

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



www.cea.fr

LES NEUTRINOS

Samira Hassani

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

21 Juillet 2022

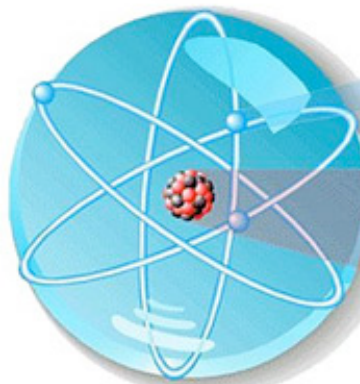
X^{ième} Rencontres d'été de physique de
l'infiniment grand à l'infiniment petit



~1m



molécule $\sim 10^{-6}\text{m}$



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



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



electron
 $< 10^{-16}\text{cm}$

proton
(neutron)



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

quark
 $< 10^{-16}\text{cm}$



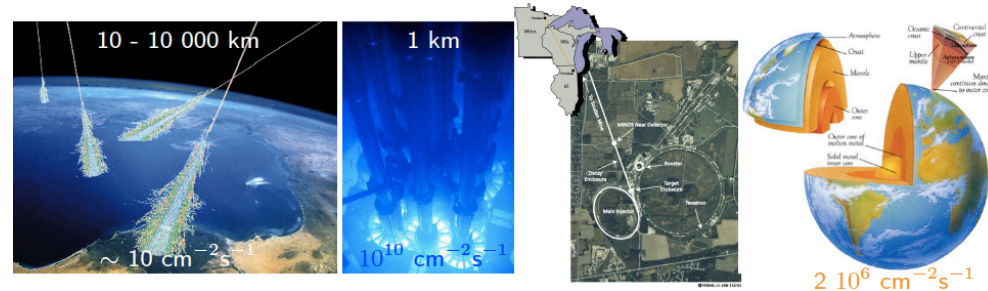
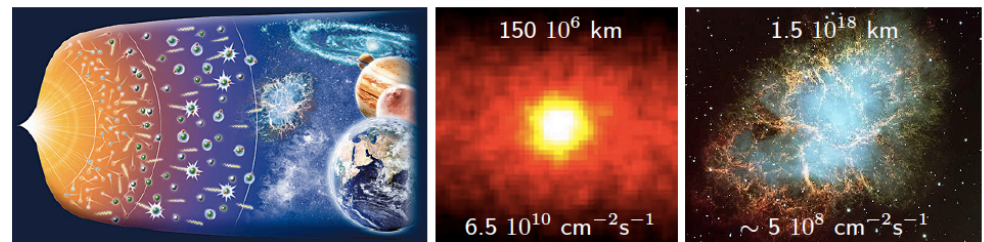
Fermions			Bosons	
Quarks	Masse $\approx 2,3 \text{ MeV}/c^2$ Charge $2/3$ Spin $1/2$ up	Masse $\approx 1275 \text{ MeV}/c^2$ Charge $2/3$ Spin $1/2$ charm	Masse $\approx 173210 \text{ MeV}/c^2$ Charge $2/3$ Spin $1/2$ top	Masse $\approx 126000 \text{ MeV}/c^2$ Charge 0 Spin 0 boson Higgs
	Masse $\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$ Charge $-1/3$ Spin $1/2$ down	Masse $\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ Charge $-1/3$ Spin $1/2$ strange	Masse $\approx 4180 \text{ MeV}/c^2$ Charge $-1/3$ Spin $1/2$ bottom	Masse 0 Charge 0 Spin 1 photon
				? graviton
Leptons	Masse $0,511 \text{ MeV}/c^2$ Charge -1 Spin $1/2$ électron	Masse $105 \text{ MeV}/c^2$ Charge -1 Spin $1/2$ muon	Masse $\approx 1777 \text{ MeV}/c^2$ Charge -1 Spin $1/2$ tauon	Masse $91200 \text{ MeV}/c^2$ Charge 0 Spin 1 boson Z
	Masse $< 0,0000022 \text{ MeV}/c^2$ Charge 0 Spin $1/2$ neutrino électr.	Masse $< 0,17 \text{ MeV}/c^2$ Charge 0 Spin $1/2$ neutrino muon.	Masse $< 15,5 \text{ MeV}/c^2$ Charge 0 Spin $1/2$ neutrino tauique	Masse $80400 \text{ MeV}/c^2$ Charge ± 1 Spin 1 boson W
	1ère	2ème	3ème	← 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

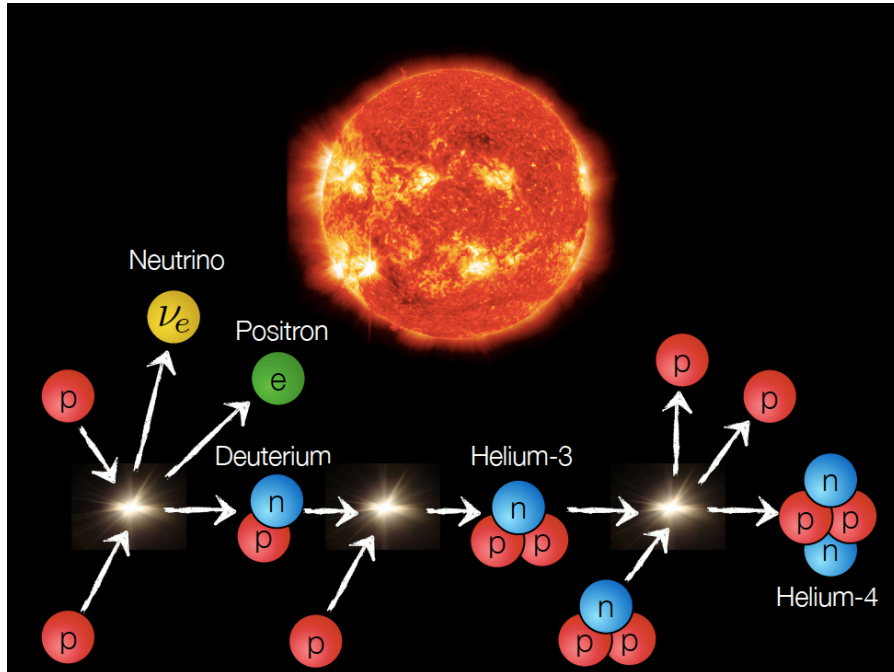
cea

SOURCES DE NEUTRINOS



www.cea.fr

Soleil : Fusion thermonucléaire

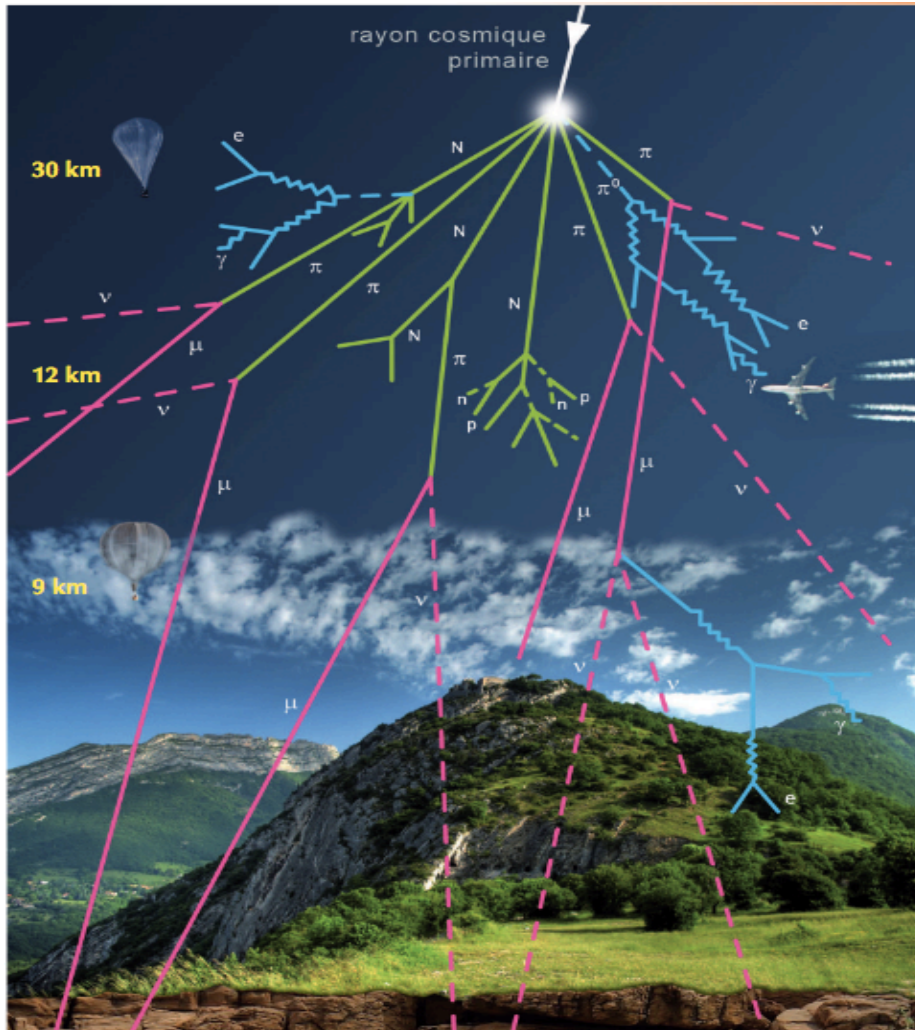


65 milliard /cm²/sec

Nous sommes littéralement baignés dans les neutrinos !



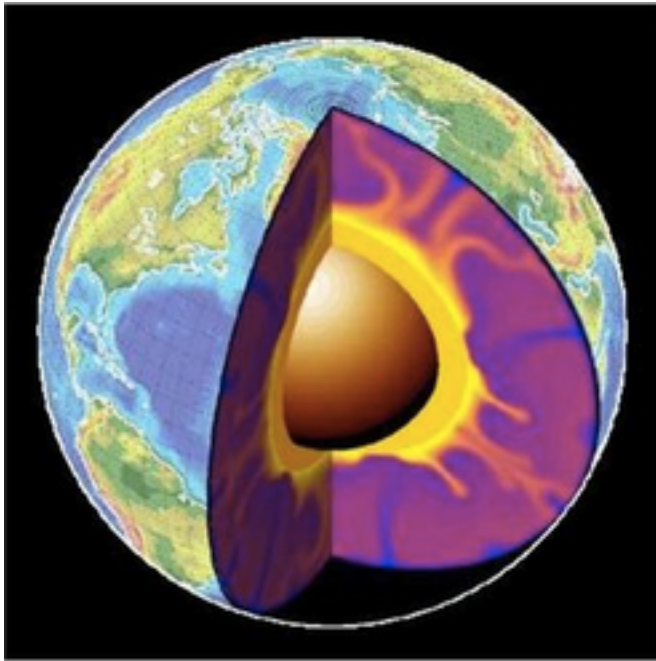
Atmosphère : Cascade de rayons cosmiques



$1/\text{cm}^2/\text{sec}$



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



7 millions /cm²/sec



Univers:

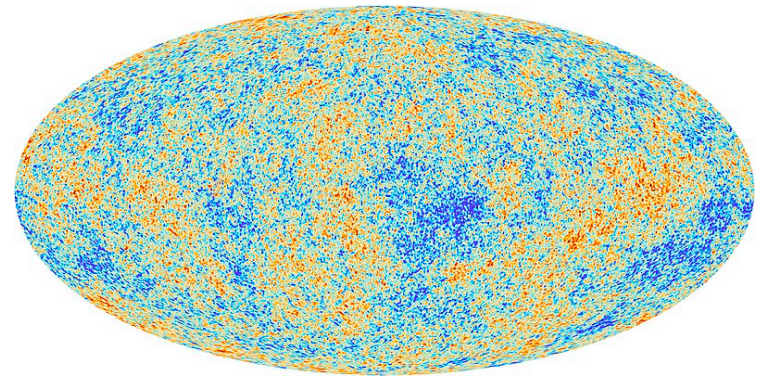
Supernova :

(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



$300 /\text{cm}^3$



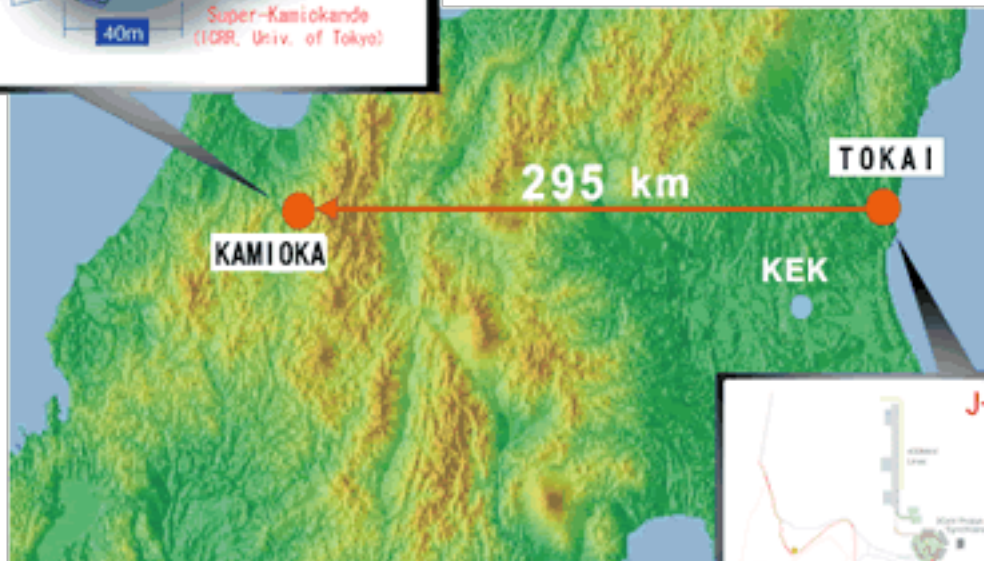
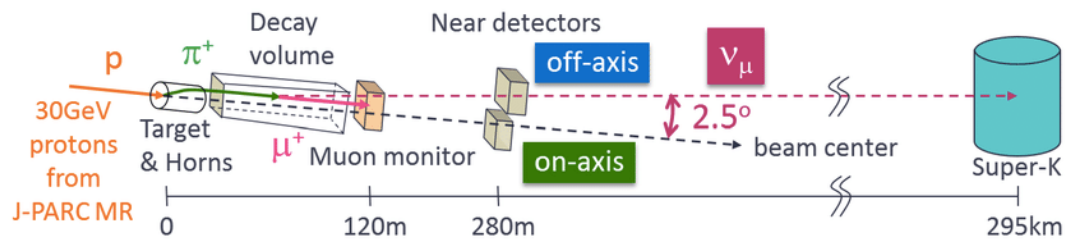
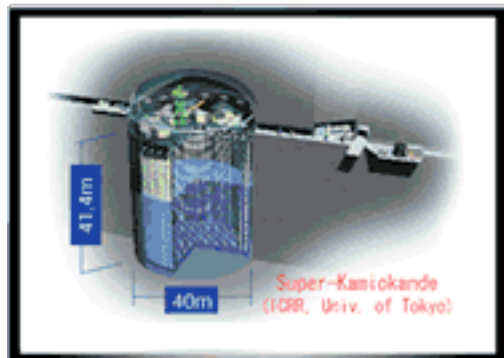
Réacteurs Nucléaires



Flux 10^{13} /cm²/sec

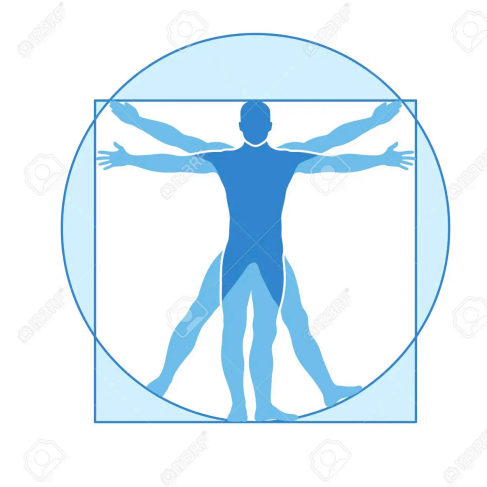


Accélérateurs : faisceaux de particules au Japon, USA, CERN, ...



