum would then become understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant...

I agree that my remedy could seem **incredible because one should have seen these neutrons much earlier if they really exist**. But only the one who dare can win and the difficult situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is lighted by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's well better not to think about this at all, like new taxes". From now on, every solution to the issue must be discussed. Thus, dear radioactive people, look and judge.

Unfortunately, I cannot appear in Tübingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant,

W. Pauli

Décembre 1930 : Pauli invente le neutrino !

4th December, 1930,

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, how because of the "wrong" statistics of the N and Li⁶ nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons, which have spin 1/2 and obey the exclusion principle and which further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton masses. The continuous beta spectrum would then become understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant...

I agree that my remedy could seem incredible because one should have seen these neutrons much earlier if they really exist. But only the one who dare can win and the difficult situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is lighted by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's well better not to think about this at all, like new taxes". From now on, every solution to the issue must be discussed. Thus, dear radioactive people, look and judge.

Unfortunately, I cannot appear in Tübingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant,

W. Pauli

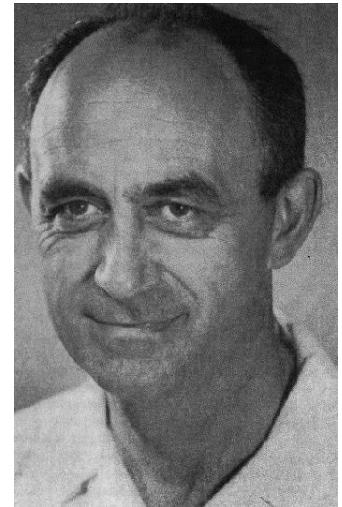
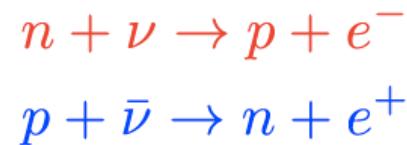
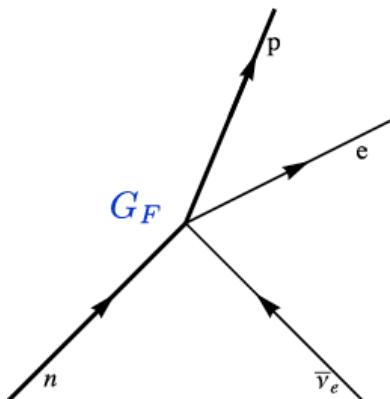
Pauli a dit à son ami Walter Baade:

"Today I have done something which no theoretical physicist should ever do in his life: I have predicted something which shall never be detected experimentally!"

L'HISTOIRE DES NEUTRINOS



1933 : Théorie de la désintégration β



Enrico Fermi
(Nobel 1945)

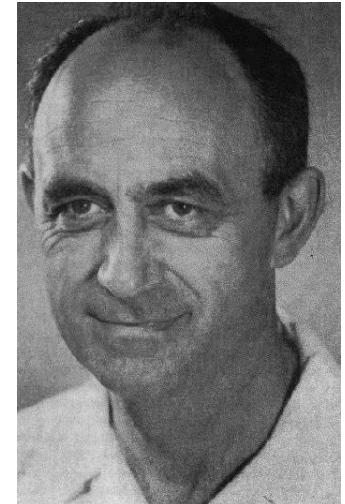
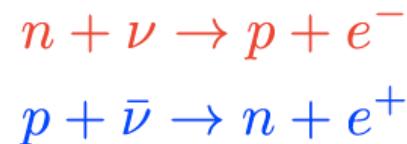
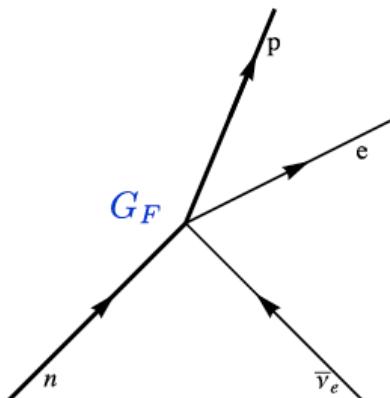
La revue Nature n'a pas publié son article :

"contained speculations too remote from reality to be of interest to the reader....."

L'HISTOIRE DES NEUTRINOS



1933 : Théorie de la désintégration β



Enrico Fermi
(Nobel 1945)



Bethe and Peierls
(Bethe, Nobel 1967)

1934 : Bethe and Peierls

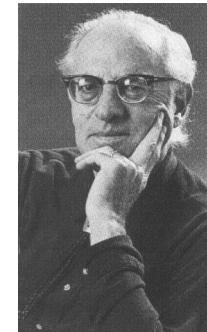
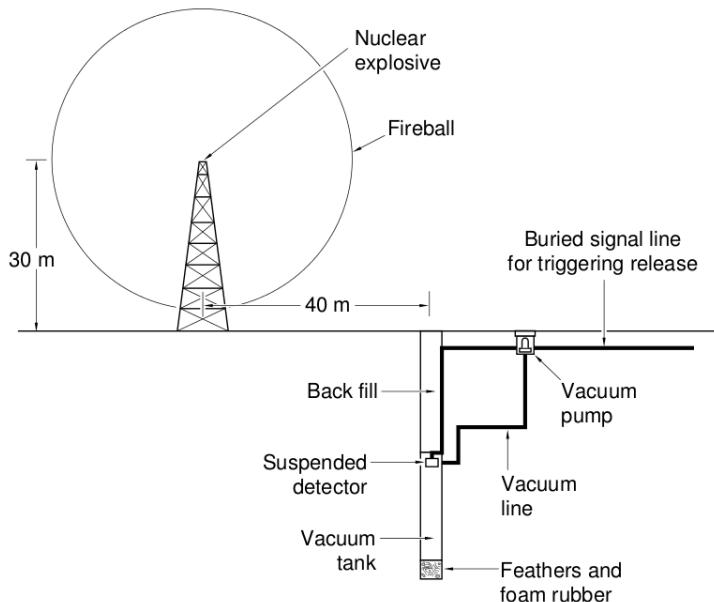
- Prédisent sa probabilité d'interagir: $\sigma_{\nu p} \approx 10^{-44} \text{ cm}^2$ ($E_\nu = 2 \text{ MeV}$) à comparer à $\sigma_{\gamma p} \approx 10^{-25} \text{ cm}^2$
- La longueur de parcours moyen d'un neutrino avant d'interagir est d'environ 1.6 année lumière de plomb = 10^5 fois la distance Terre-Soleil.
- Concluent : "...there is no practically possible way of observing the neutrino"

DÉTECTION DES NEUTRINOS



1956 : Première détection des neutrinos par Reines & Cowan

Projet Poltergeist (1951) à Los Alamos



Reines
(Nobel 1995)



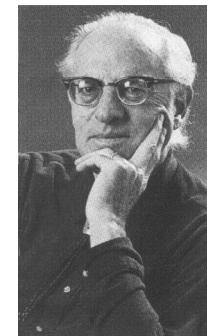
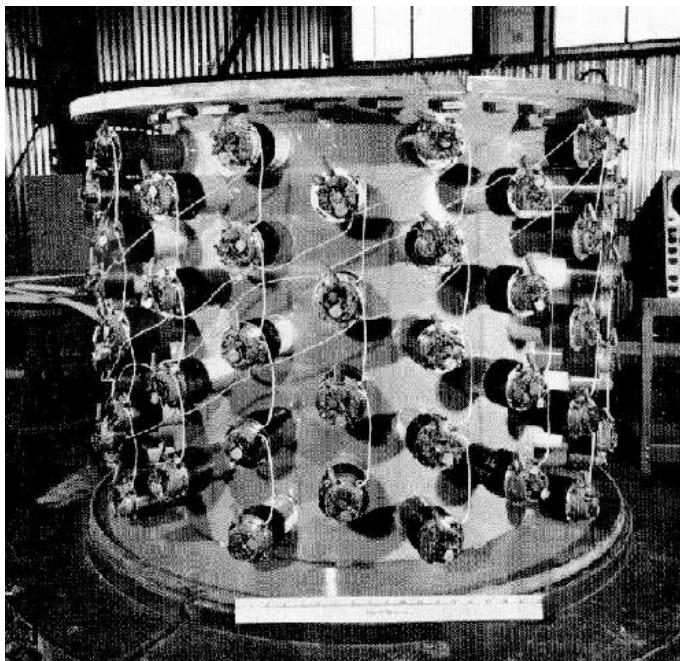
Cowan
(est mort avant)

Idée initiale : Utiliser un détecteur de plusieurs tonnes suspendu dans le vide qui devait être lâché au moment de l'explosion pour s'affranchir des ondes sismiques

DÉTECTION DES NEUTRINOS



1956 : Première détection des neutrinos par Reines & Cowan



Reines
(Nobel 1995)



Cowan
(est mort avant)

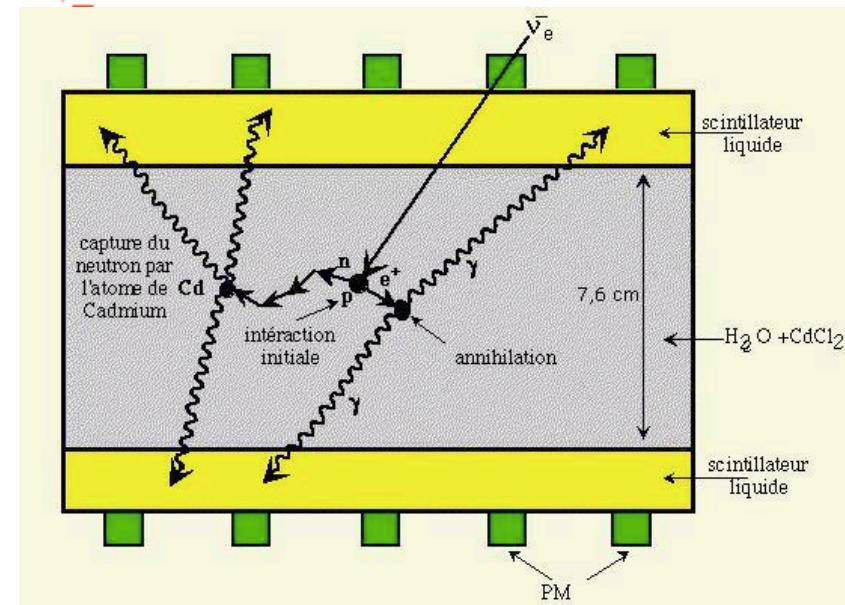
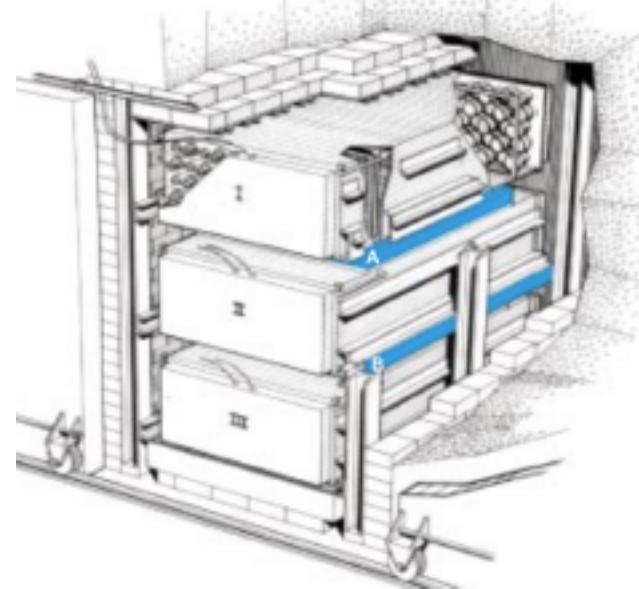
Deuxième idée : auprès d'un réacteur nucléaire.
Non concluant en 1953 à Hanford

1956 : Première détection des neutrinos par Reines & Cowan

Finalement : réacteur nucléaire de Savannah River (USA)



$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$



- 400 L d'un mélange d'eau et de chlorure de cadmium ($CdCl_2$)
- Détection des 5 γ
- Sur $5 \times 10^{13} / s/cm^2$ $\bar{\nu}_e$ émis par le réacteur → seulement 3 événements/h détectés
- Versions modernes de l'expérience Reines&Cowan : Chooz, Dchooz, Daya Bay, RENO font encore des découvertes aujourd'hui.