Chacun de nous est émetteur de neutrinos:

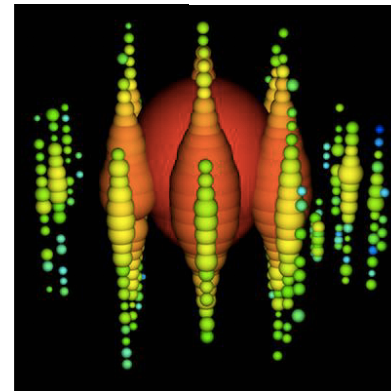
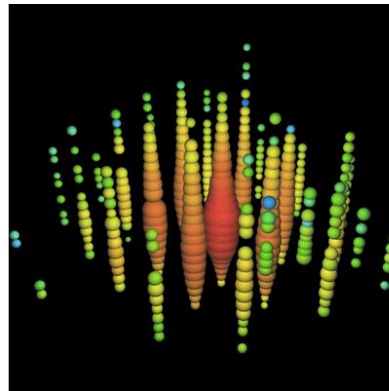
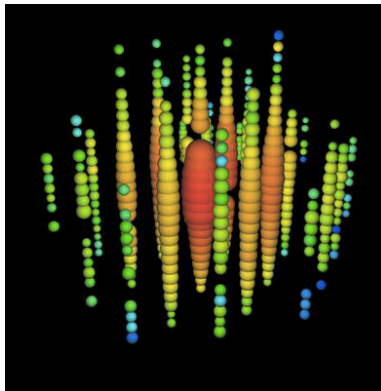
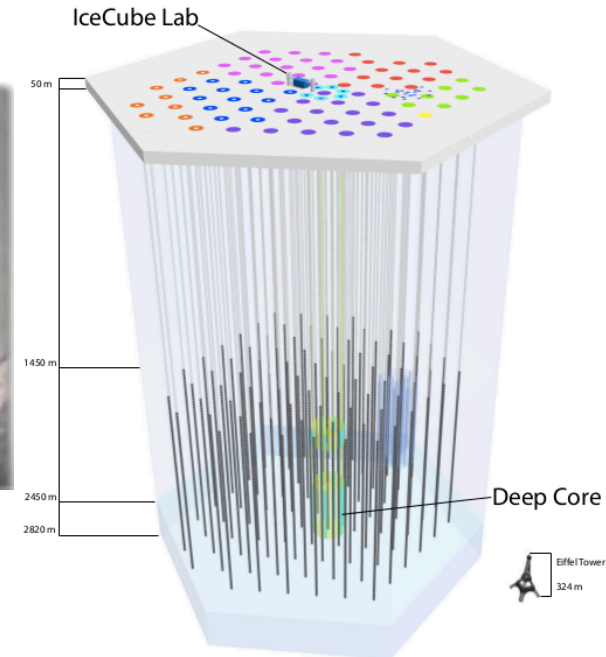
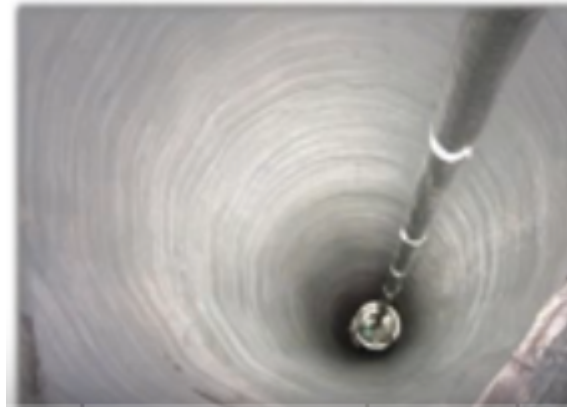
(20 mg de potassium ^{40}K radioactif dans le corps humain
4000 neutrinos /sec \rightarrow 340 millions /jour)

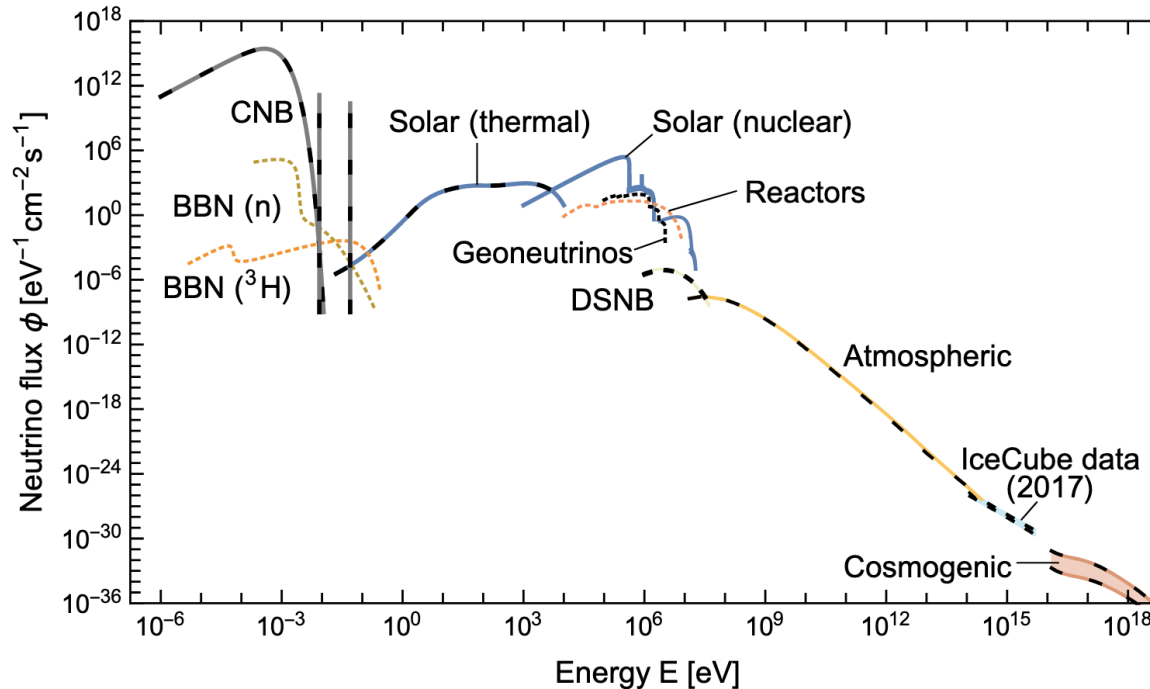


Une banane émet \approx 10 neutrinos/ sec

Détection extra-ordinaire :

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





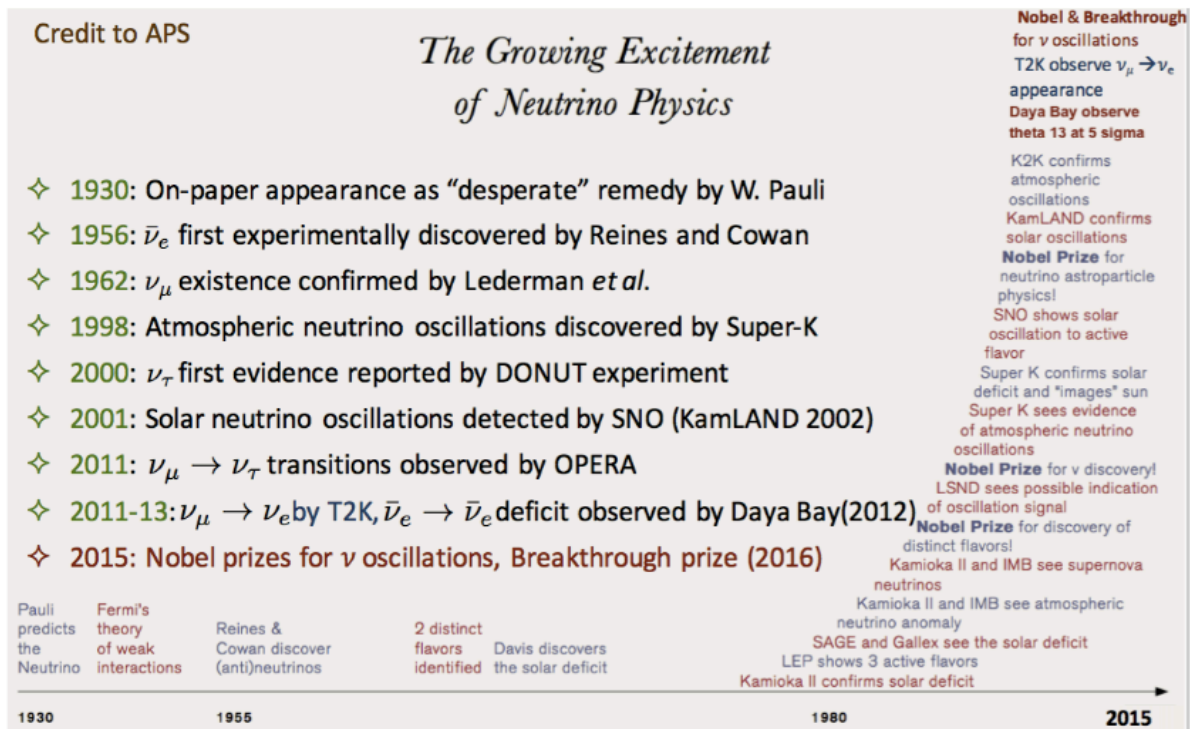
- Les énergies des neutrinos couvrent 24 ordres de grandeur
- **Différentes sources de neutrinos et différents mécanismes de production et de détection**
- Une physique des neutrinos passionnante et beaucoup de choses à apprendre !

DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

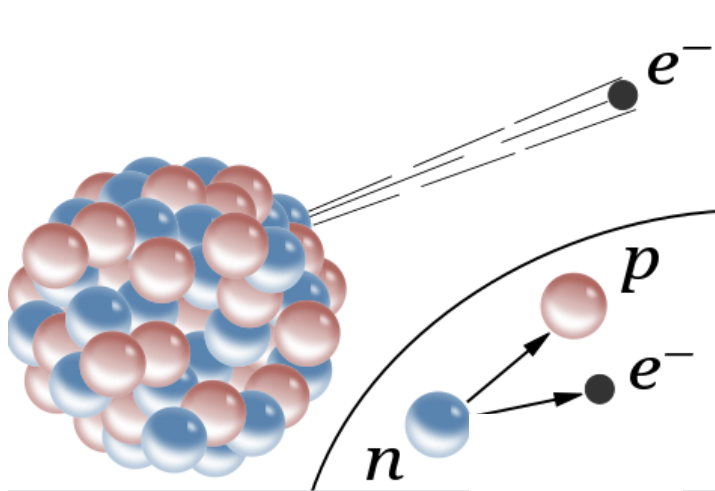
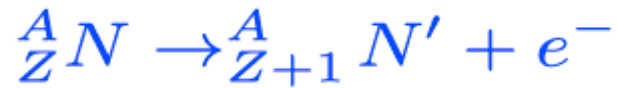


www.cea.fr

HISTOIRE DES NEUTRINOS



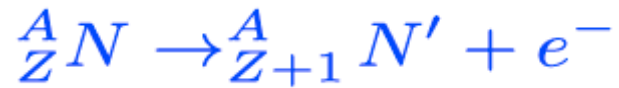
1911-1914 : La radioactivité β présente une anomalie !



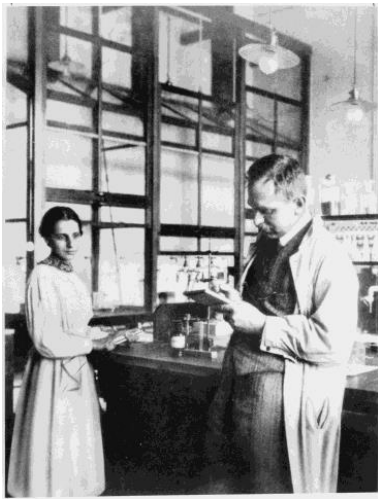
Principe de conservation de l'énergie :

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

1911-1914: La radioactivité β présente une anomalie !



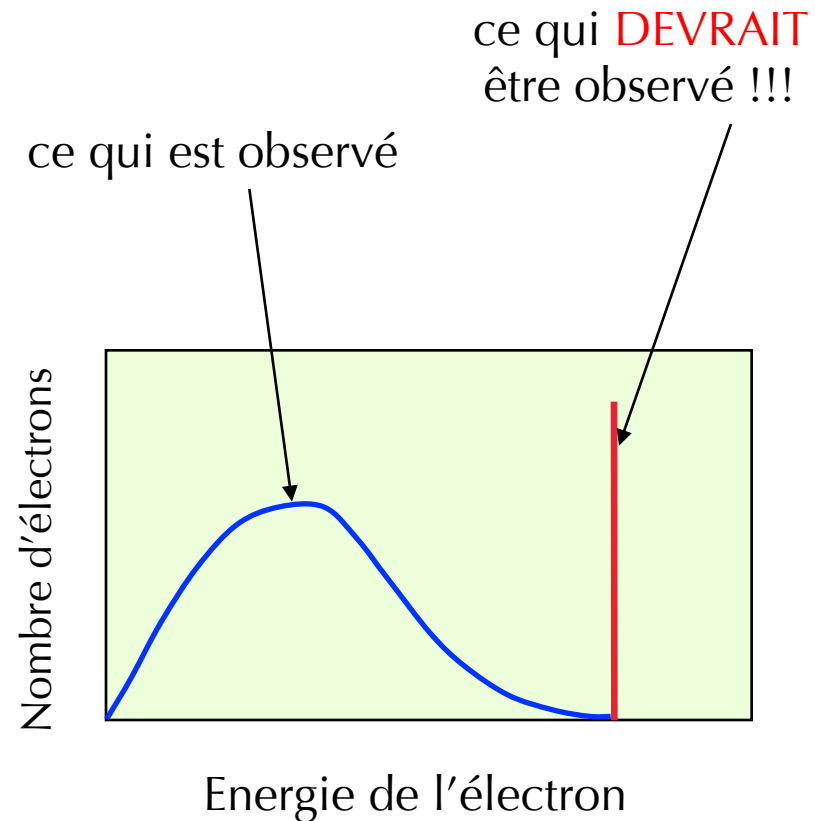
L. Meitner & O. Hahn (1911) observent que le spectre en énergie de l'électron est continu (confirmé par Chadwick en 1914)



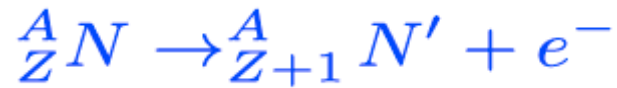
L. Meitner & O. Hahn
(Nobel 1944 à Hahn seul!!)



Chadwick
(Nobel 1935)



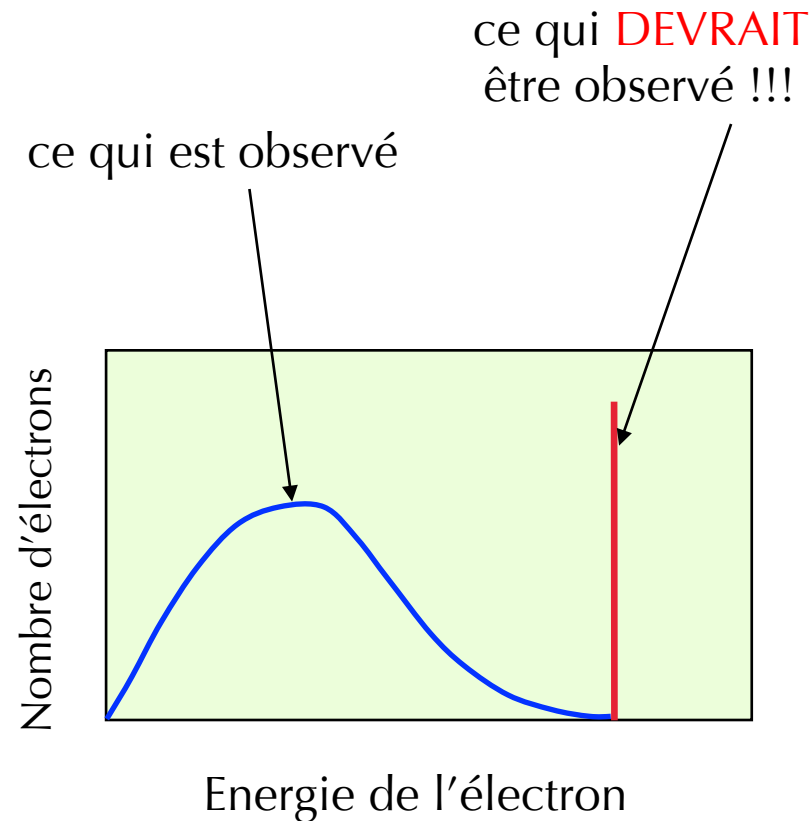
Avant 1930 : La radioactivité β présente une anomalie !



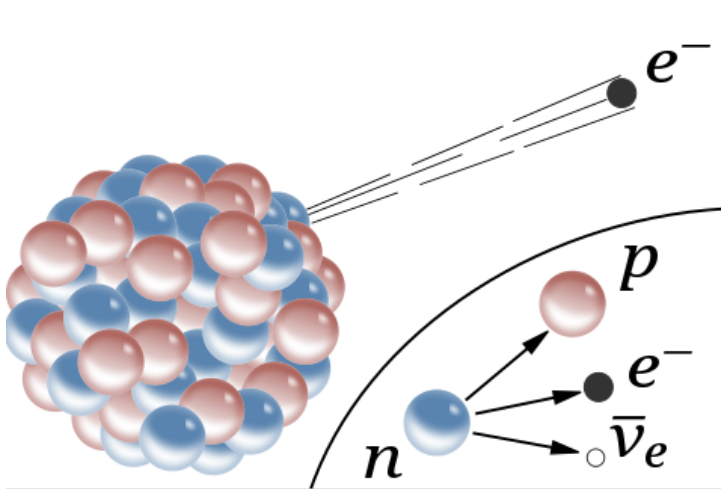
L. Meitner & O. Hahn (1911) observent que le spectre en énergie de l'électron est continu (confirmé par Chadwick en 1914)

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**



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 Li^6 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 Li^6 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.

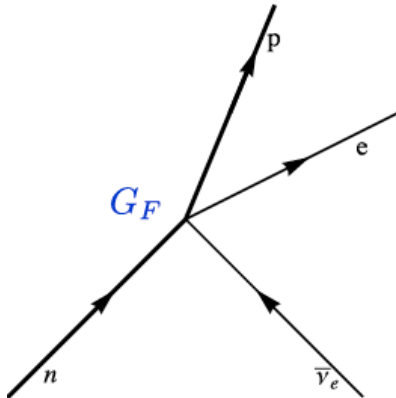
Your humble servant,

W. Pauli

Pauli a dit à son ami Walter Baade:

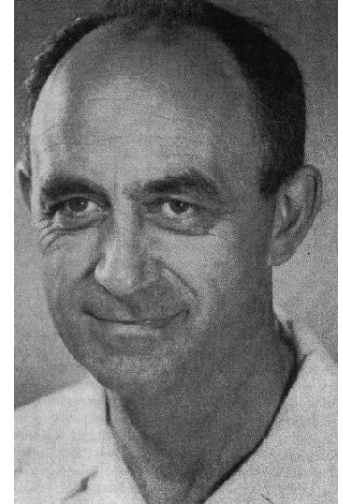
"Today I have done something which no theoretical physicist should ever do in his life: I have predicted something which shall never be detected experimentally!"

1933 : Théorie de la désintégration β



$$n + \nu \rightarrow p + e^-$$

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

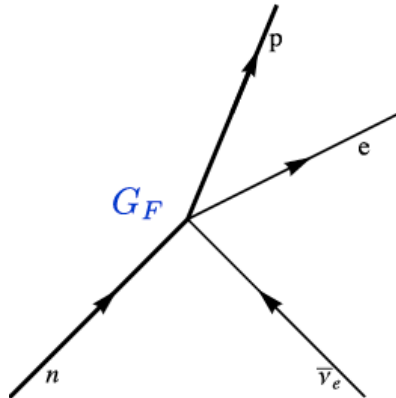


Enrico Fermi
(Nobel 1945)

La revue Nature n'a pas publié son article :

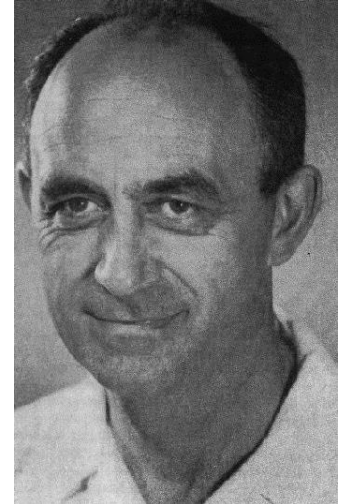
"contained speculations too remote from reality to be of interest to the reader....."

1933 : Théorie de la désintégration β



$$n + \nu \rightarrow p + e^-$$

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



Enrico Fermi
(Nobel 1945)

1934 : Bethe and Peierls

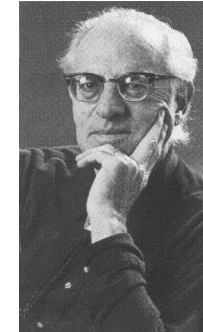
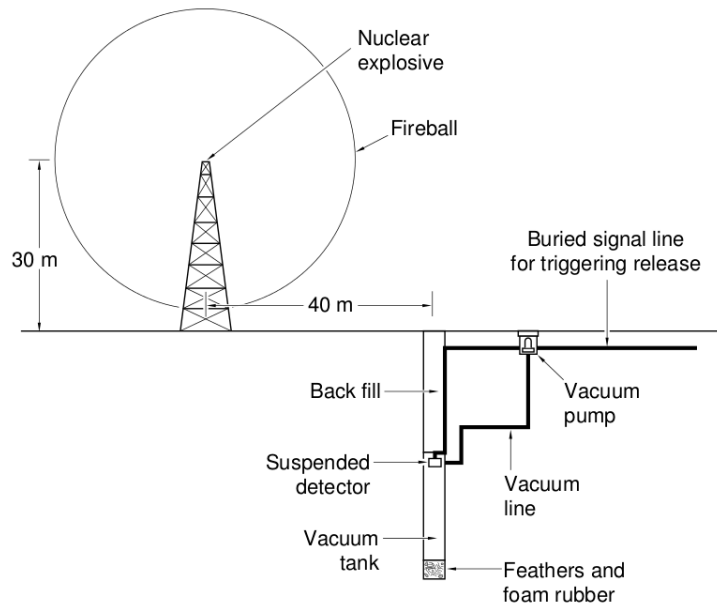
- Prédissent sa probabilité d'interagir: $\sigma_{\nu p} \approx 10^{-44} \text{ cm}^2$ ($E_\nu = 2 \text{ MeV}$) à comparer à $\sigma_{\gamma p} \approx 10^{-25} \text{ cm}^2$
- La longueur de parcours moyen d'un neutrino avant d'interagir est d'environ 1.6 année lumière de plomb $= 10^5$ fois la distance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



Bethe and Peierls
(Bethe, Nobel 1967)

1956 : Première détection des neutrinos par Reines & Cowan

Projet Poltergeist (1951) à Los Alamos



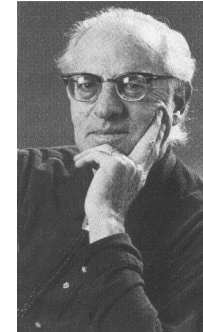
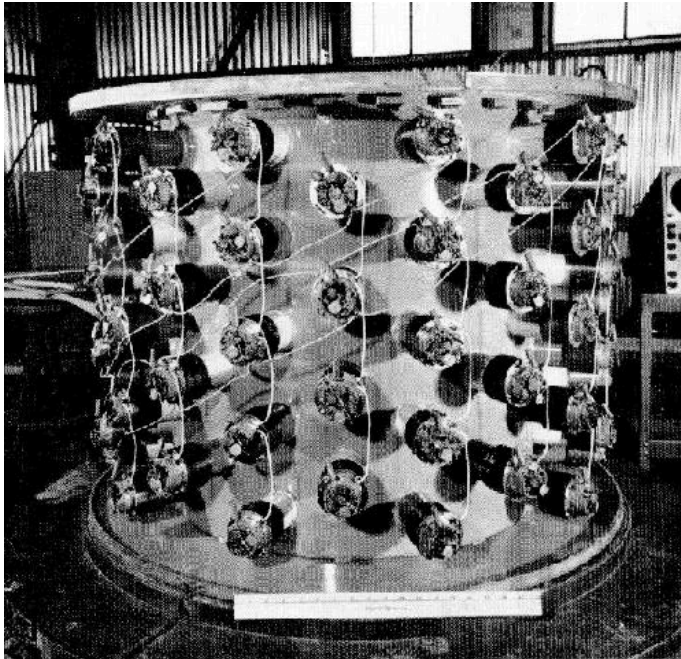
Reines
(Nobel 1995)



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

1956 : Première détection des neutrinos par Reines & Cowan



Reines
(Nobel 1995)

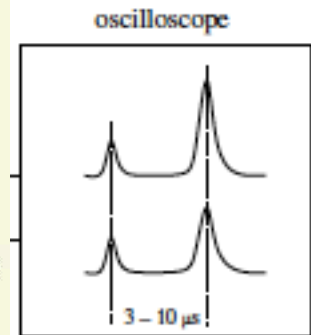
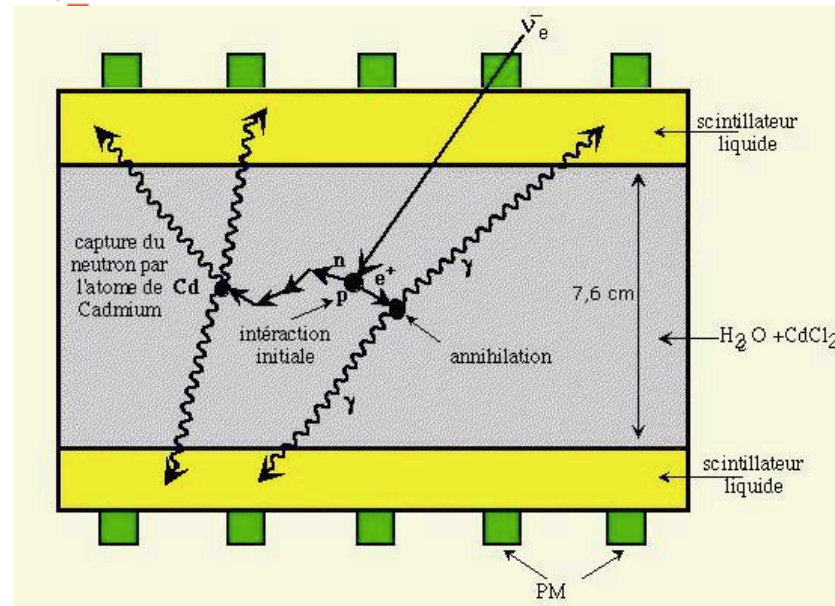
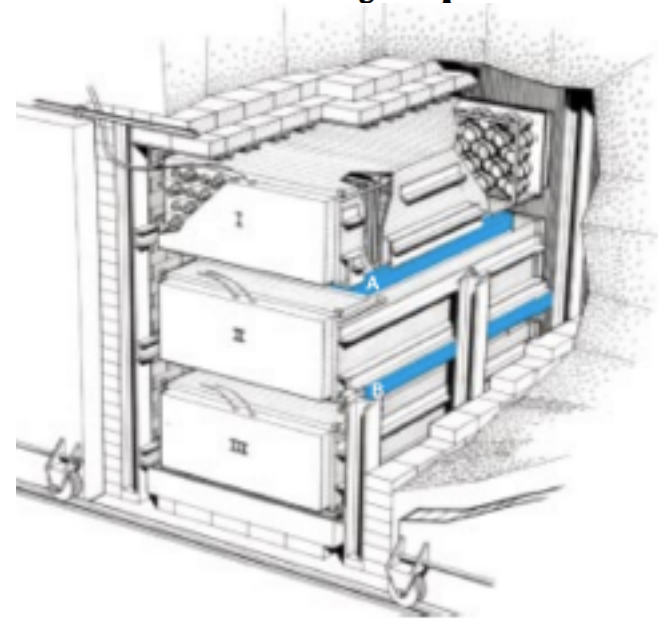
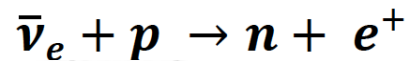


Cowan
(est mort avant)

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)



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

RADIO-SCHWEIZ AG. **RADIOGRAMM-RADIOGRAMME** RADIO-SUISSE S.A.