SBZ1311 ZHV UW1844 FM BZJ116 WH CHICAGOILL 56 14 1310

PLC 002533 r

Erhalten - Reçu

„VIA RADIOSUISSE“

Befördert - Transmis

von - da
NEWYORK

Stunde - Heute

NAME - NOM

Stunde - A

Stunde - Heute

NAME - NOM

Brieftelegramm

74 15 No. VI. 56 -1 10

LT

PROFESSOR W PAULI

Per Post

ZURICH UNIVERSITY ZURICH

(1)

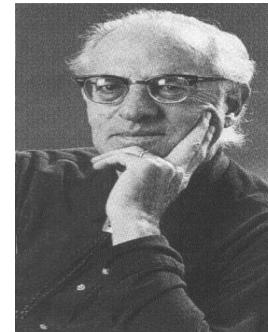
NACHLASS
PROF. W. PAULI

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED
 NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY
 OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX
 TIMES TEN TO NINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS

FREDERICK REINES AND CLYDE COWAN
 BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

Nr. 20 4300 X 100 3/34

*Frederick REINES and Clyde COWAN
 Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico
 Thanks for message. Everything comes to
 him who knows how to wait.*

Pauli

Reines
(Nobel 1995)



Cowan
(est mort avant)



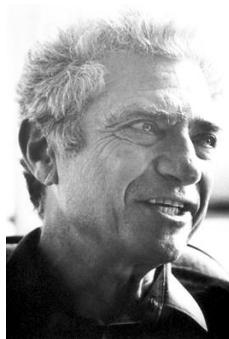
Wolfgang Pauli
(Nobel 1945)

DÉTECTION DES NEUTRINOS



1962 : Découverte du ν_μ

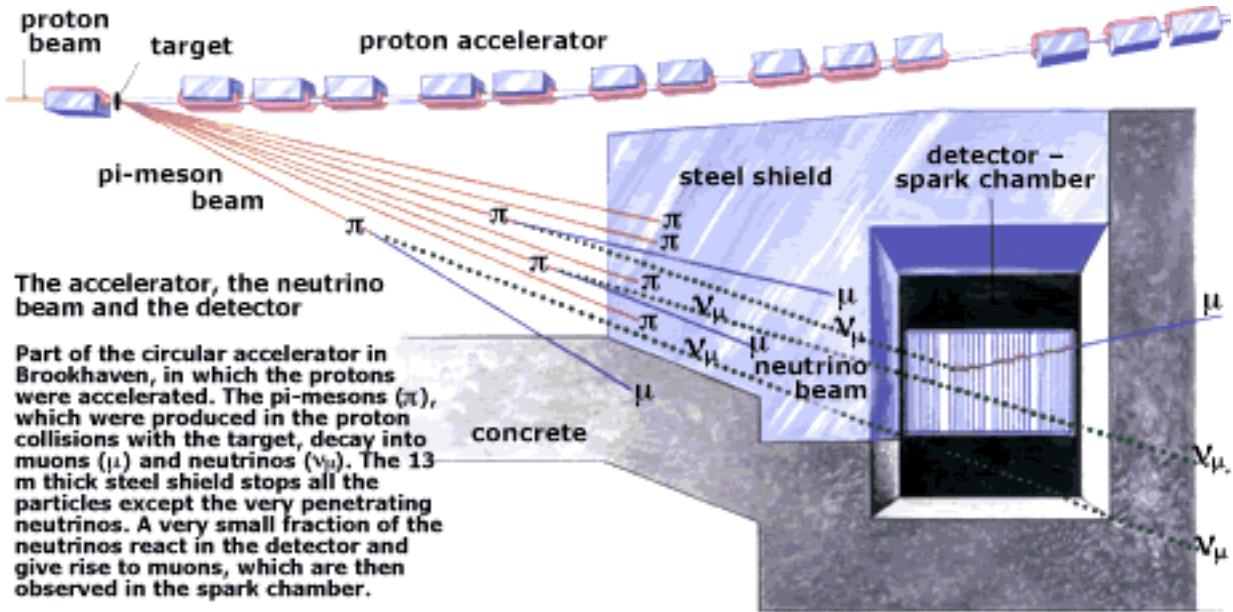
$$\left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu \end{array} \right)$$



Lederman

Schwartz
(Nobel 1988)

Steinberger



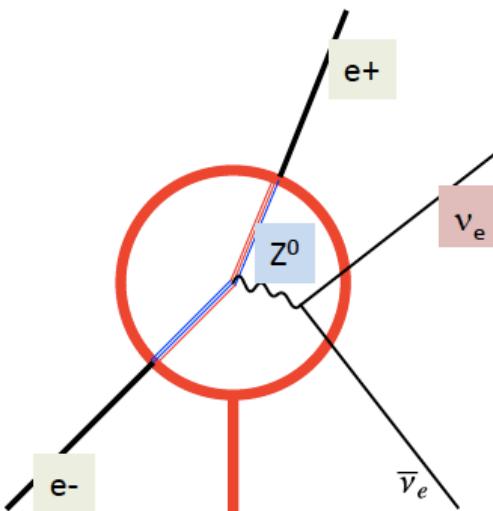
Based on a drawing in Scientific American,
March 1963.

Les versions modernes de l'expérience de Lederman, Schwartz et Steinberger sont des accélérateurs. Expériences sur les neutrinos : Minos, Opera, T2K, NovA,...

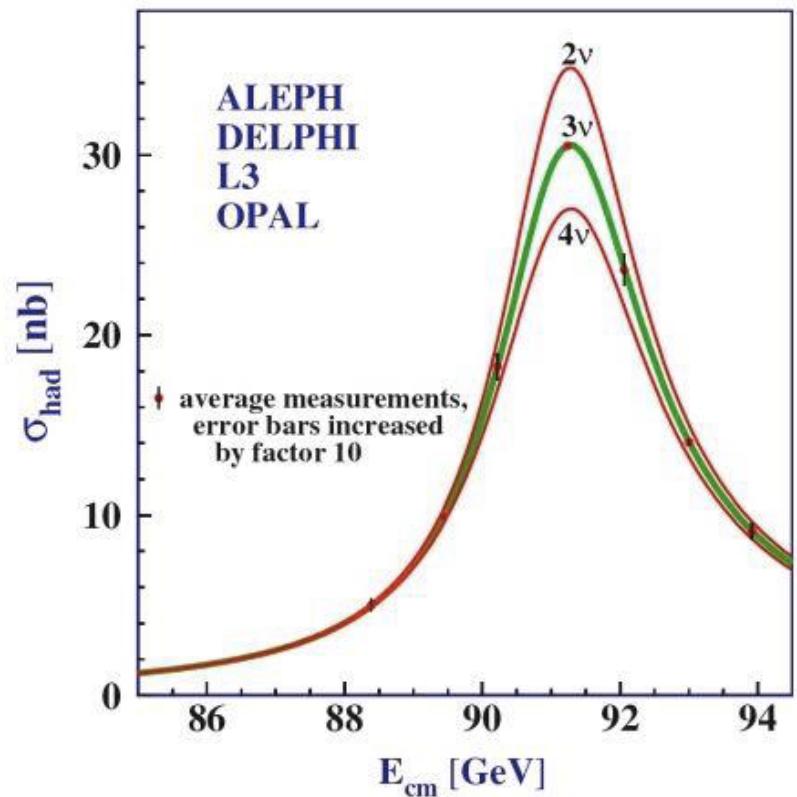
DÉTECTION DES NEUTRINOS

1990 : CERN - Le LEP démontre qu'il existe 3 (et 3 seulement) familles de ν

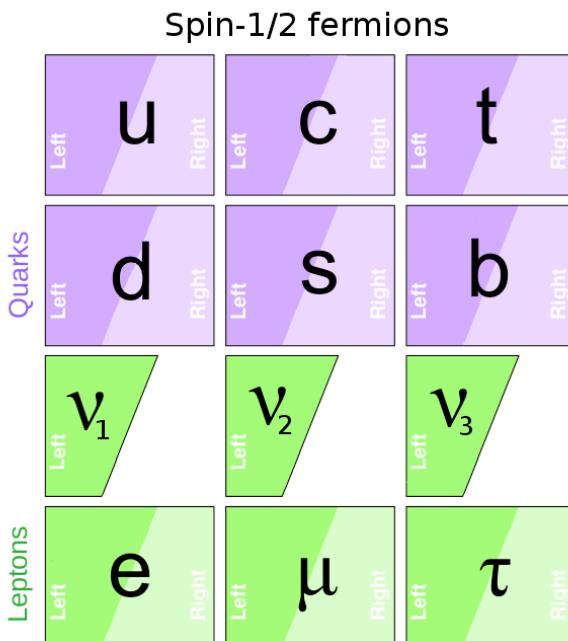
$$e^+ e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow f\bar{f}$$

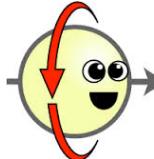


$$N_\nu = \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{\Gamma_{\nu\bar{\nu}}} = 2.984 \pm 0.008$$



2000 : Fermilab – Mise en évidence du ν_τ par l'expérience DONUT



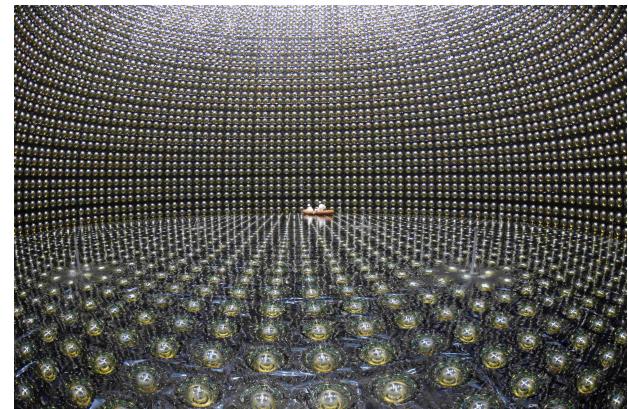
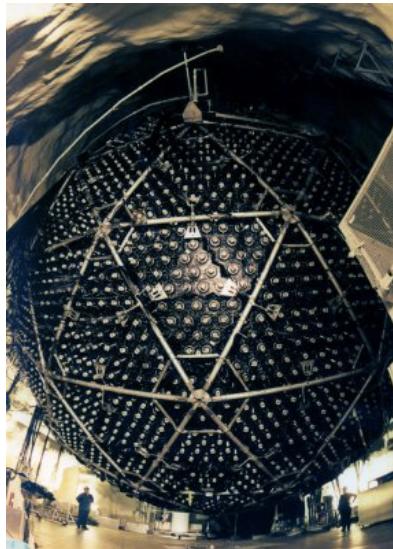
- Les neutrinos font partie des doublets de l'interaction faible.
- Interagissent via les bosons W et Z → **faible probabilité d'interaction.**
- Les neutrinos sont des leptons **neutres**
- Un seul état d'hélicité (**gauche**)
- Dans le Modèle Standard, les neutrinos sont **sans masse**
- **3 générations** de neutrinos et leurs leptons correspondants
- **3 types de neutrinos** : ν_e , ν_μ , ν_τ "saveur" du neutrino