SBZ1311 ZHW UW1844 FM BZJ116 WH CHICAGOILL 56 14 1310

PLC 00253

Erhalten - Reçu **„VIA RADIOSUISSE“** Befördert - Transmis

von - de **NEWYORK** Stunde - Heure **15** NAME - NOM **PAULI** nach - à **74** Stunde - Heure **15** NAME - NOM **VL 56 --1 10**

Brieftelegramm

LT

NACHLASS
PROF. W. PAULI

PROFESSOR W PAULI
ZURICH UNIVERSITY ZURICH

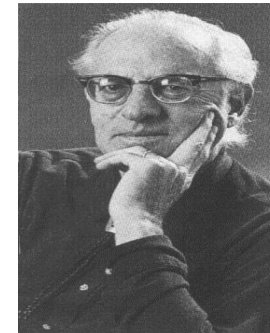
Per Post ①

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 MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS

FREDERICK REINES AND CLYDE COWN
BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

No. 20 4000 X 100 3/74



Reines
(Nobel 1995)



Cowan
(est mort avant)



Wolfgang Pauli
(Nobel 1945)

Frederick REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

Thanks for message. Everything comes to
him who knows how to wait.

Pauli

1962 : Découverte du ν_μ

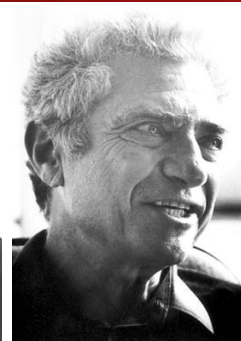
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}$$



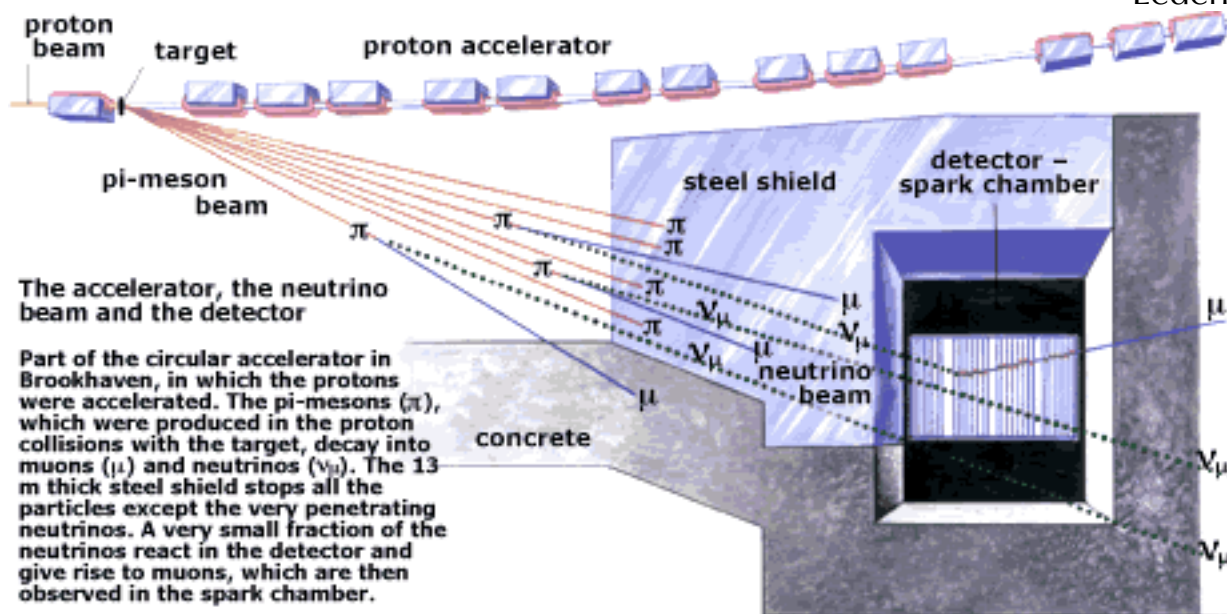
Lederman



Schwartz
(Nobel 1988)



Steinberger

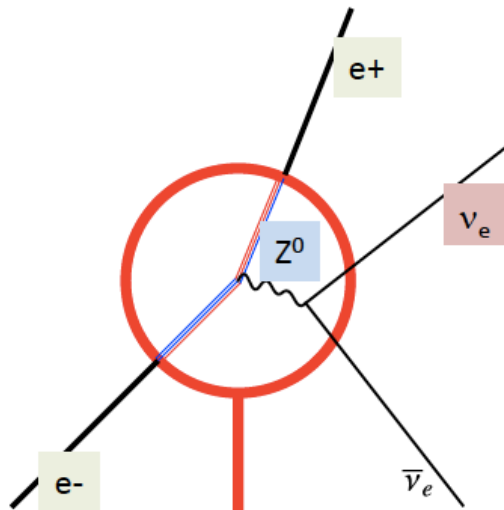


Based on a drawing in Scientific American, March 1963.

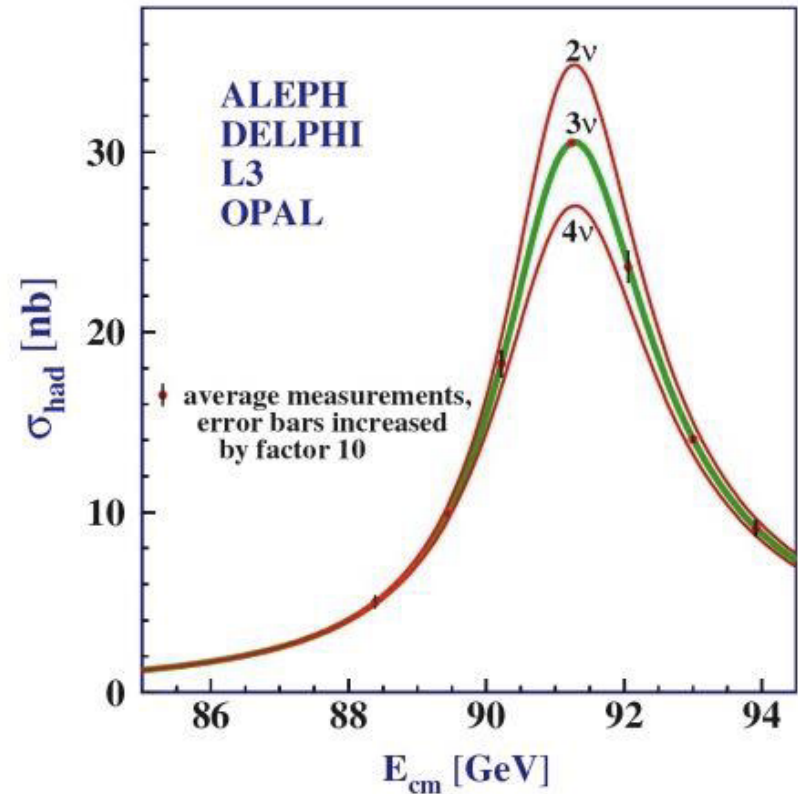
Les versions modernes de l'expérience de Lederman, Schwartz et Steinberger sont des accélérateurs. Expériences sur les neutrinos : Minos, Opera, T2K, NovA,...

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

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



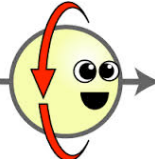
$$N_\nu = \frac{\Gamma_{\text{inv}}}{\Gamma_{\nu\bar{\nu}}} = 2.984 \pm 0.008$$



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

Spin-1/2 fermions

Quarks	Left Right	u	Left Right	c	Left Right	t
	Left Right	d	Left Right	s	Left Right	b
Leptons	Left Right	ν_1	Left Right	ν_2	Left Right	ν_3
	Left Right	e	Left Right	μ	Left Right	τ

- Les neutrinos font partie des doublets de l'interaction faible.
- Interagissent via les bosons W et Z \rightarrow **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

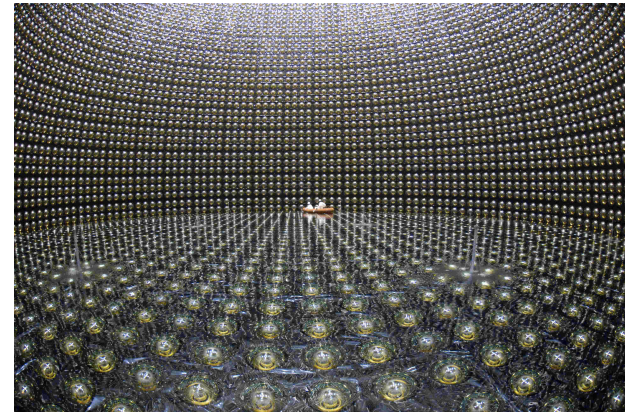
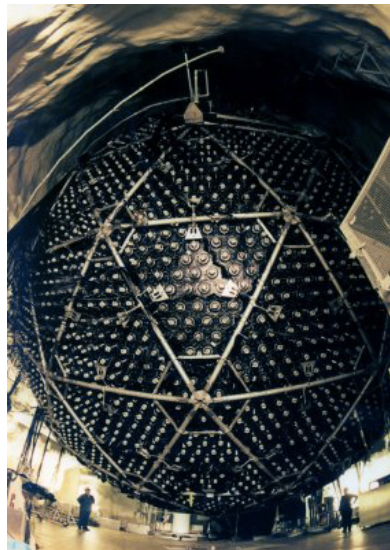
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE

cea

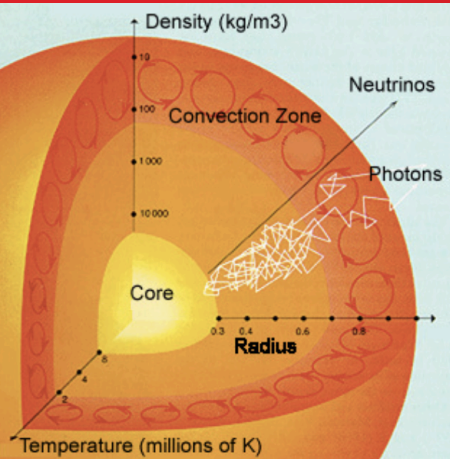


www.cea.fr

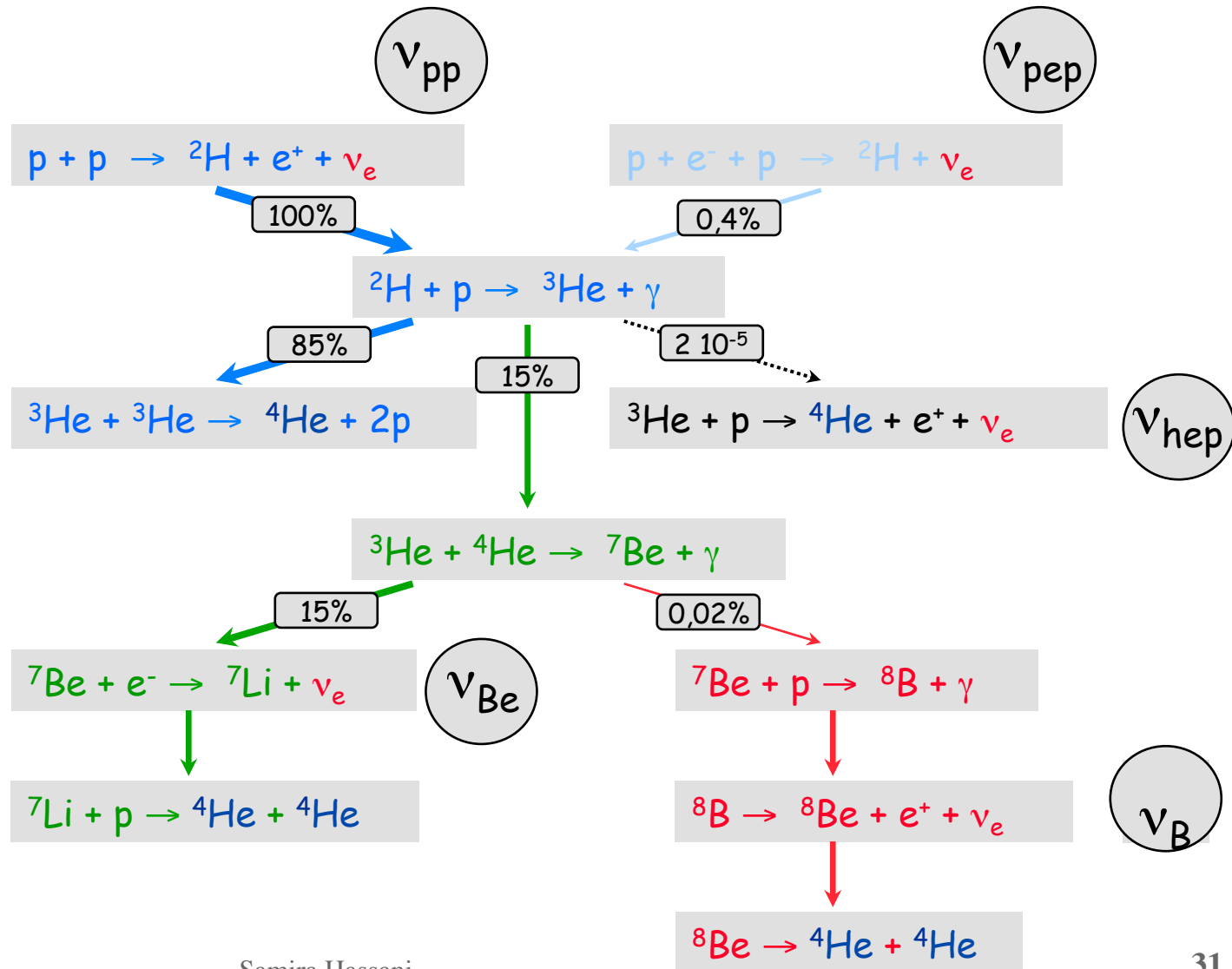
DETECTION DES NEUTRINOS



Une succession d'anomalies et de surprises



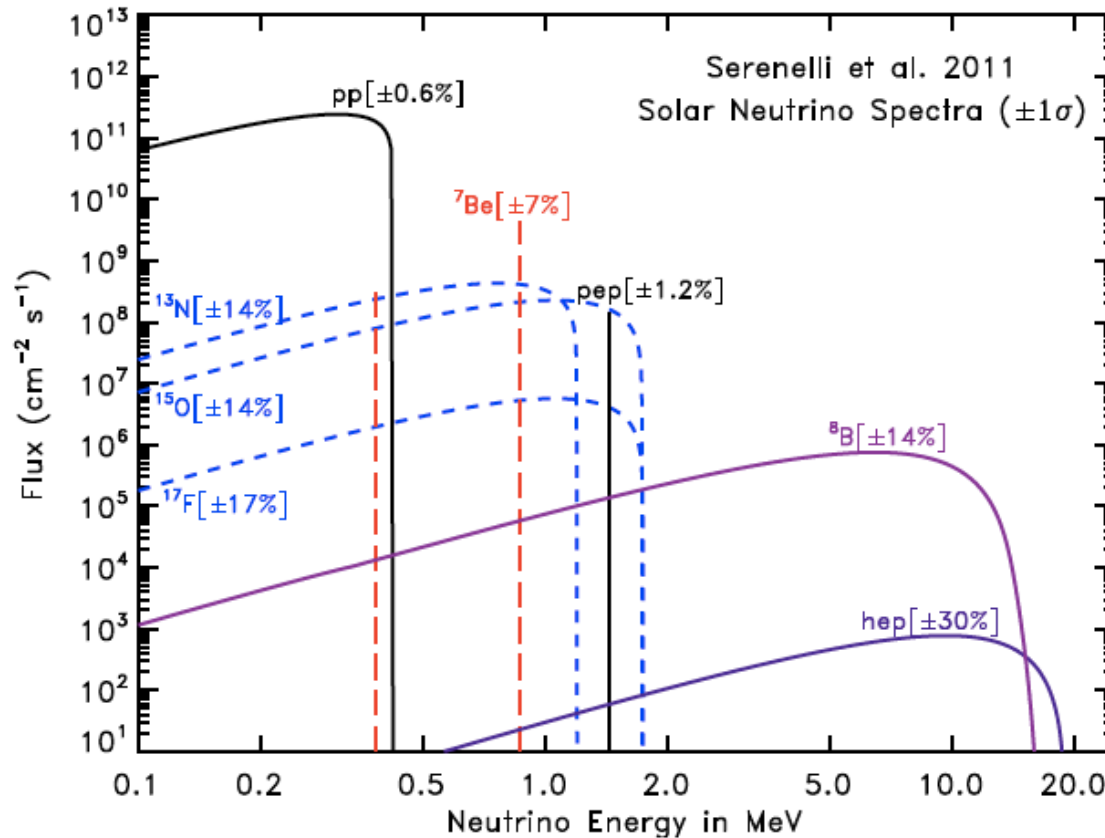
Réactions nucléaires dans le Soleil



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



J. Bahcall



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

400,000 L de perchloroethylene C_2Cl_4

$\nu_e + {}^{37}Cl \rightarrow {}^{37}Ar + e^-$ (seuil 814 keV)

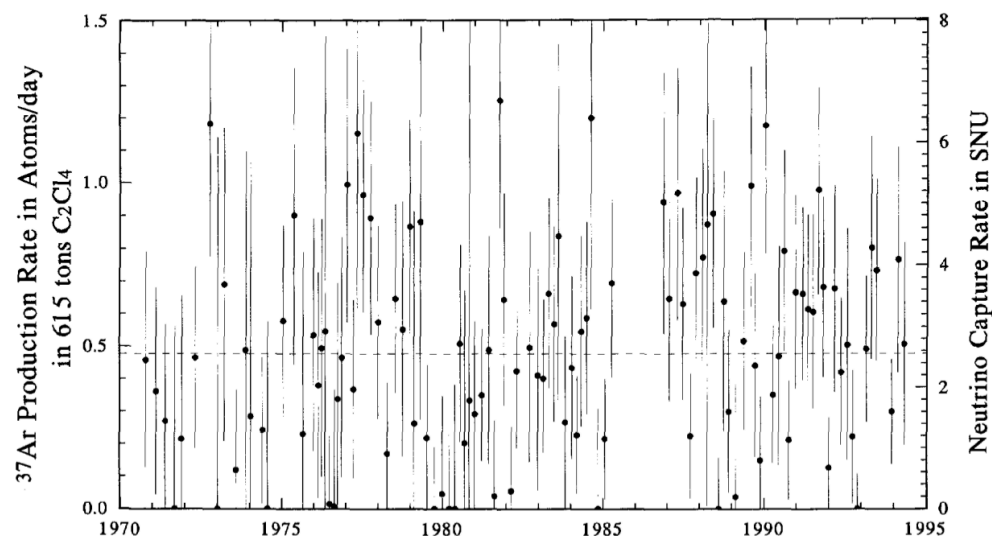
Collecter l'Ar pour obtenir le flux de neutrinos

1 ν_e / jour seulement transmute le chlore en argon

25 ans de Prise de données



Raymond Davis
Nobel 2002



Résultat : 2.56 ± 0.20 SNU

Modèle Solaire (7.6 ± 1.2 SNU)

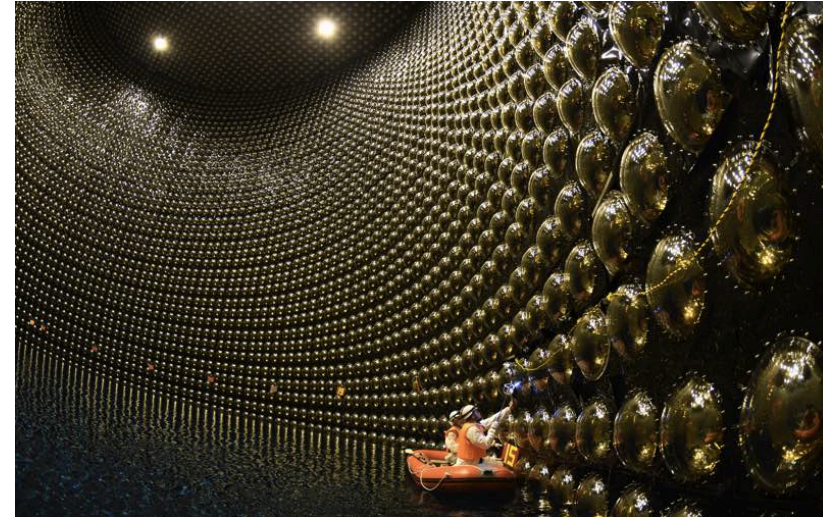
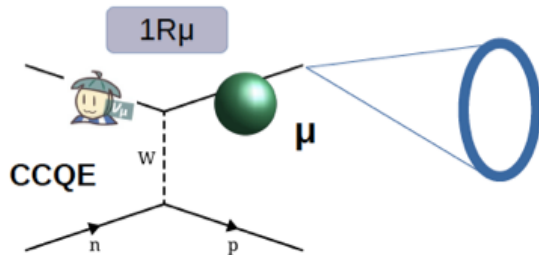
Surprise : Seulement 1/3 des neutrinos solaires prédits par Bahcall sont détectés !?

Déficit confirmé par plusieurs expériences.

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

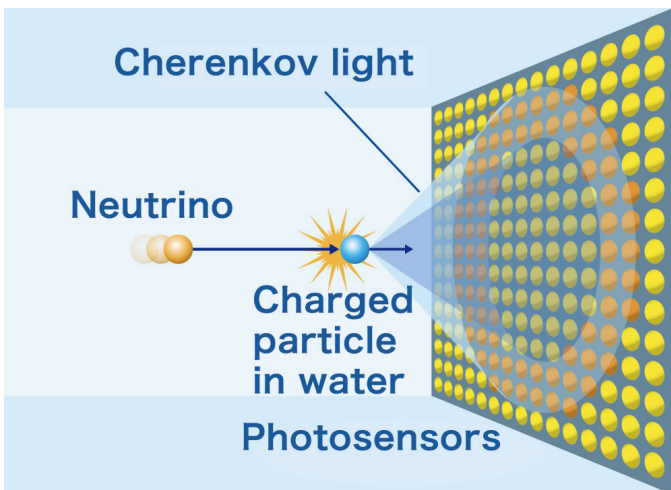
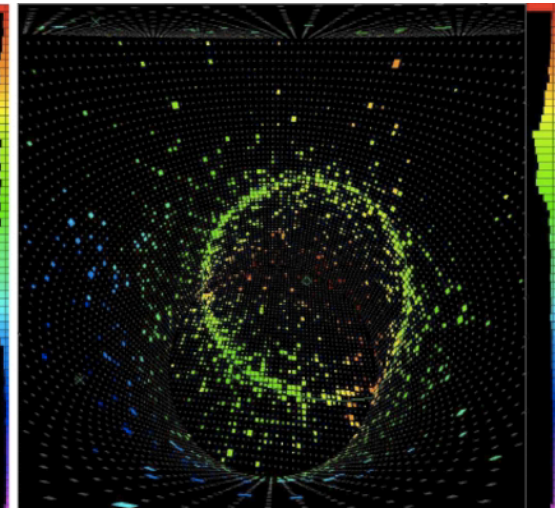
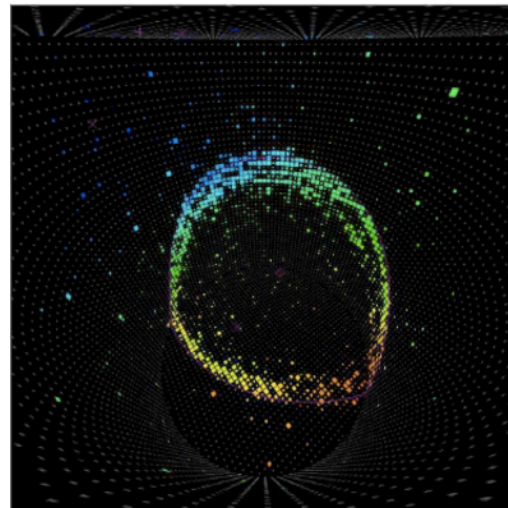
1998 : SuperKamiokande a détecté un déficit de neutrinos atmosphériques

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

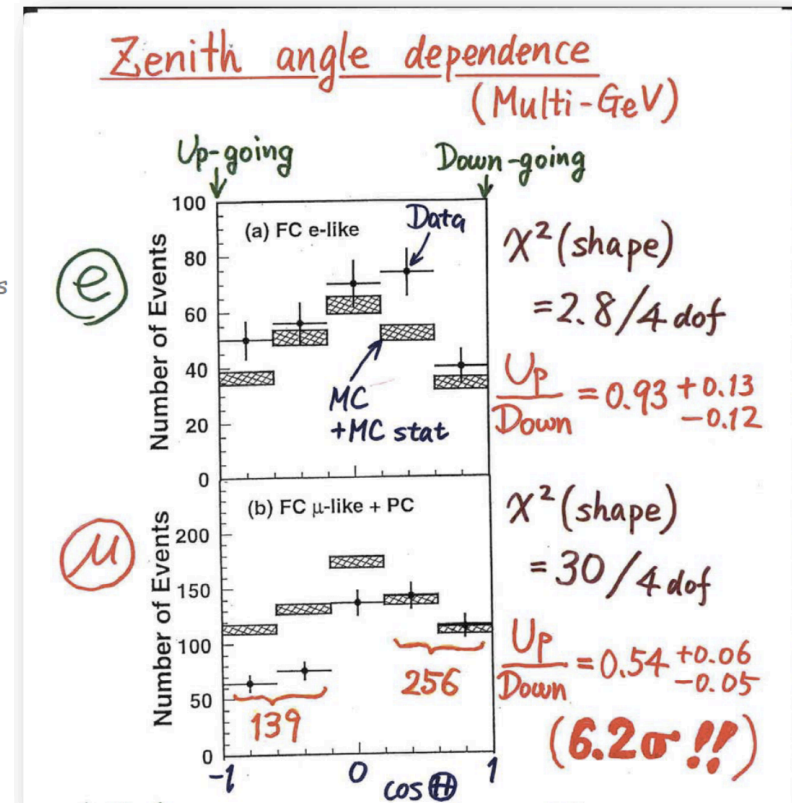
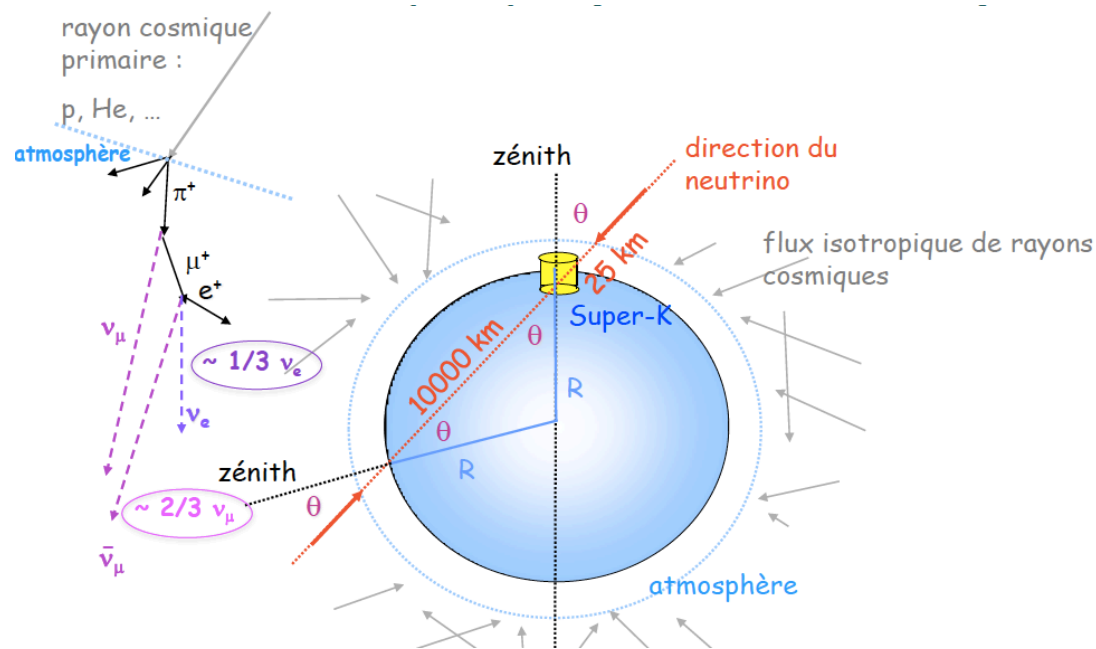


Muon-like ring (sharp)

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

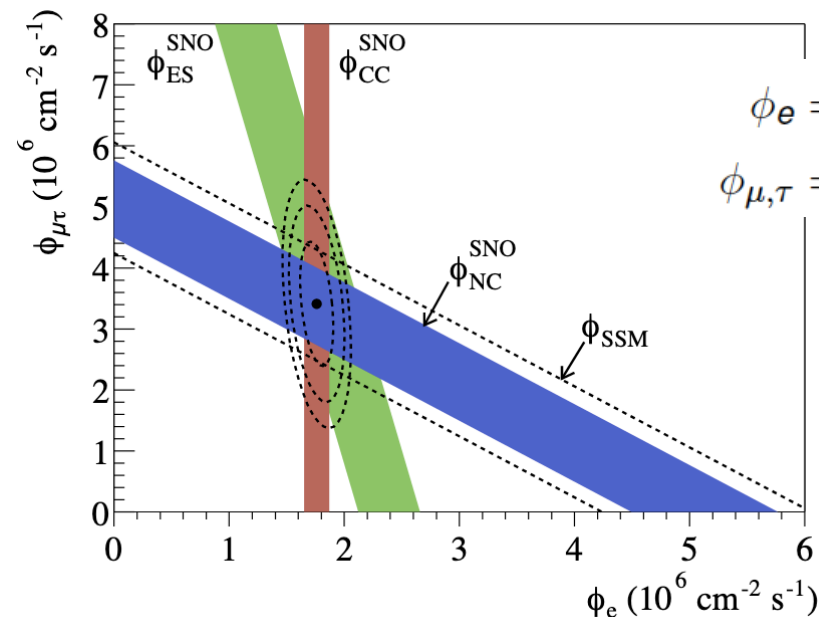
2002 : SNO résout le problème des neutrinos solaires