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



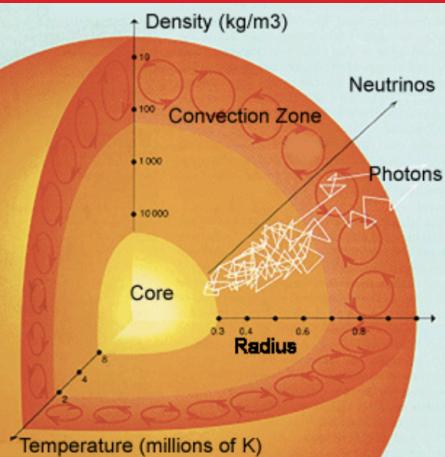
www.cea.fr

DETECTION DES NEUTRINOS



Une succession d'anomalies et de surprises

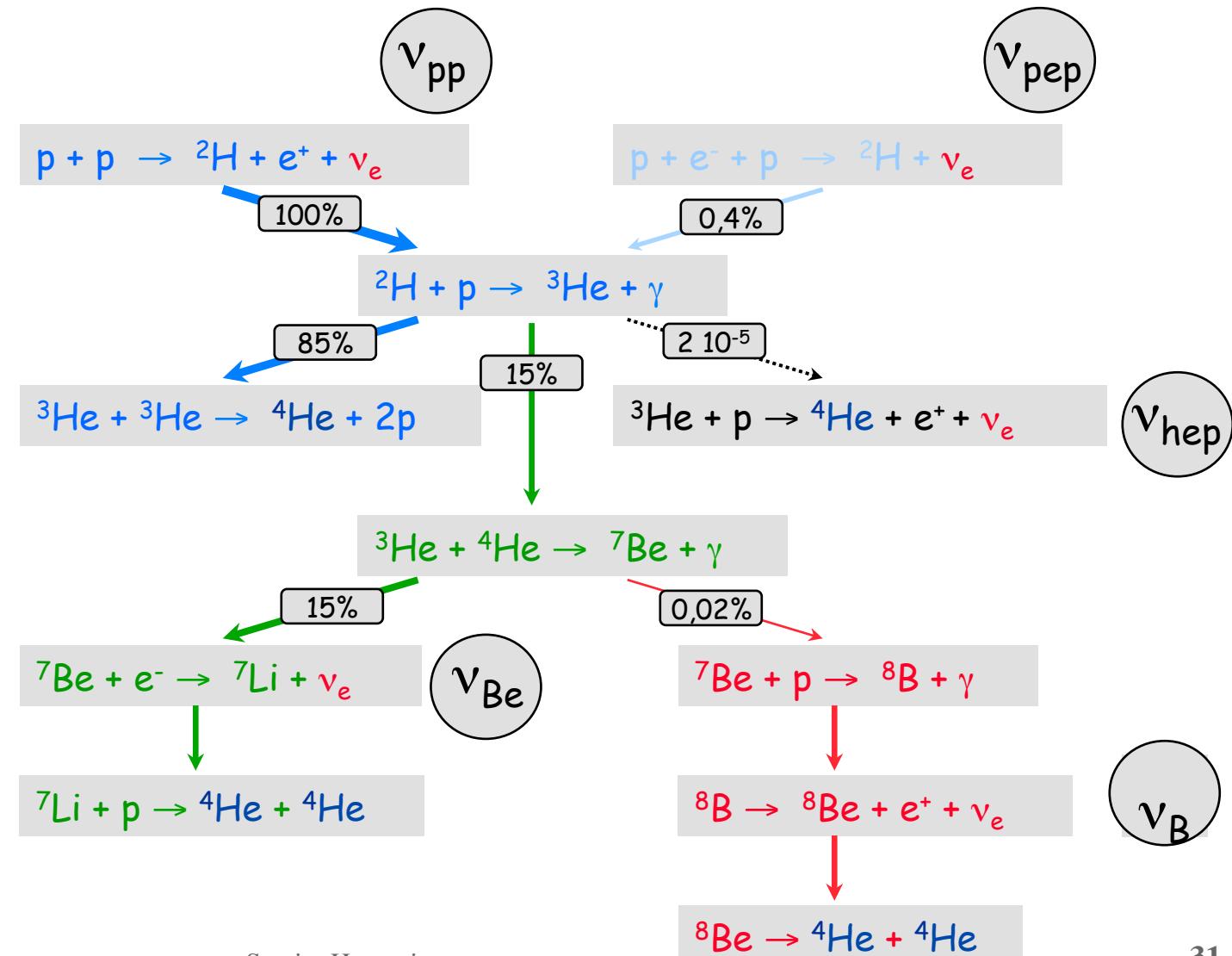
PROBLEME DES NEUTRINOS SOLAIRES



Composition :

- 73% hydrogène (H)
- 25% hélium (He)
- 2% autres éléments

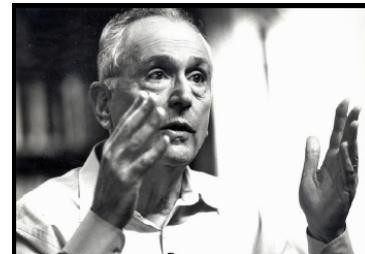
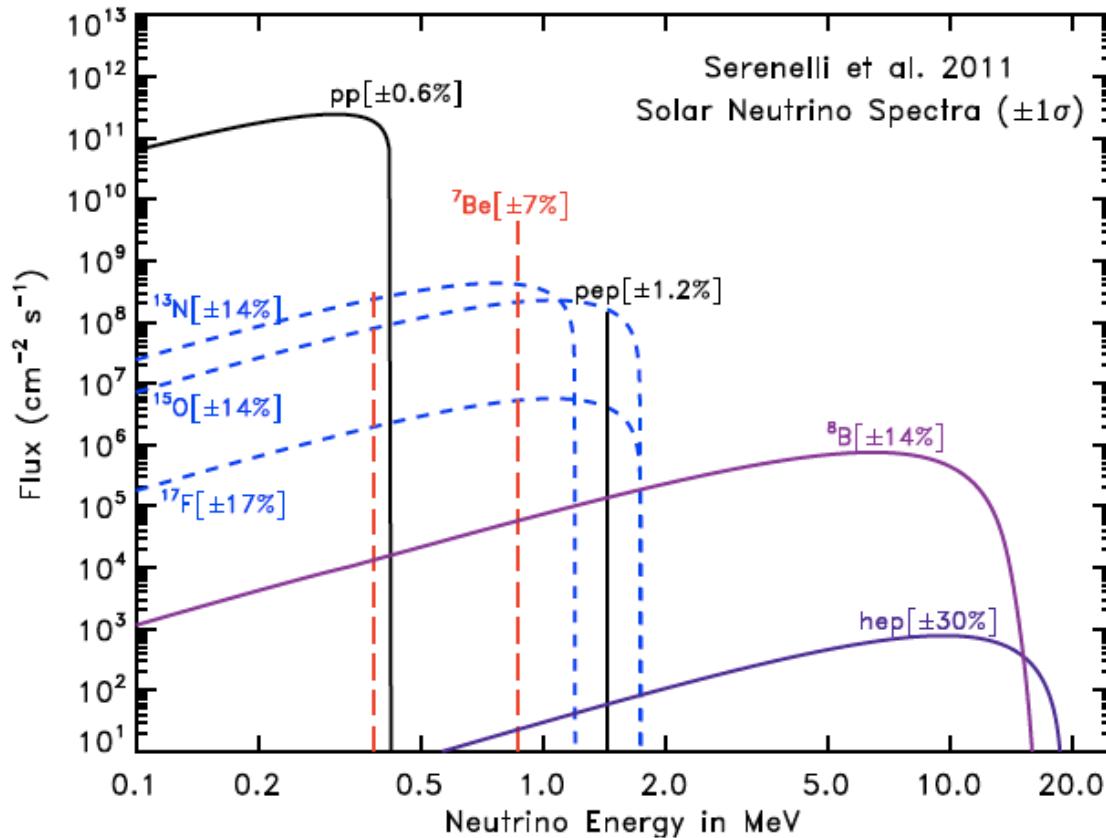
Réactions nucléaires dans le Soleil



PROBLEME DES NEUTRINOS SOLAIRES



1960 : J. Bahcall prédit le spectre en énergie des neutrinos solaires



J. Bahcall

PROBLEME DES NEUTRINOS SOLAIRES



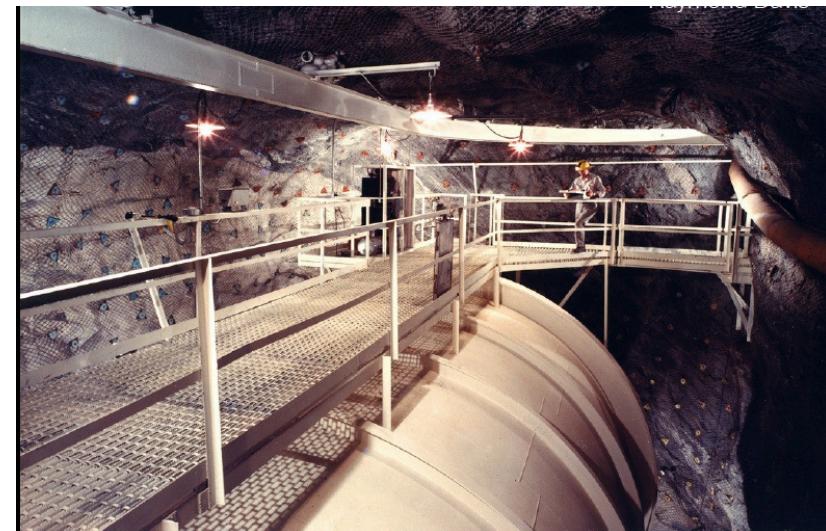
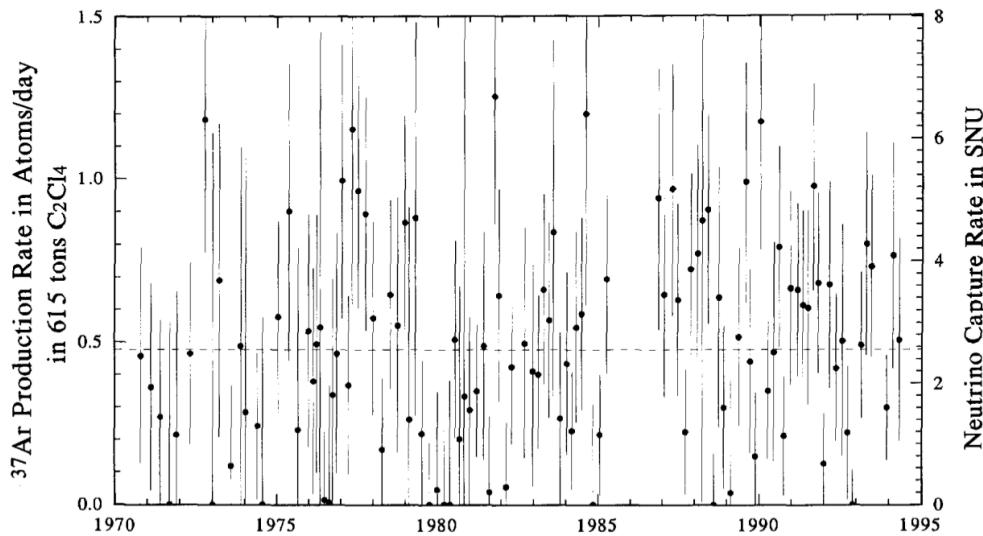
1960 : R. Davis construit l'expérience Chlorine dans une mine à Homestake

400,000 L de perchloroéthylène C_2Cl_4
 $\nu_e + ^{37}Cl \rightarrow ^{37}Ar + e^-$ (seuil 814 keV)
Collecter l'Ar pour obtenir le flux de neutrinos
1 ν_e / jour seulement transmute le chlore en argon



Raymond Davis
Nobel 2002

25 ans de Prise de données



Résultat : 2.56 ± 0.20 SNU

Modèle Solaire (7.6 ± 1.2 SNU)

Surprise : Seulement 1/3 des neutrinos solaires prédis par Bahcall sont détectés !?
Déficit confirmé par plusieurs expériences.

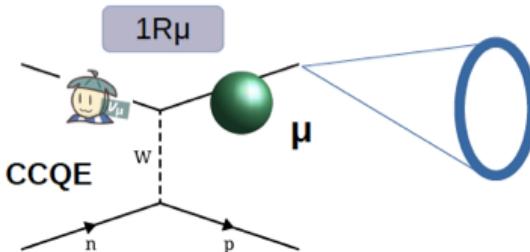
(Solar Neutrino Unit: 1 SNU = 10^{-36} capture/target atom/s)

ENIGME DES NEUTRINOS ATMOSPHERIQUES



1998 : SuperKamiokande a détecté un déficit de neutrinos atmosphériques

- Réservoir d'eau de 50 kton (40m x 40m)
- Détecteur intérieur ~11 000 photo-multiplicateurs (PMT)
- Détecteur extérieur ~1 800 PMTs veto cosmiques