L'utilisation de 1 kt d'eau lourde D_2O permet
3 réactions en fonction de la saveur

CC : $\nu_e \text{ d} \rightarrow \text{p p e}^-$

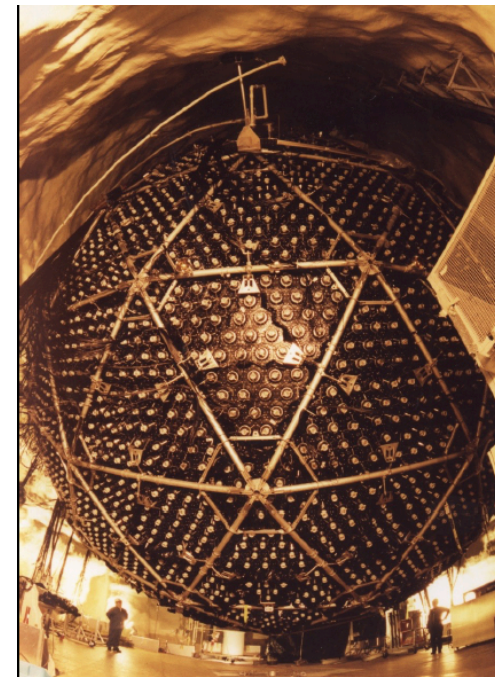
NC : $\nu_\alpha \text{ d} \rightarrow \text{p n } \nu_\alpha$

ES : $\nu_\alpha \text{ e}^- \rightarrow \text{e}^- \nu_\alpha$



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

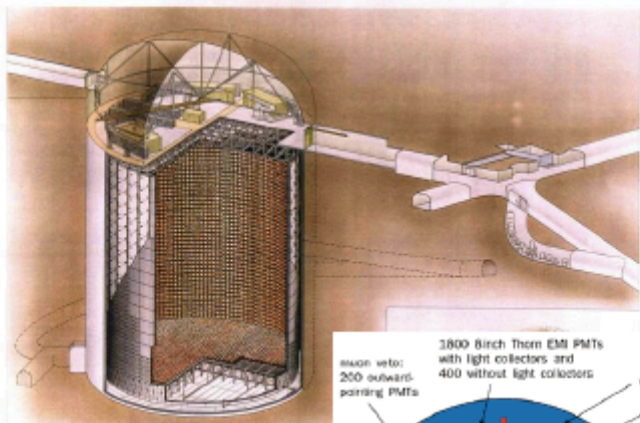
$$\phi_{\mu,\tau} = 3.41^{+0.45}_{-0.45} (stat)^{+0.48}_{-0.44} (syst)$$



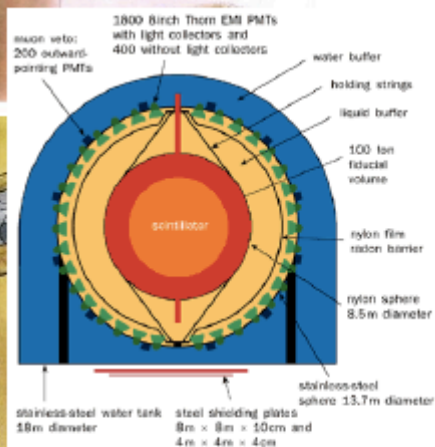
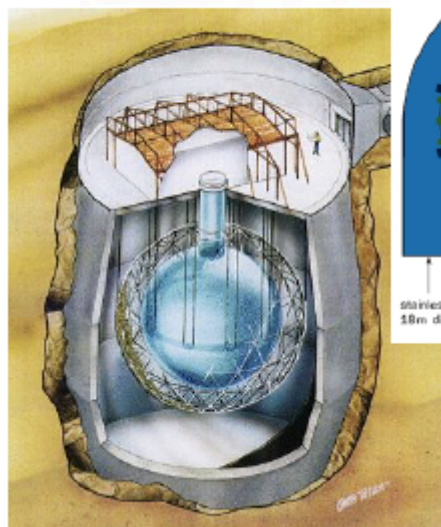
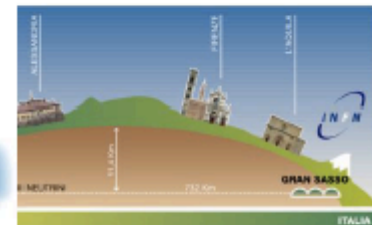
Sudbury Neutrino
Observatory (Canada)

- 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

SuperKamiokande

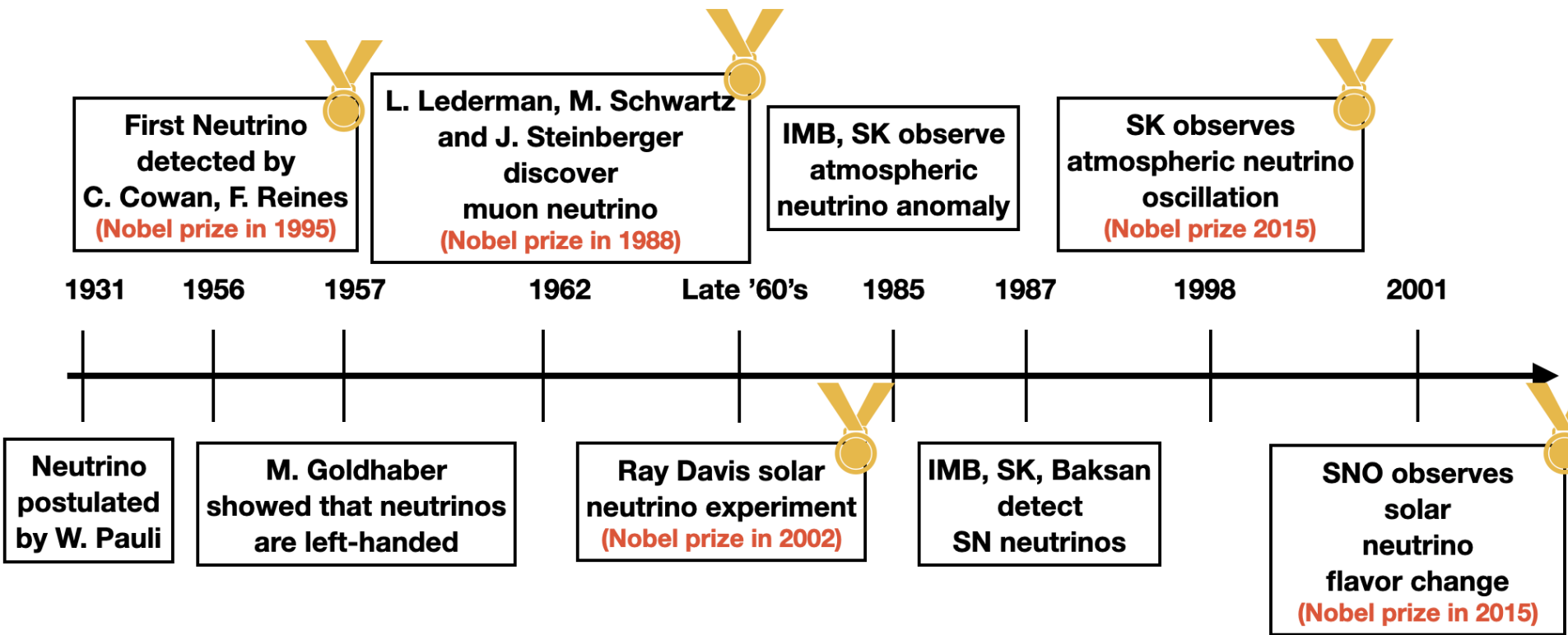


MINOS, Opera



SNO Borexino





- 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









OSCILLATIONS DES NEUTRINOS



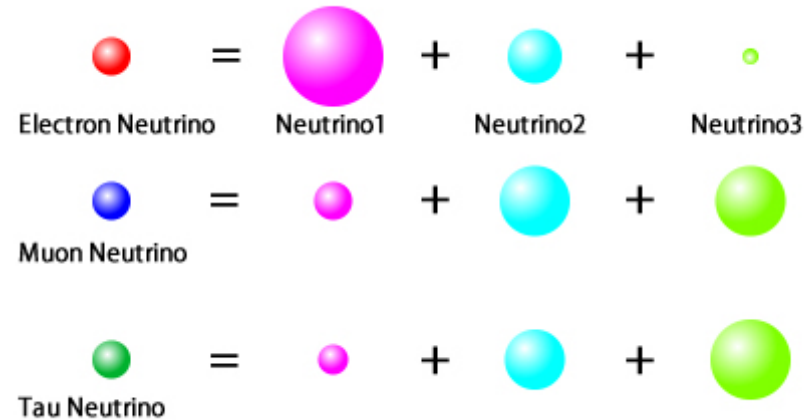
Illustrations © Johan Jämesård/The Royal Swedish Academy of Sciences



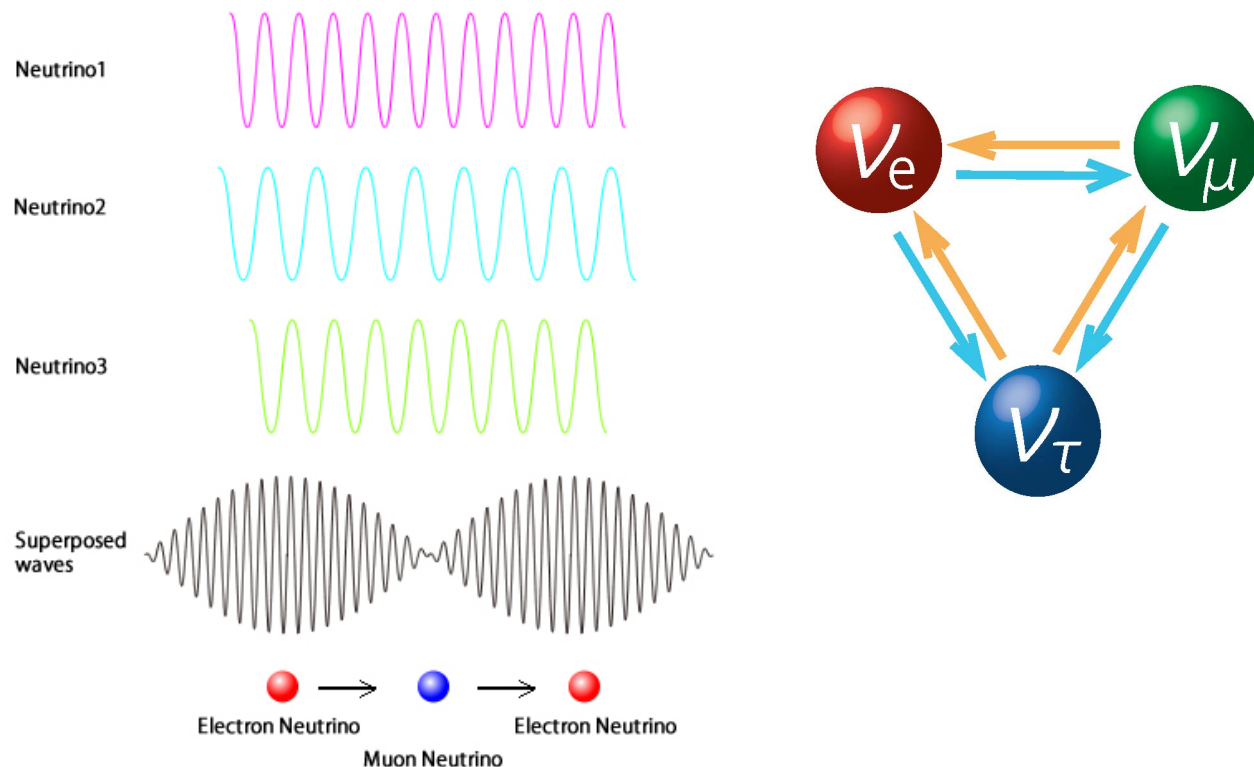
www.cea.fr

Flavor	Mass
 Electron Neutrino	 m_1 Neutrino1
 Muon Neutrino	 m_2 Neutrino2
 Tau Neutrino	 m_3 Neutrino3

- 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.



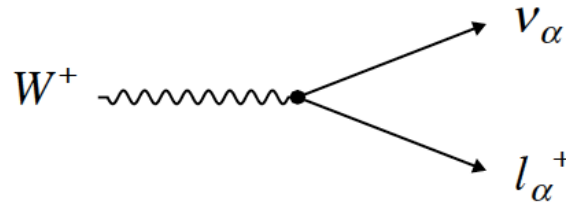
- Les états propres de saveur et les états propres de masse ne peuvent pas être déterminés en même temps.
- Pour donner un exemple, le neutrino de l'électron est l'état de mélange du neutrino1, du neutrino2 et du neutrino3. C'est ce qu'on appelle le mélange de neutrinos.



- 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.

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

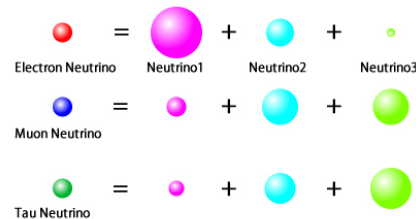
$$\mathcal{L}_{\text{gauge-lepton}} \supset -\frac{g}{\sqrt{2}} \bar{l}'_{Li} \underbrace{(U_l^\dagger U_\nu)_{ij}}_{U_{PMNS}} \gamma_\mu W_\mu^- \nu'_{Lj} + h.c.$$



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

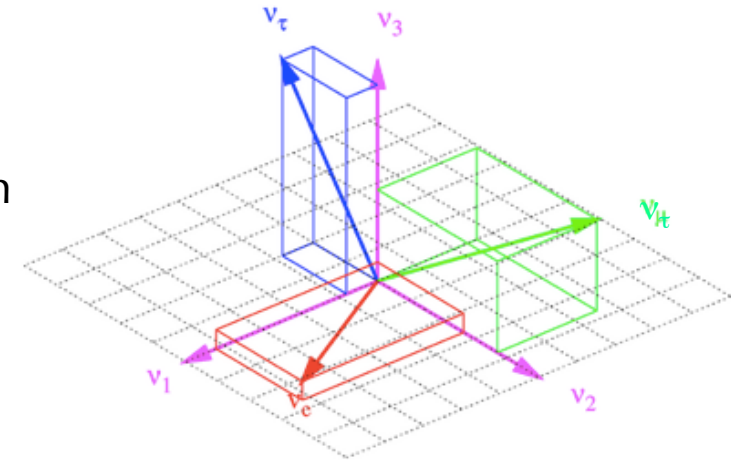
Les états de saveurs
produits par courant
chargé de l'interaction faible

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



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

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



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

- 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 oscillation des neutrinos et des anti-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-relativistes : $E_i(\mathbf{p}) - E_j(\mathbf{p}) \simeq \frac{1}{2} \frac{m_i^2 - m_j^2}{|\mathbf{p}|}$.
- Neutrinos se propagent pratiquement à la vitesse de la lumière : $L \simeq t - t_0, v_i \simeq c$

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

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

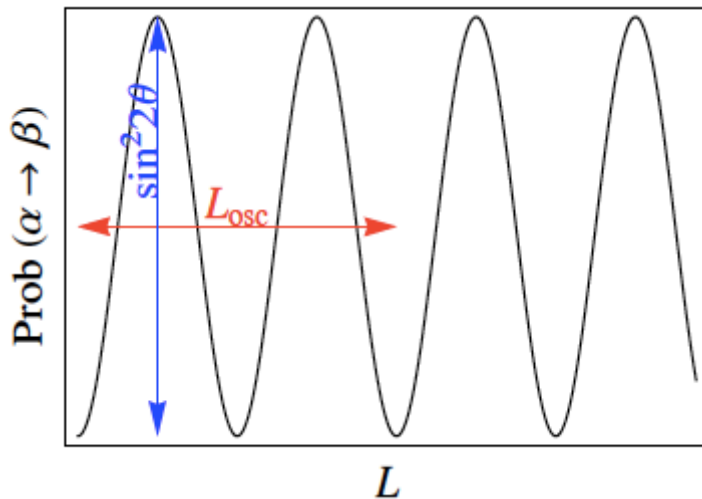
La probabilité d'oscillation dépend de :

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

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

Amplitude

Fréquence



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

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

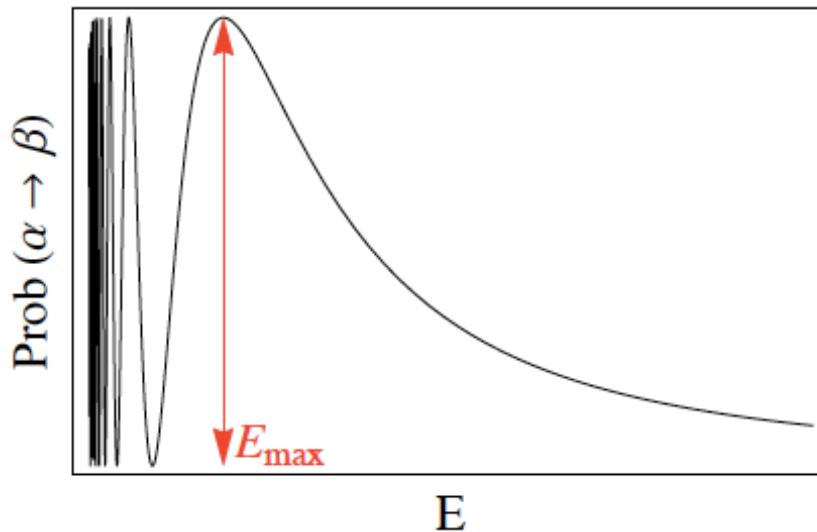
La probabilité d'oscillation dépend de :

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

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

Amplitude

Fréquence



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

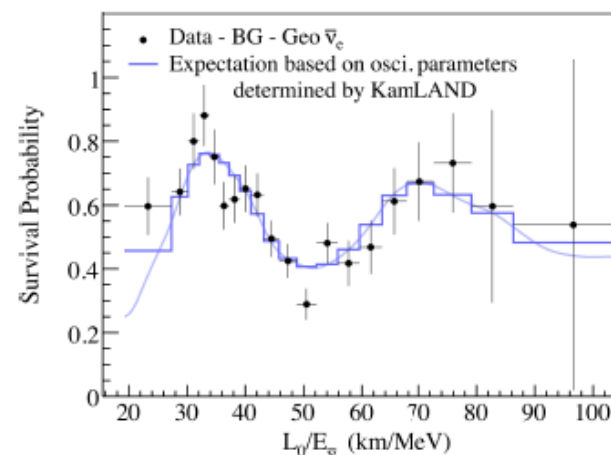
- La dépendance en L , E donne Δm^2
- L'amplitude de l'oscillation donne θ

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

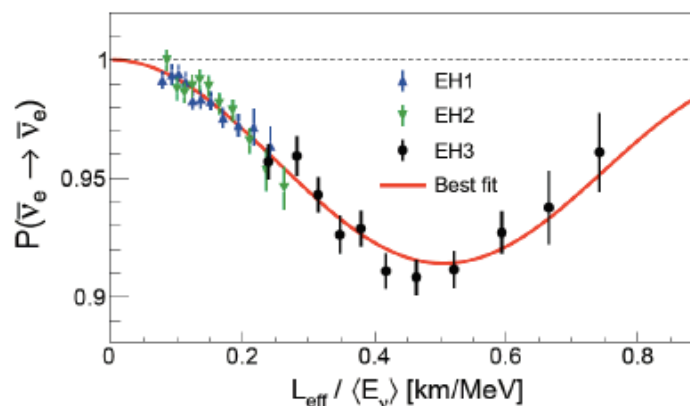
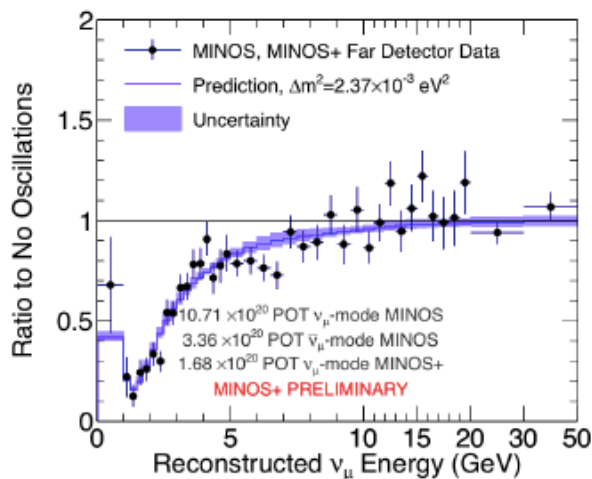
$$\Delta m_{\text{sol}}^2 \sim \frac{\mathcal{O}(\text{MeV})}{\mathcal{O}(100\text{km})}$$

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



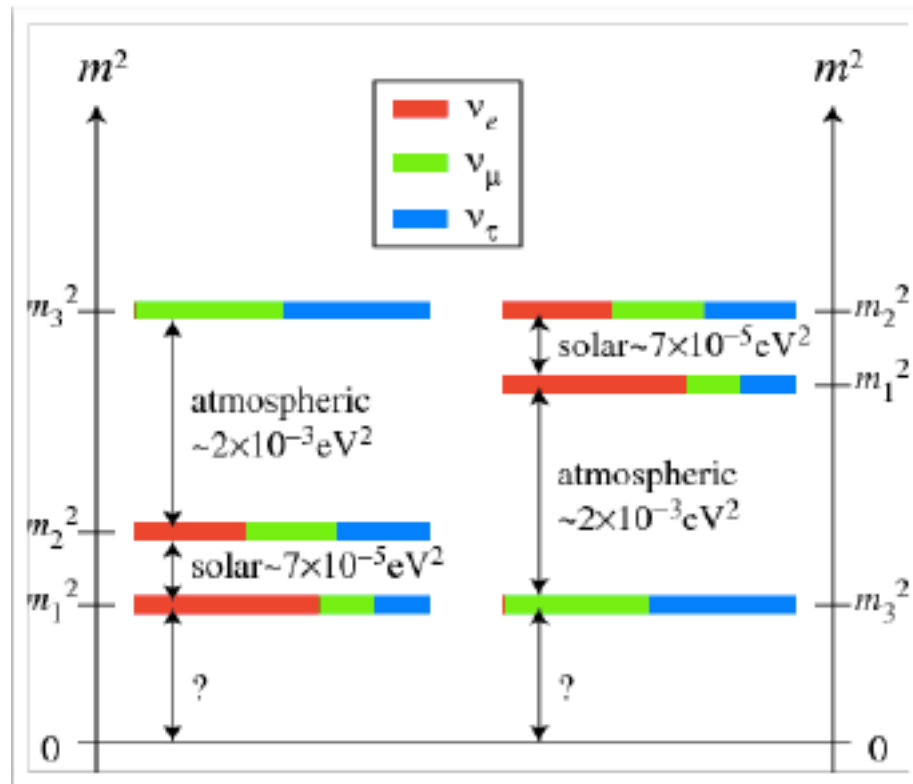
$$|\Delta m_{\text{atm}}^2| \sim \frac{\mathcal{O}(\text{GeV})}{\mathcal{O}(1000\text{km})} \sim \frac{\mathcal{O}(\text{MeV})}{\mathcal{O}(1\text{km})}$$

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



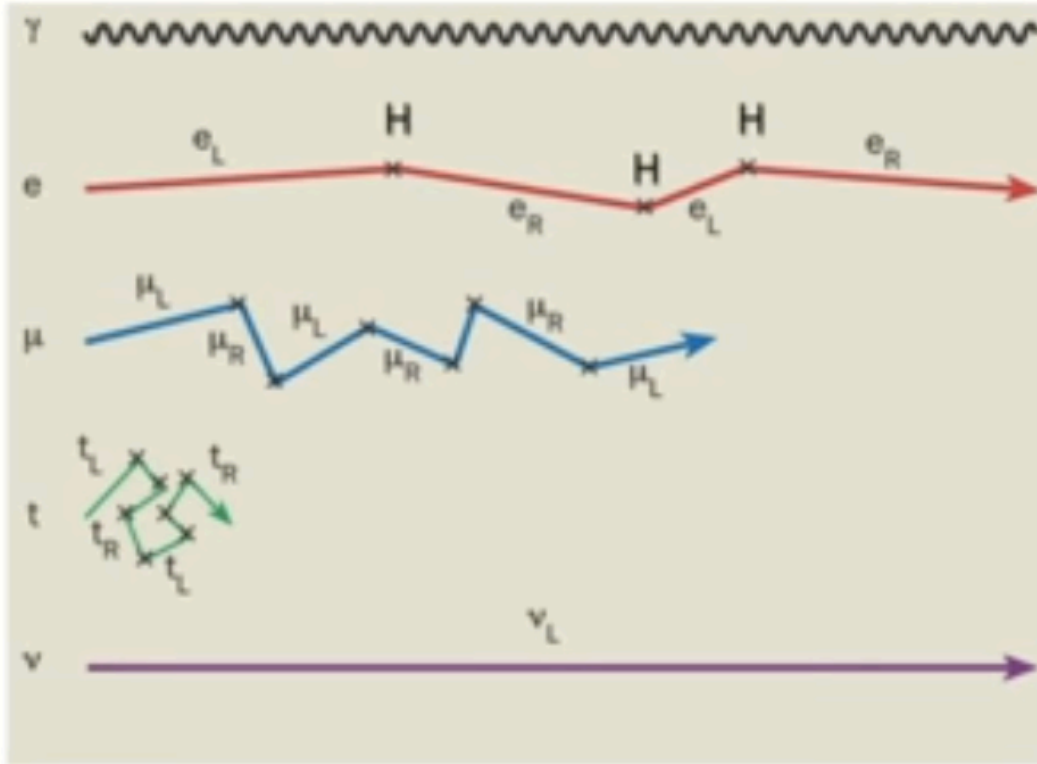
Daya Bay

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

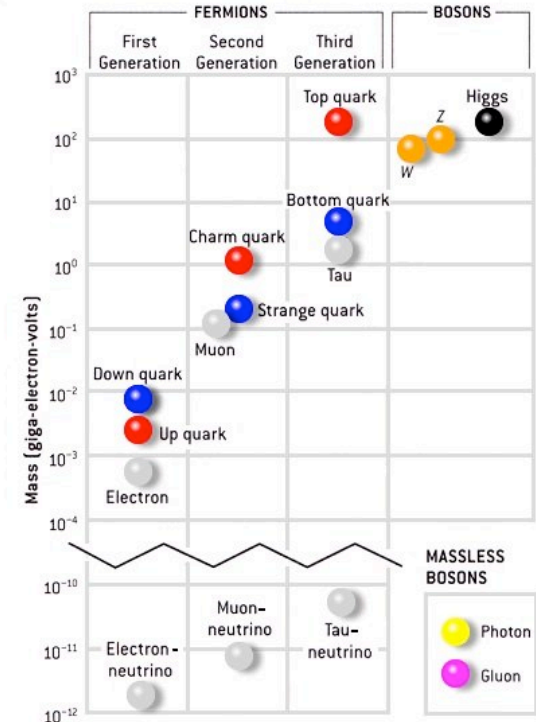


- La probabilité d'oscillation est sensible au carré des différences de masse des trois neutrinos :
 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$
- Est ce que $m_3 > m_2 > m_1$ ou alors l'ordre est inversé ?