Cherenkov light

Neutrino

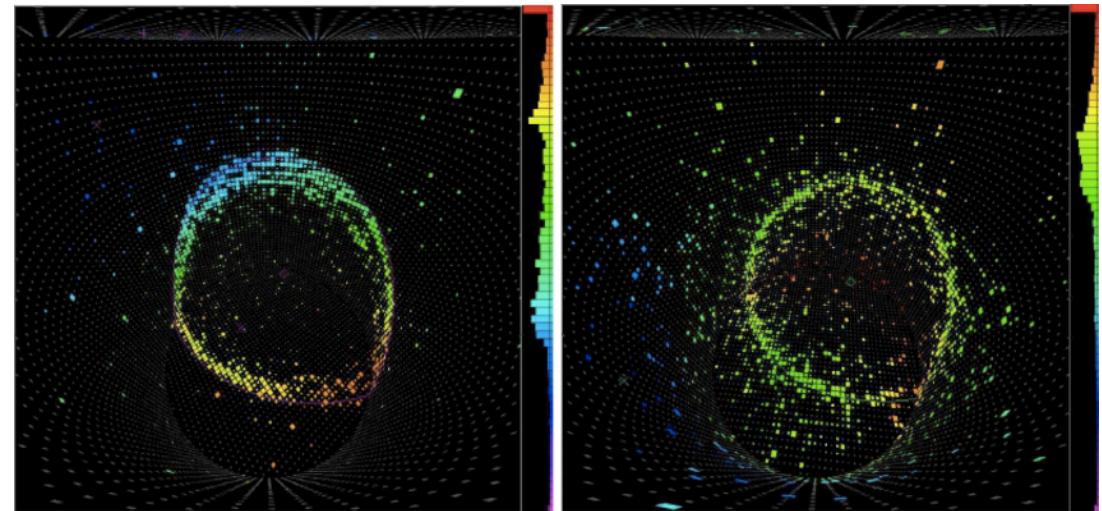
Charged particle in water

Photosensors

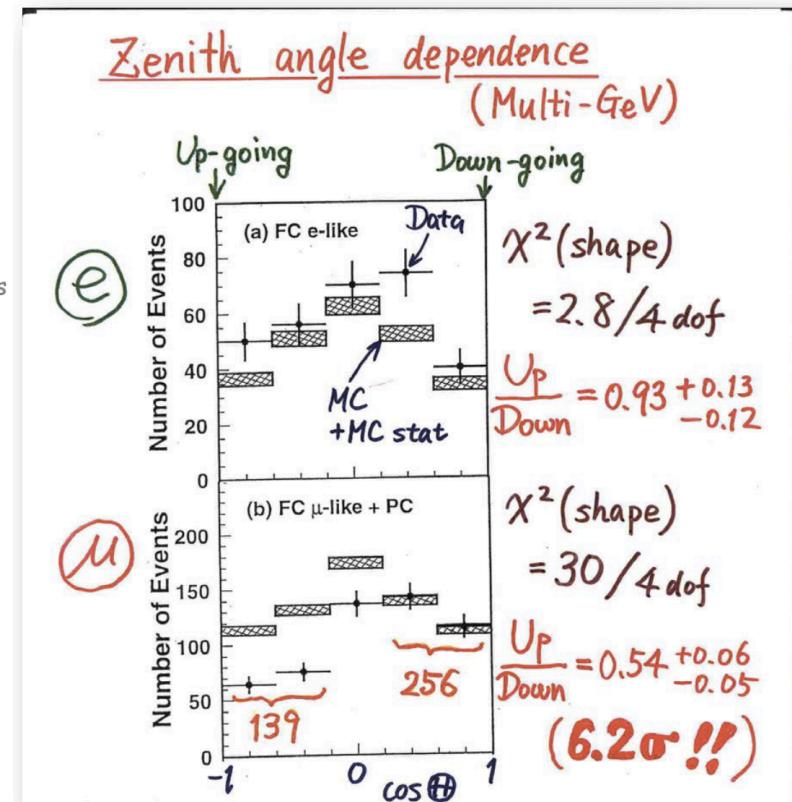
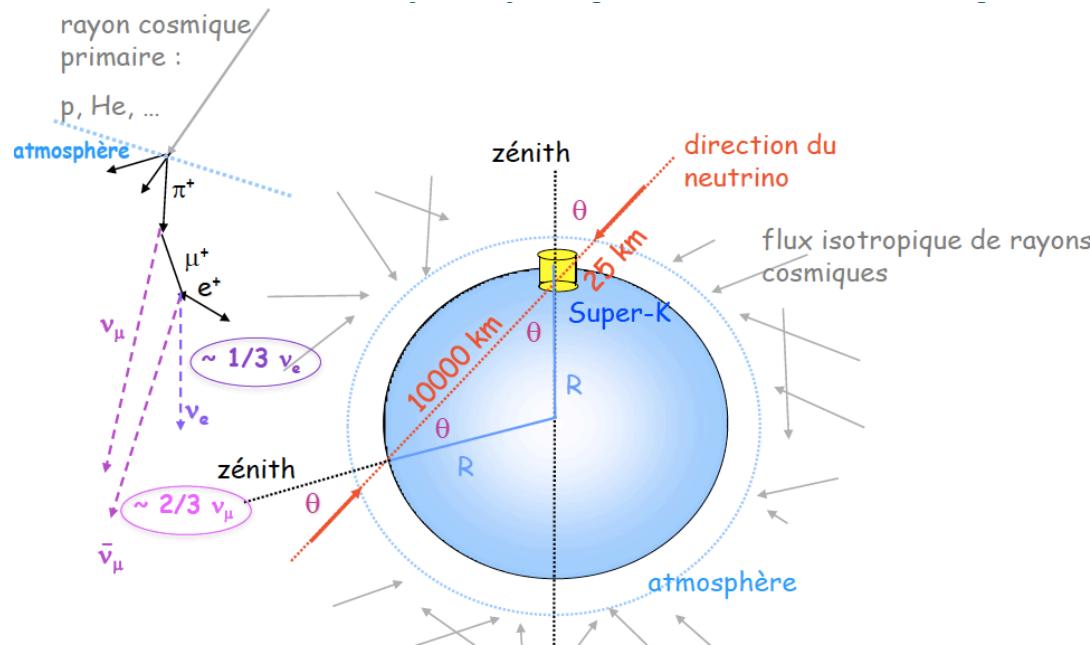


Muon-like ring (sharp)

Electron-like ring (fuzzy)



1998 : SuperKamiokande a détecté un déficit de neutrinos atmosphériques

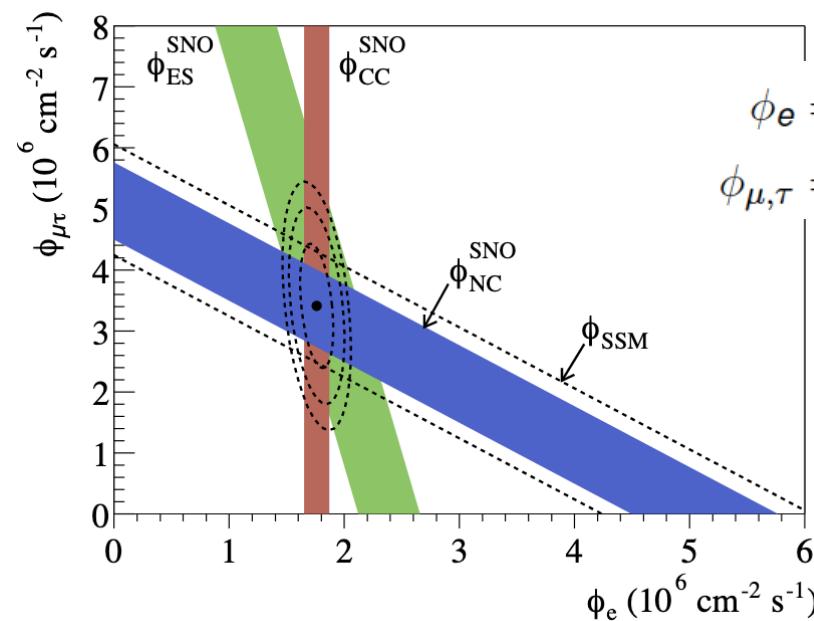
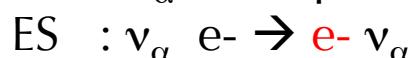


- SuperKamiokande peut détecter des ν_e et ν_μ
- Les neutrinos ν_μ semblent disparaître en traversant la terre mais pas les ν_e



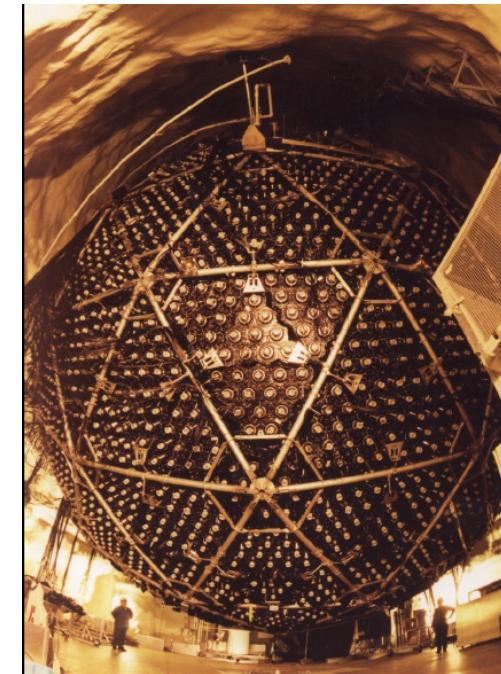
2002 : SNO résout le problème des neutrinos solaires

L'utilisation de 1 kt d'eau lourde D₂O permet
3 réactions en fonction de la saveur



$$\phi_e = 1.76^{+0.05}_{-0.05} (\text{stat})^{+0.09}_{-0.09} (\text{syst})$$

$$\phi_{\mu,\tau} = 3.41^{+0.45}_{-0.45} (\text{stat})^{+0.48}_{-0.44} (\text{syst})$$



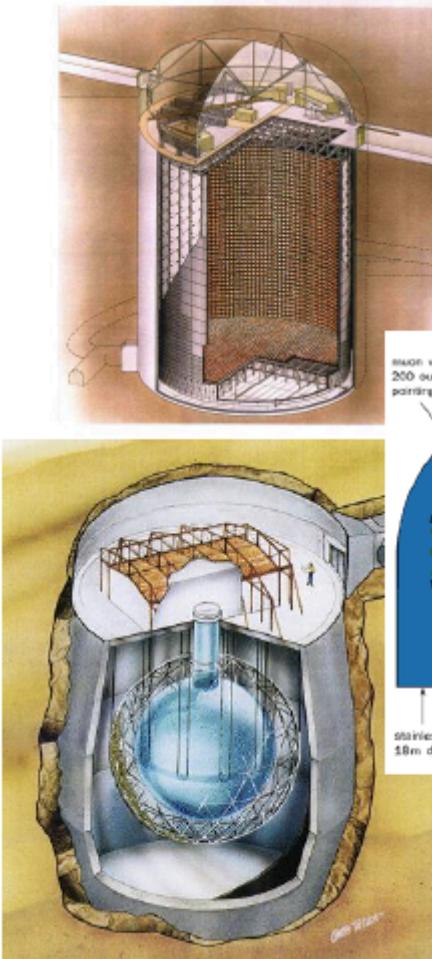
Sudbury Neutrino Observatory (Canada)

- Tous les neutrinos provenant du soleil arrivent mais tous ne sont pas des ν_e !
- Deux tiers des neutrinos ν_e produits dans le soleil se transforment en autre saveur avant d'atteindre le détecteur

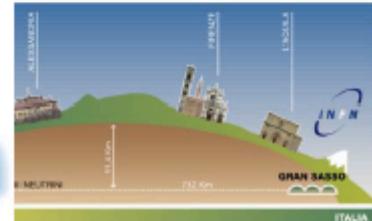
ET BEAUCOUP D'AUTRES EXPÉRIENCES ET DE RÉSULTATS....



SuperKamiokande



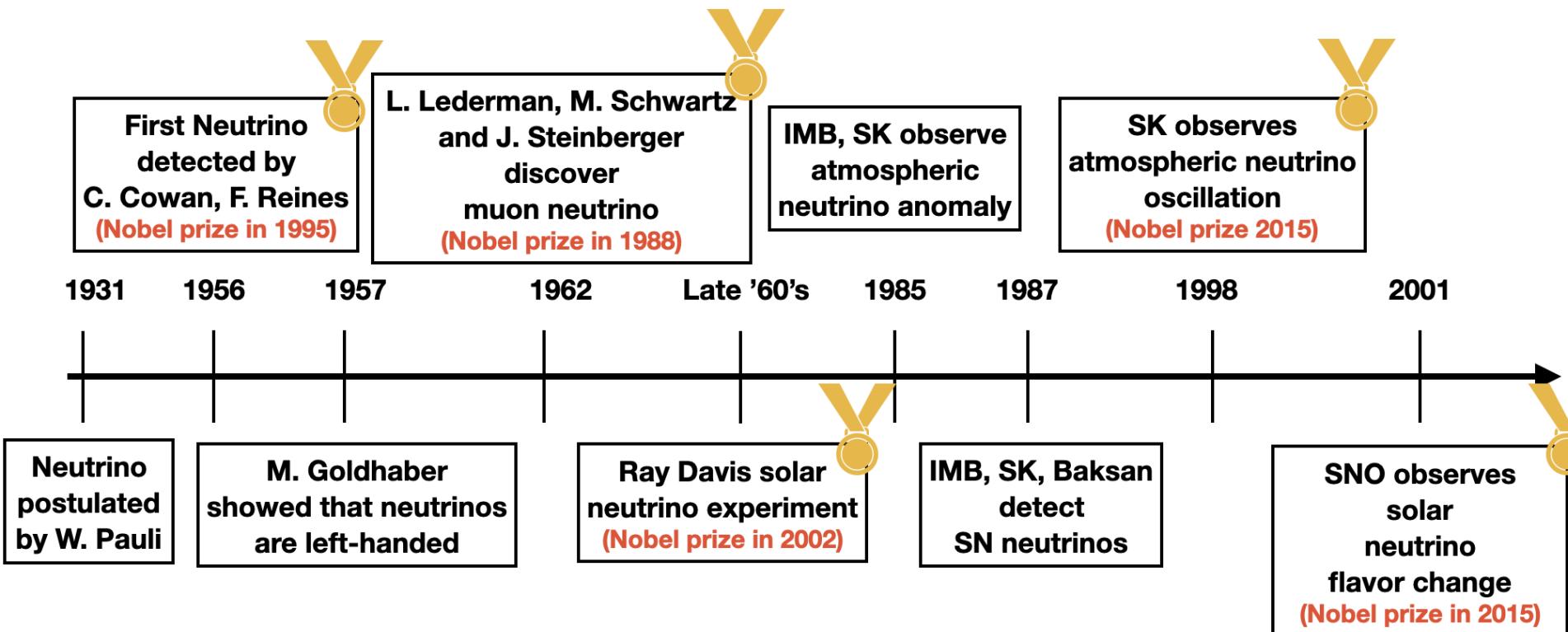
MINOS, Opera



Borexino
SNO



HISTOIRE DES NEUTRINOS



- Naissance théorique difficile et hautement hypothétique. Première observation expérimentale (26 plus tard).
- L'observation des neutrinos et plus récemment des oscillations de neutrinos a ouvert tout un champ d'investigation et a conduit à des investissements de plusieurs millions de dollars !
- Plusieurs autres étapes expérimentales et théoriques importantes dans la physique des neutrinos entre-temps.

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



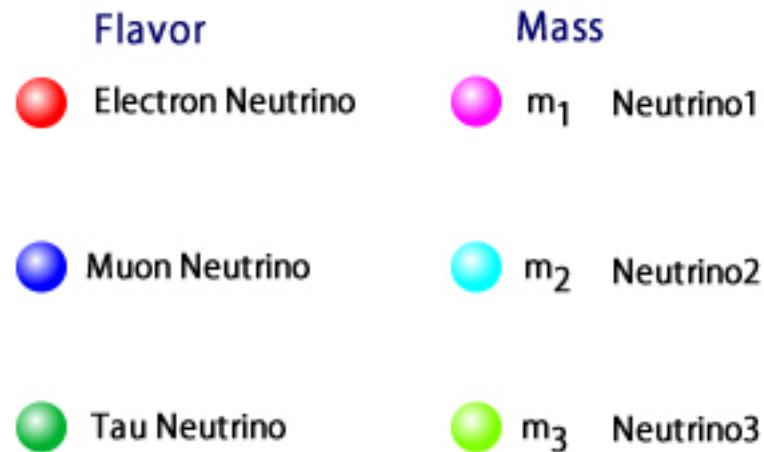
www.cea.fr

OSCILLATIONS DES NEUTRINOS



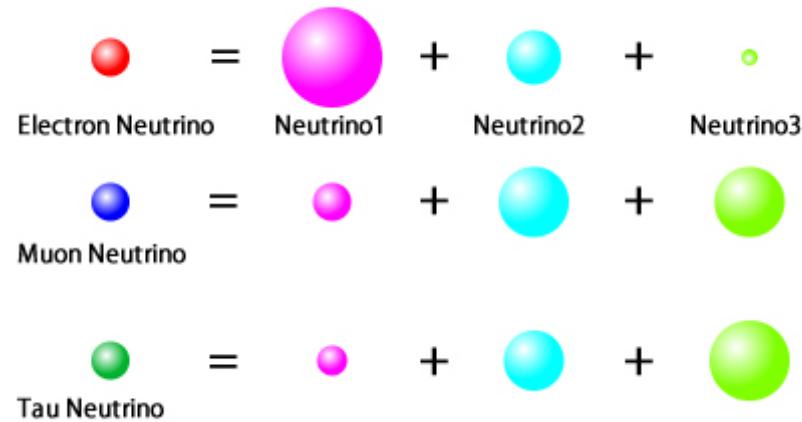
Illustration: © Johan Jamieson/The Royal Swedish Academy of Sciences

MELANGE DES NEUTRINOS



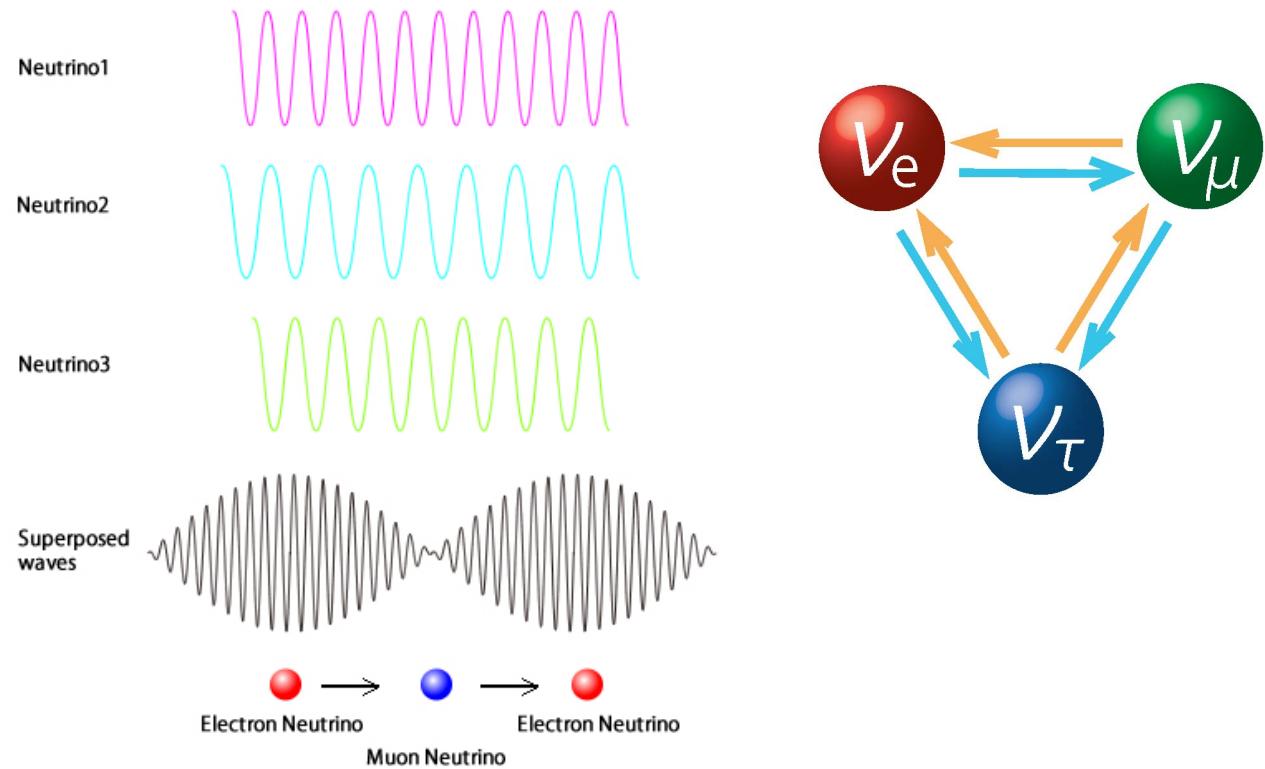
- Les états propres de saveur (ce que nous détectons, ce qui est produit) \neq États propres de masse (Hamiltonien) $i=1,2,3$ (masses) $\alpha=e, \mu, \tau$ (saveurs).
- Les neutrinos créés dans une saveur changent spontanément de saveur en se propageant.

MELANGE DES NEUTRINOS



- Les états propres de saveur et les états propres de masse ne peuvent pas être déterminés en même temps.
- Pour donner un exemple, le neutrino de l'électron est l'état de mélange du neutrino1, du neutrino2 et du neutrino3. C'est ce qu'on appelle le mélange de neutrinos.

OSCILLATIONS DES NEUTRINOS



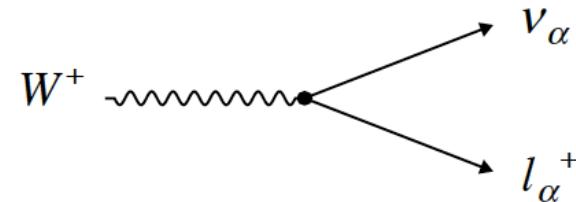
- Les différents états propres de masse voyagent dans l'espace comme des ondes ayant des fréquences différentes.
- La saveur d'un neutrino est déterminée par la superposition de ses états propres de masse.
- L'oscillation des neutrinos se produit lorsque les neutrinos ont une masse et un mélange non nul.

FORMALISME DU MELANGE DE NEUTRINOS



- Un neutrino est créé avec une saveur α par courant chargé de l'interaction faible avec un lepton de saveur α

$$\mathcal{L}_{\text{gauge-lepton}} \supset -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{l}_{Li} \underbrace{(U_l^\dagger U_\nu)_{ij}}_{U_{PMNS}} \gamma_\mu W_\mu^- \nu'_{Lj} + h.c.$$

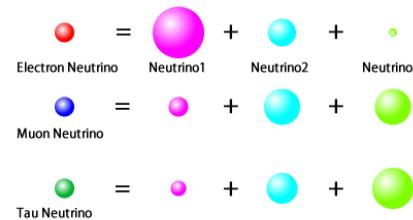


$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{\text{PMNS}} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Les états de saveurs produits par courant chargé de l'interaction faible

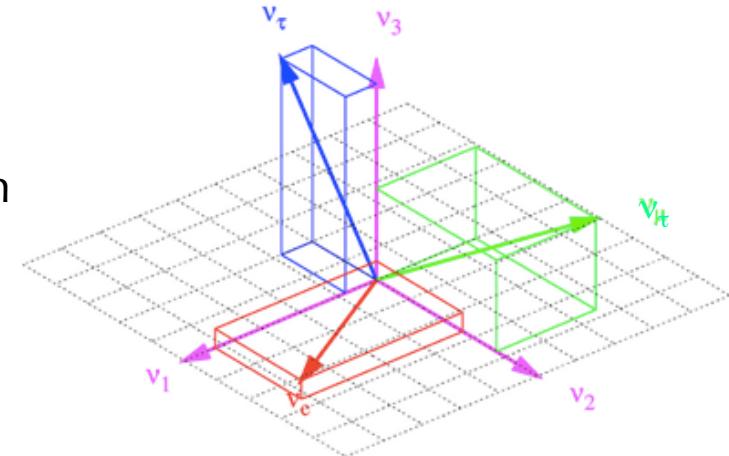
Les états propres de masse sont des états propres de l'hamiltonien

FORMALISME DU MELANGE DE NEUTRINOS



Les états propres sont reliés par une matrice de rotation Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata (PMNS)

$$(\nu_e \quad \nu_\mu \quad \nu_\tau) = U_{PNMS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$U_{PNMS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta_{CP}} \sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

- Le mélange des neutrinos est exprimé en termes de trois angles de mélange : $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}$.
- Une phase de violation du CP: δ_{CP} nécessaire pour avoir un déséquilibre entre les oscillations des neutrinos et des anti-neutrinos.

PROBABILITE D'OSCILLATIONS DES NEUTRINOS



- Supposons qu'un neutrino de saveur α soit produit à t_0 . Il s'agit donc d'une superposition des états propre de masse que nous supposons être des ondes planes avec un momentum \mathbf{p} :

$$|\nu_\alpha(t_0)\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* |\nu_i(\mathbf{p})\rangle$$

- Les états propres de masse sont des états propres de l'hamiltonien :

$$\hat{H}|\nu_i(\mathbf{p})\rangle = E_i(\mathbf{p})|\nu_i(\mathbf{p})\rangle, \quad E_i(\mathbf{p})^2 = \mathbf{p}^2 + m_i^2$$

- L'évolution dans le temps $t_0 \rightarrow t$ est donnée par $e^{-i\hat{H}(t-t_0)}$ et l'état devient :

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = e^{-i\hat{H}(t-t_0)}|\nu_\alpha(t_0)\rangle = \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-iE_i(\mathbf{p})(t-t_0)} |\nu_i(\mathbf{p})\rangle$$

- La probabilité qu'au temps t , le neutrino est de saveur β :

$$\begin{aligned} P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)(t) &= |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 = \left| \sum_i U_{\beta i} U_{\alpha i}^* e^{-iE_i(t-t_0)} \right|^2 \\ &= \sum_{i,j} e^{-i(E_i - E_j)(t-t_0)} U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j} \end{aligned}$$

- Les neutrinos sont ultra-relativistiques : $E_i(\mathbf{p}) - E_j(\mathbf{p}) \simeq \frac{1}{2} \frac{m_i^2 - m_j^2}{|\mathbf{p}|}$
- Neutrinos se propagent pratiquement à la vitesse de la lumière : $L \simeq t - t_0, v_i \simeq c$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)(L) \simeq \sum_{i,j} e^{i \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{2E}} U_{\beta i} U_{\alpha i}^* U_{\beta j}^* U_{\alpha j}$$

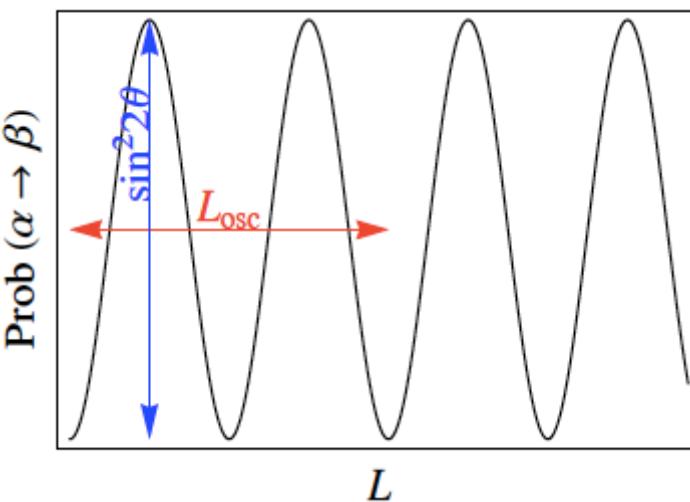


$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix}$$

La probabilité d'oscillation dépend de :

- L'énergie du neutrino E
 - La distance parcourue L
 - La différence de masse Δm^2
 - Le paramètre de mélange θ

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{ij}^2 L}{E} \right)$$



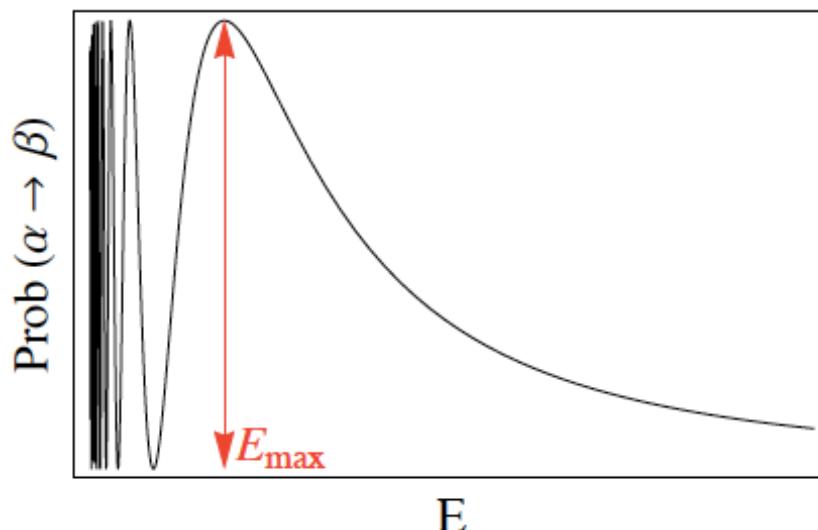
$$L_{osc}(km) = \frac{\pi}{1.27} \frac{E(GeV)}{\Delta m^2(eV^2)}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix}$$

La probabilité d'oscillation dépend de :

- L'énergie du neutrino E
- La distance parcourue L
- La différence de masse Δm^2
- Le paramètre de mélange θ

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{ij}^2 L}{E} \right)$$



$$E_{max}(GeV) = 1.27 \frac{\Delta m^2(eV^2)L(km)}{\pi/2}$$

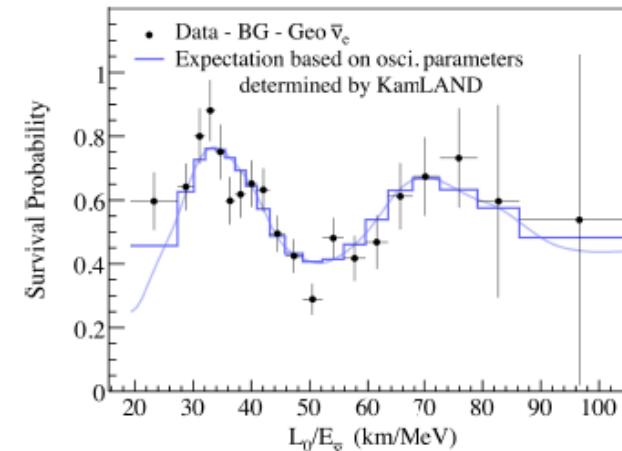
- La dépendance en L, E donne Δm^2
- L'amplitude de l'oscillation donne θ

KamLAND étudie les neutrinos de tous les réacteurs Japonais (80-800 km)

Les paramètres L/E permettent l'étude du secteur solaire $\langle E \rangle \sim 3$ MeV

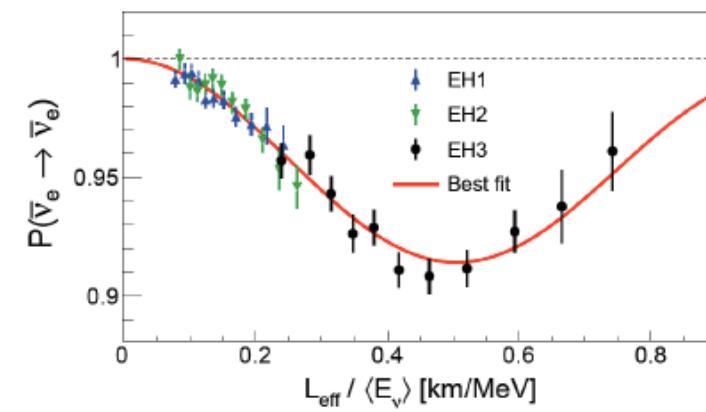
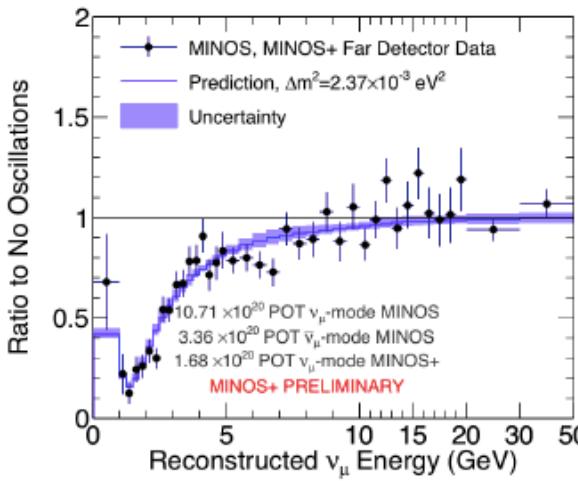
$$\Delta m_{\text{sol}}^2 \sim \frac{\mathcal{O}(\text{MeV})}{\mathcal{O}(100\text{km})}$$

$$\Delta m_{\text{solar}}^2 \simeq 8 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$



$$|\Delta m_{\text{atm}}^2| \sim \frac{\mathcal{O}(\text{GeV})}{\mathcal{O}(1000\text{km})} \sim \frac{\mathcal{O}(\text{MeV})}{\mathcal{O}(1\text{km})}$$

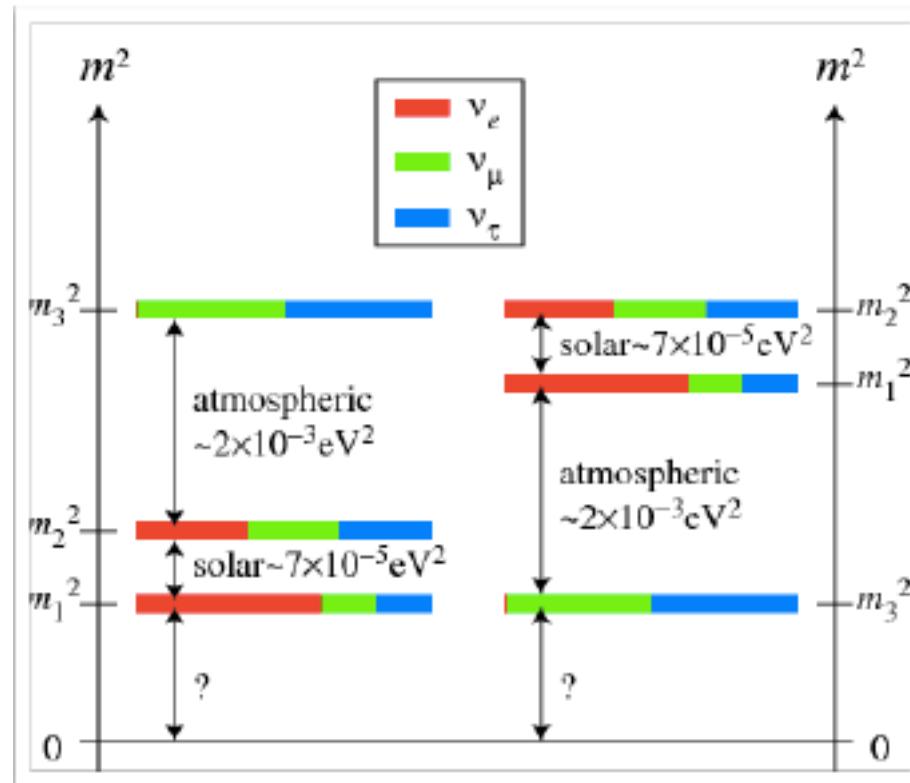
$$\Delta m_{\text{atm}}^2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$



Daya Bay

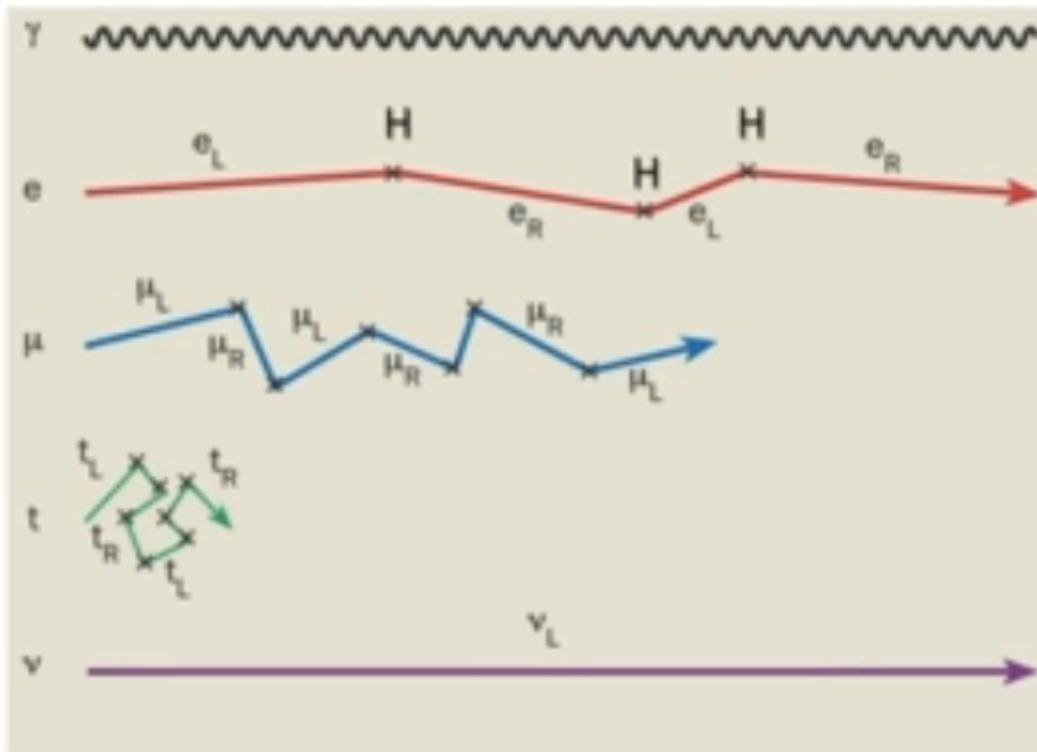
HIÉRARCHIE DES MASSES

$$0 < m_\nu < 0.1 \text{ eV}$$

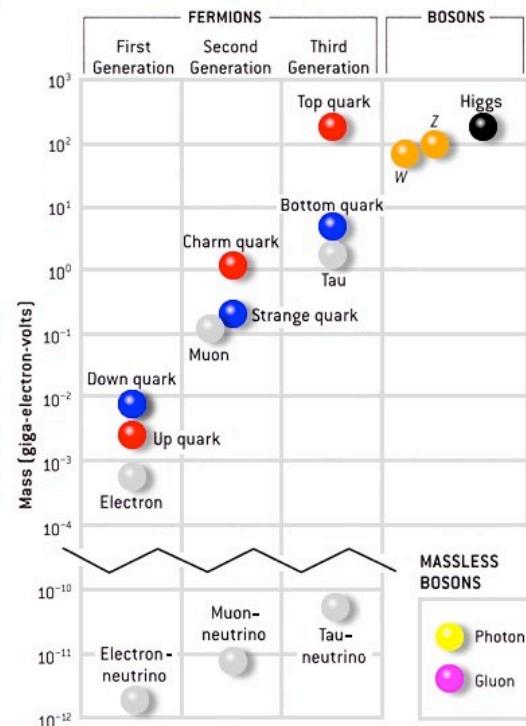
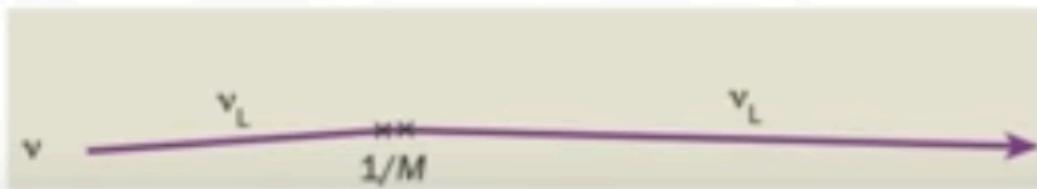


- La probabilité d'oscillation est sensible au carré des différences de masse des trois neutrinos : $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$
- Est ce que $m_3 > m_2 > m_1$ ou alors l'ordre est inversé ?

MÉCANISME DE LA BALANCE : SEE-SAW



Neutrinos de Majorana

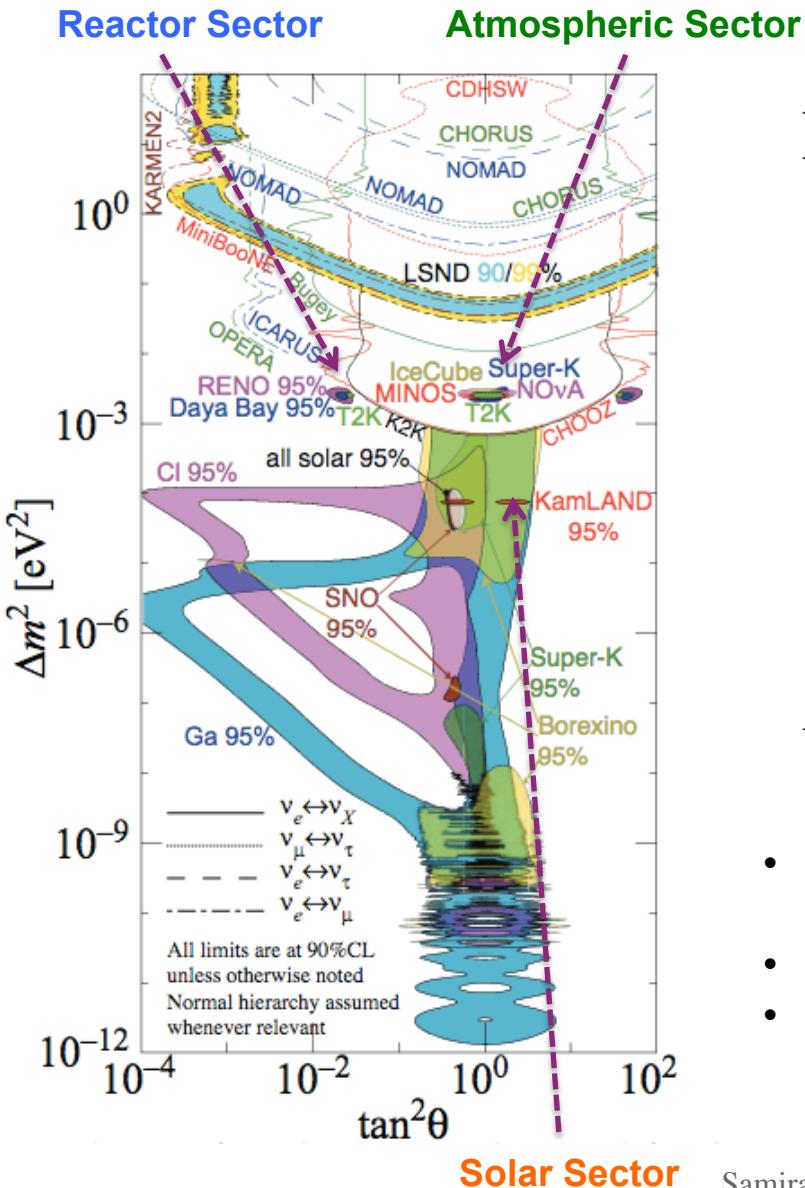


- La physique des neutrinos est entrée dans une ère des mesures de précision
- **Questions ouvertes**
 - Quelles ont les valeurs précises des paramètres d'oscillation ?
 - Quelle est l'échelle de masse des neutrinos ? Pourquoi si petite ?
($0 < m_\nu < 0.1$ eV , masse de l'électron= 511 000 eV)
 - La hiérarchie de masse est-elle normale ou inversée ?
 - Les oscillations des neutrinos violent-elles la symétrie CP ?
 - Les neutrinos sont-ils de Dirac ou de Majorana ?

Neutrino ? Antineutrino

$$\nu = \bar{\nu}$$

MESURING OSCILLATION PARAMETERS

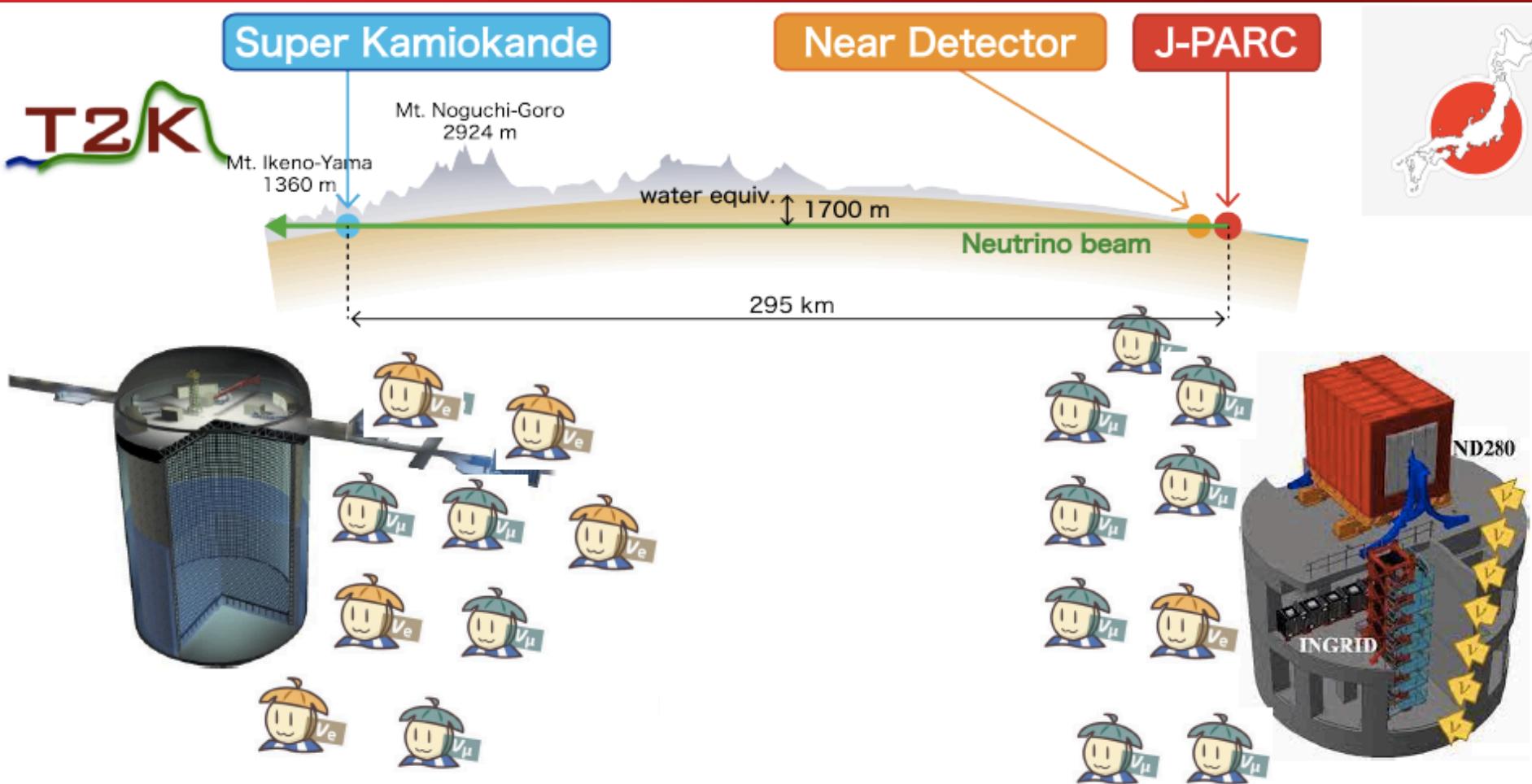


parameter	best fit $\pm 1\sigma$	3σ range	
Δm_{21}^2 [10 ⁻⁵ eV ²]	$7.50^{+0.22}_{-0.20}$	6.94–8.14	2.7%
$ \Delta m_{31}^2 $ [10 ⁻³ eV ²] (NO)	$2.56^{+0.03}_{-0.04}$	2.46–2.65	1.2%
$ \Delta m_{31}^2 $ [10 ⁻³ eV ²] (IO)	2.46 ± 0.03	2.37–2.55	
$\sin^2 \theta_{12}$ / 10 ⁻¹	3.18 ± 0.16	2.71–3.70	5.2%
$\sin^2 \theta_{23}$ / 10 ⁻¹ (NO)	$5.66^{+0.16}_{-0.22}$	4.41–6.09	4.9%
$\sin^2 \theta_{23}$ / 10 ⁻¹ (IO)	$5.66^{+0.18}_{-0.23}$	4.46–6.09	
$\sin^2 \theta_{13}$ / 10 ⁻² (NO)	$2.225^{+0.055}_{-0.078}$	2.015–2.417	3.0%
$\sin^2 \theta_{13}$ / 10 ⁻² (IO)	$2.250^{+0.056}_{-0.076}$	2.039–2.441	
δ/π (NO)	$1.20^{+0.23}_{-0.14}$	0.80–2.00	
δ/π (IO)	1.54 ± 0.13	1.14–1.90	

arXiv:2006.11237

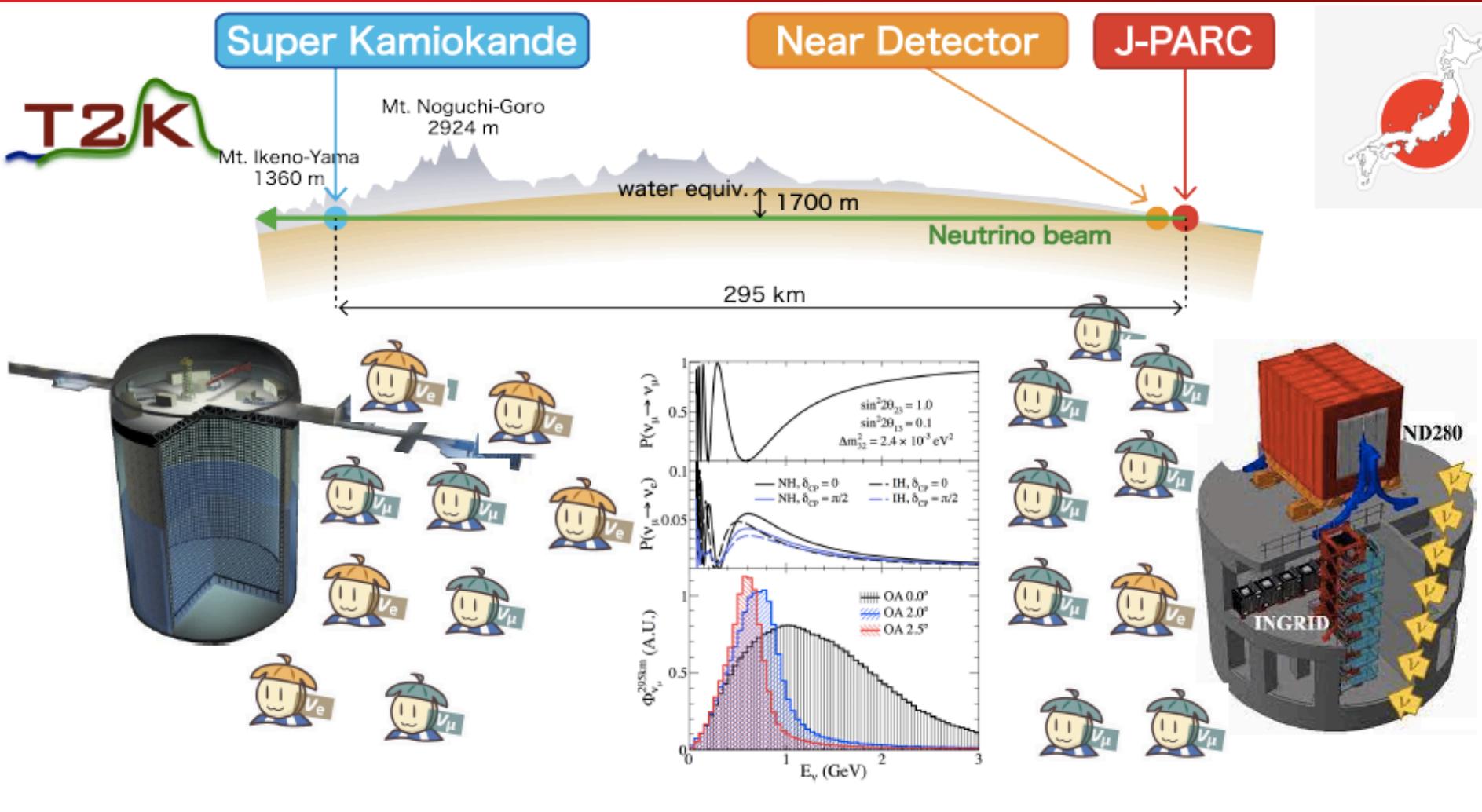
- La plupart des paramètres sont mesurés avec une précision de moins de 5%.
- θ_{23} est connu avec une précision de 5%
- Les paramètres restants sont la phase de violation de CP et la hiérarchie des masses.

THE T2K EXPERIMENT: TOKAI TO KAMIOKA



Neutrino cartoons by Yuki Akimoto

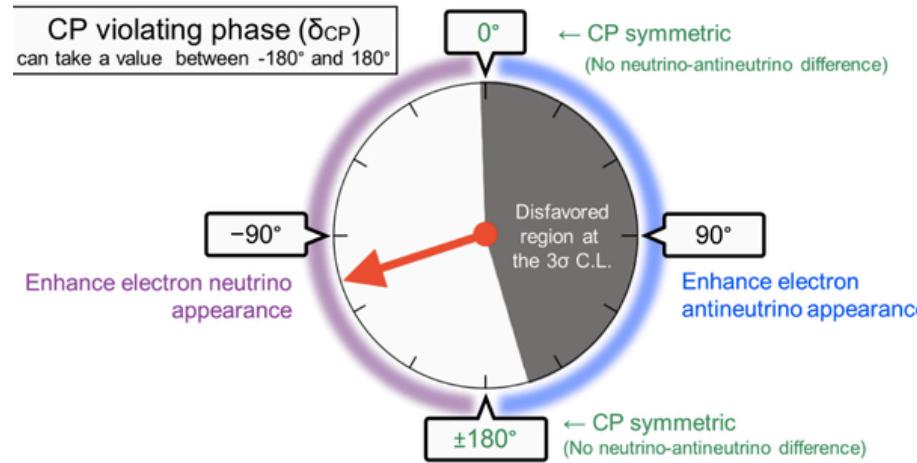
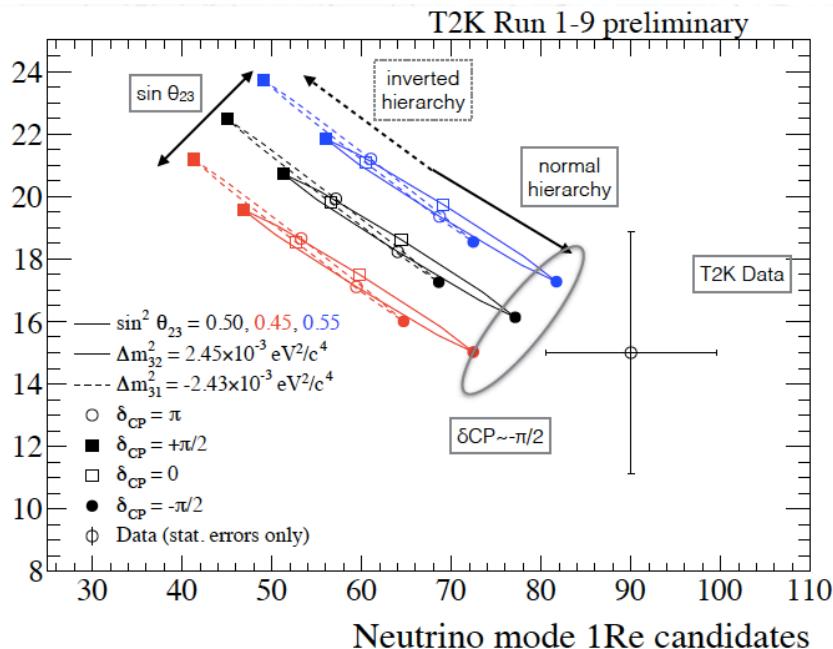
THE T2K EXPERIMENT: TOKAI TO KAMIOKA

**Off-axis angle**

Neutrino cartoons by Yuki Akimoto

CP VIOLATION PHASE

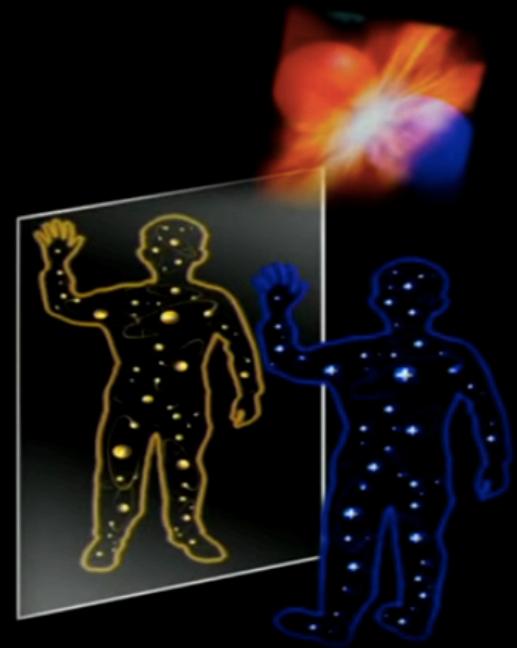
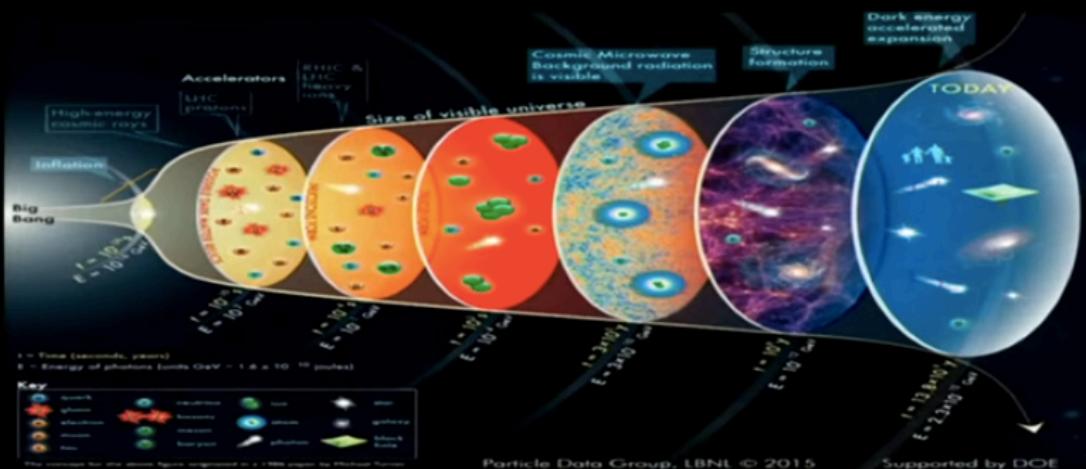
Antineutrino mode 1Re candidates



- Le résultat T2K exclut la plupart des valeurs $\delta_{CP} > 0$ @ 99.7% CL
- Préférence pour une violation maximale de CP
- Préférence pour un mélange maximal entre les neutrinos ν_e et ν_μ
- Légère préférence pour une hiérarchie normale
- Dominé par l'incertitude statistique

Indication de violation de CP dans le secteur leptistique

Disparition de l'antimatière de notre Univers



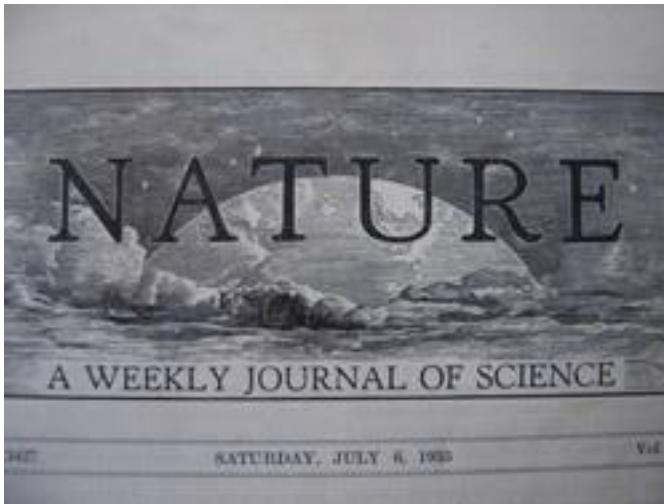
Les 3 conditions de Sakharov pas satisfaites

- violation CP
 - violation du nombre baryonique
 - non équilibre thermique

Recherche d'une violation très forte de la symétrie matière – antimatière (CP) pour les leptons (neutrinos)
Condition nécessaire pour le mécanisme de « leptogénèse »

2020

1930



" Fermi's theory of weak interactions : contains speculations too remote from reality to be of interest to the reader?"



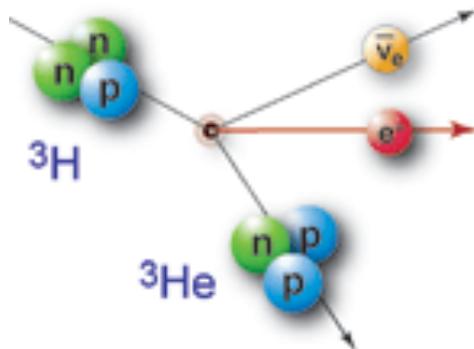
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

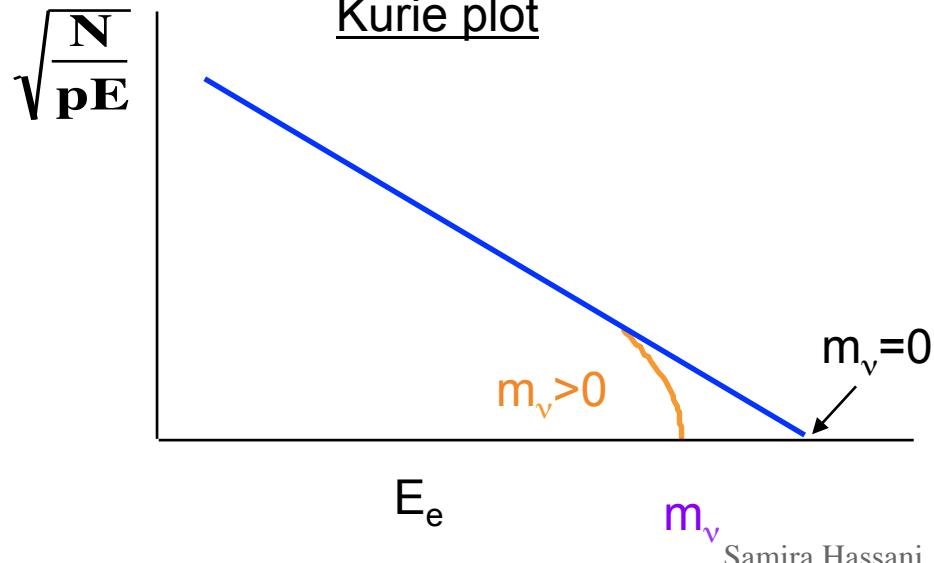
BACKUP

MESURE DIRECTE : KATRIN (EXPÉRIENCE TRITIUM)



Limite : $m(\bar{\nu}_e) < 0.8 \text{ eV}$

Kurie plot



Mesurer l'énergie maximale de l'électron, la différence avec l'énergie maximale libérée dans cette désintégration est la masse du neutrino.