MÉCANISME DE LA BALANCE : SEE-SAW



Neutrinos de Majorana

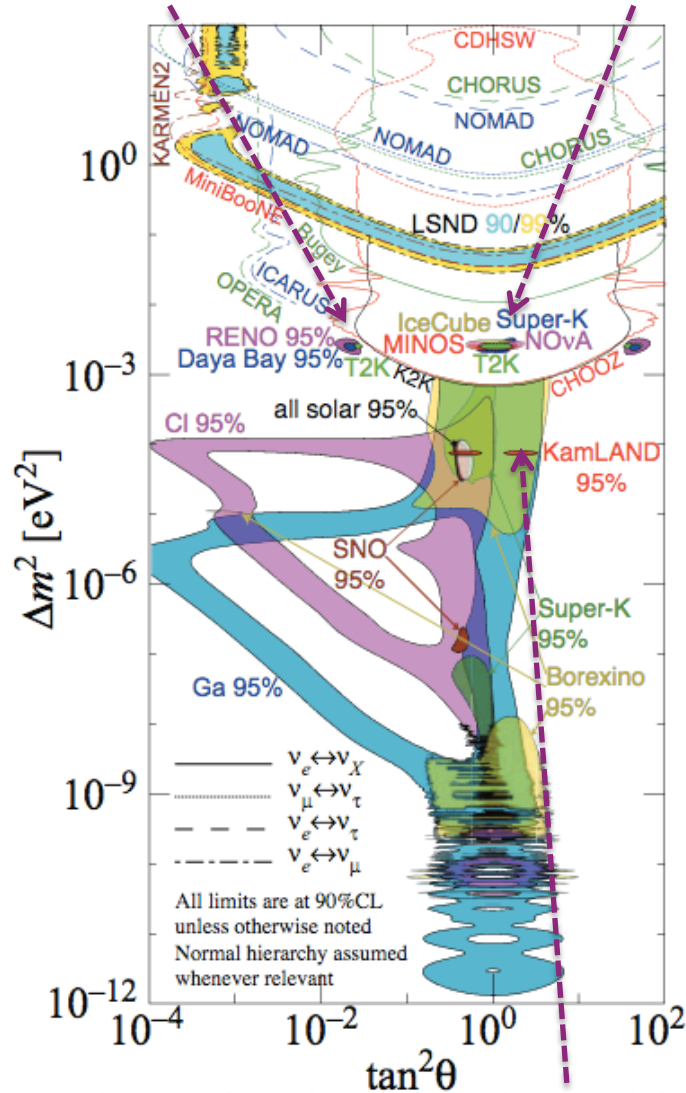


- La physique des neutrinos est entrée dans une ère des mesures de précision
- **Questions ouvertes**
 - Quelles sont les valeurs précises des paramètres d'oscillation ?
 - Quelle est l'échelle de masse des neutrinos ? Pourquoi si petite ?
($0 < m_\nu < 0.1 \text{ eV}$, masse de l'électron = $511\,000 \text{ eV}$)
 - 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 ?

$$\begin{array}{ccc} \text{Neutrino} & ? & \text{Antineutrino} \\ \nu & = & \bar{\nu} \end{array}$$

Reactor Sector

Atmospheric Sector

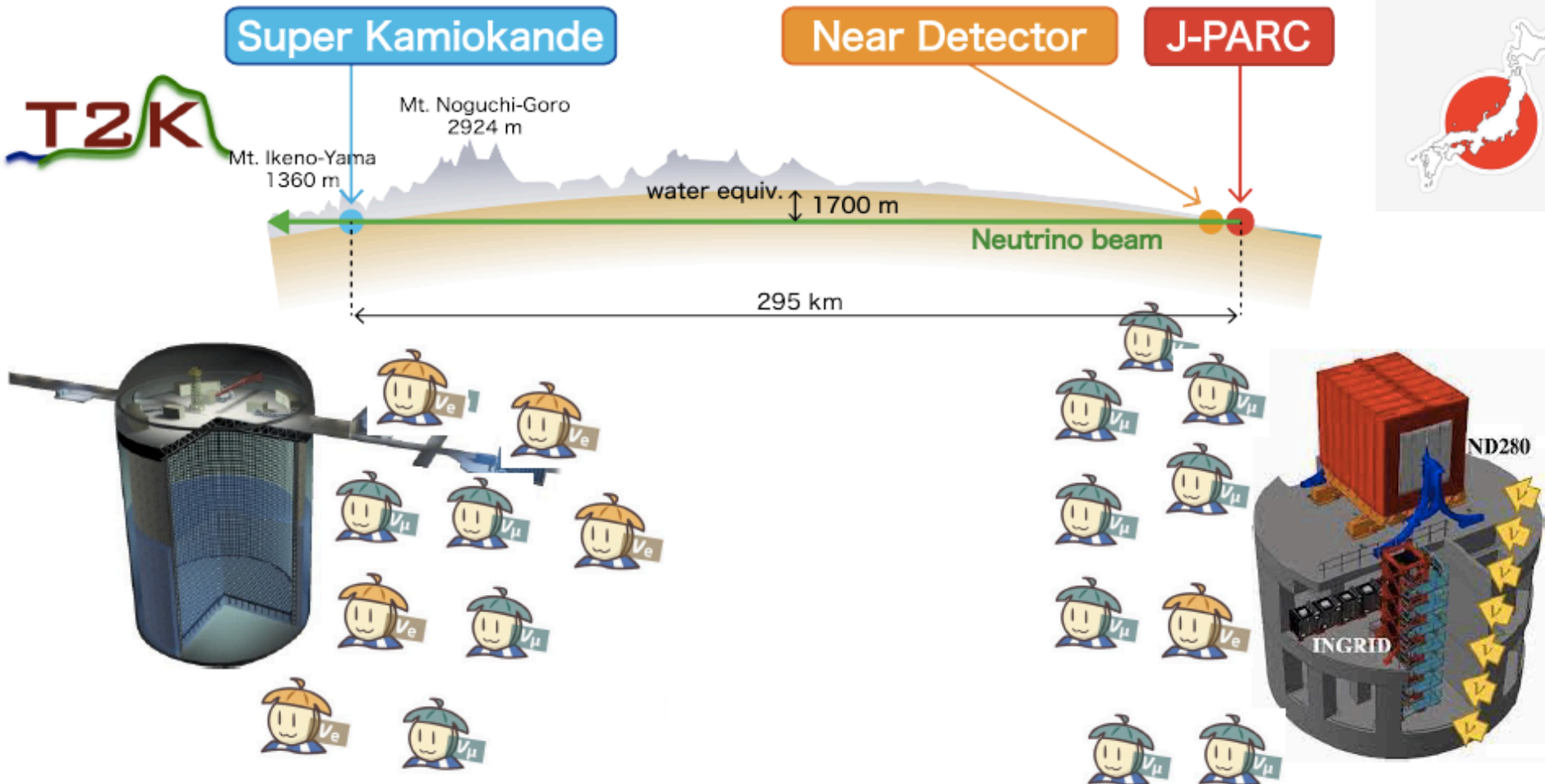


Solar Sector

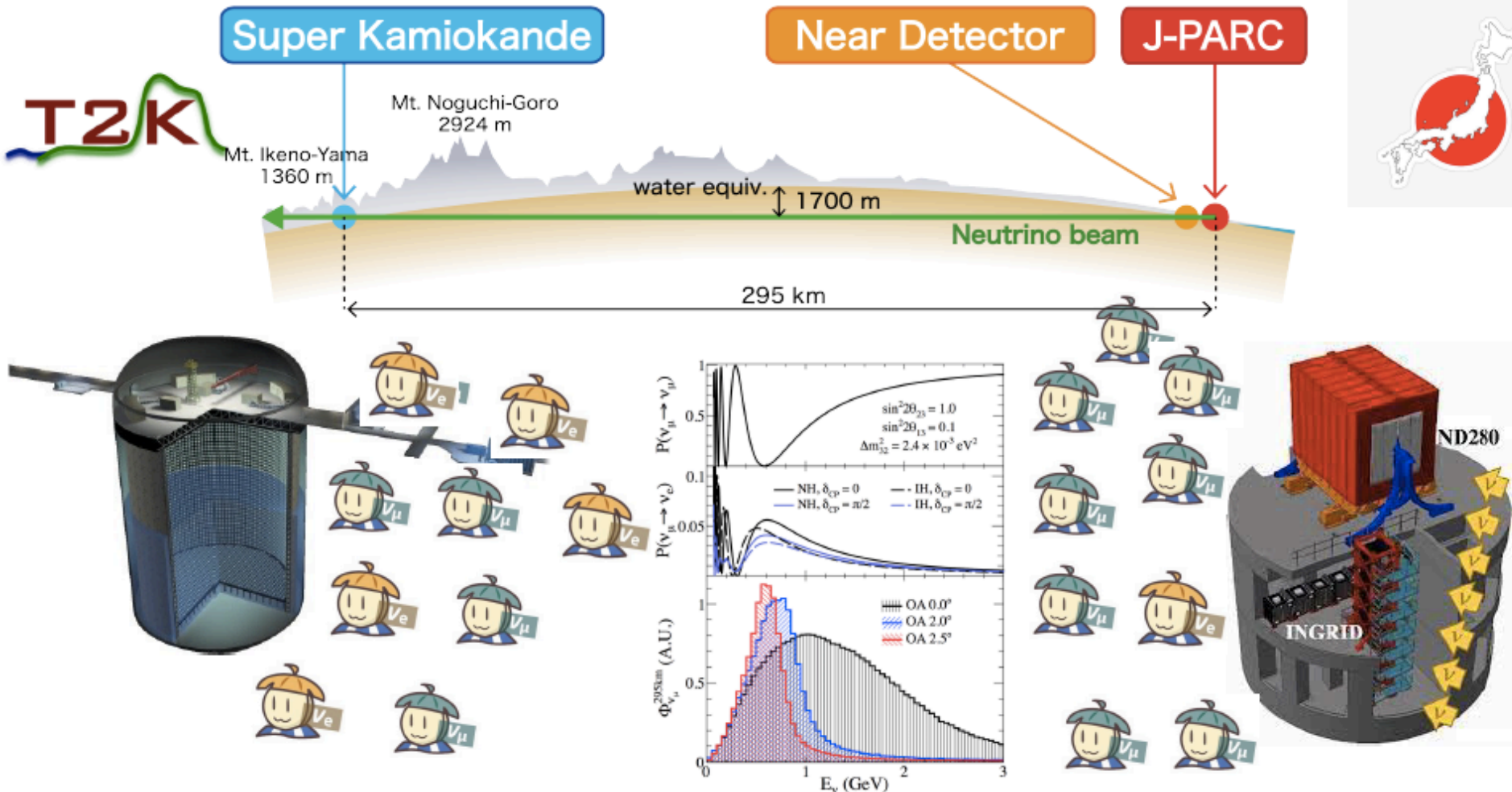
parameter	best fit $\pm 1\sigma$	3σ range
Δm_{21}^2 [10^{-5}eV^2]	$7.50^{+0.22}_{-0.20}$	6.94–8.14
$ \Delta m_{31}^2 $ [10^{-3}eV^2] (NO)	$2.56^{+0.03}_{-0.04}$	2.46–2.65
$ \Delta m_{31}^2 $ [10^{-3}eV^2] (IO)	2.46 ± 0.03	2.37–2.55
$\sin^2 \theta_{12} / 10^{-1}$	3.18 ± 0.16	2.71–3.70
$\sin^2 \theta_{23} / 10^{-1}$ (NO)	$5.66^{+0.16}_{-0.22}$	4.41–6.09
$\sin^2 \theta_{23} / 10^{-1}$ (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
$\sin^2 \theta_{13} / 10^{-2}$ (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.

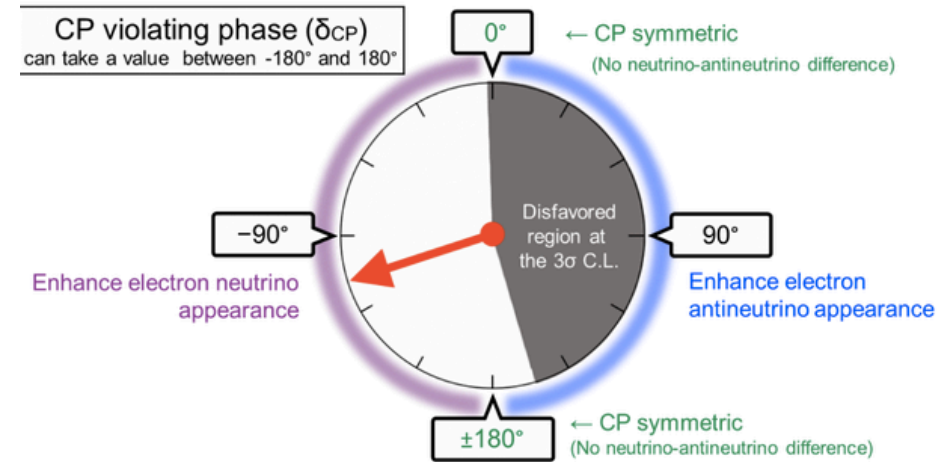
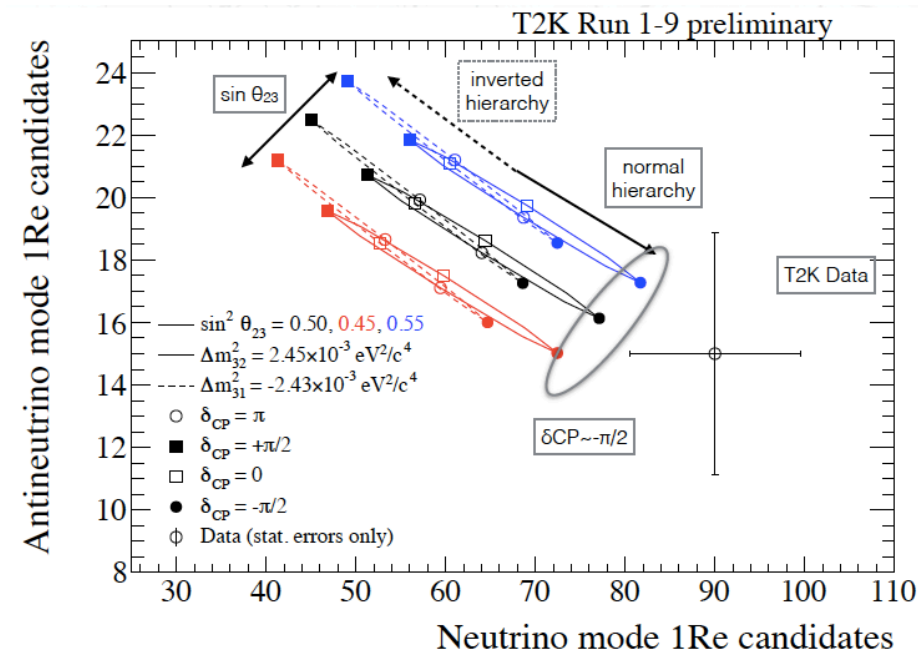


Neutrino cartoons by Yuki Akimoto



Off-axis angle

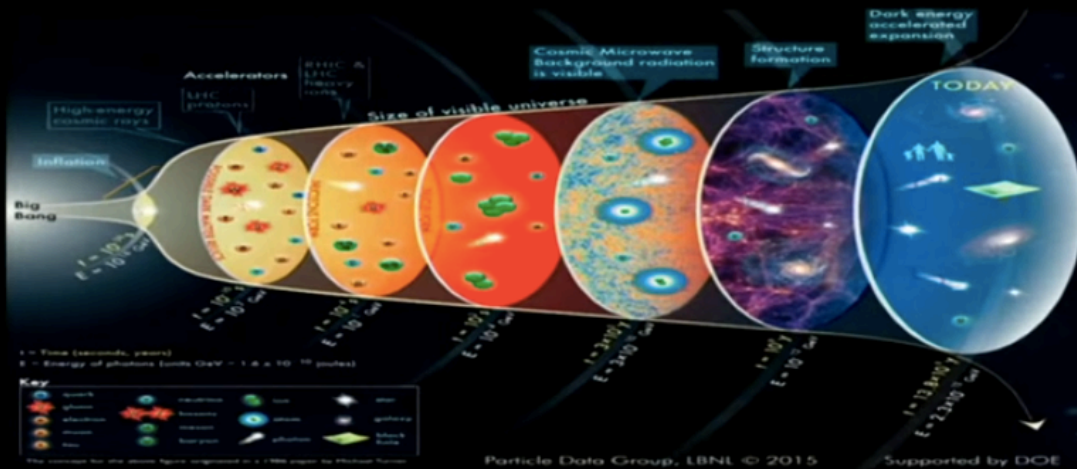
Neutrino cartoons by Yuki Akimoto



- 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 leptonique

Disparition de l'antimatière de notre Univers



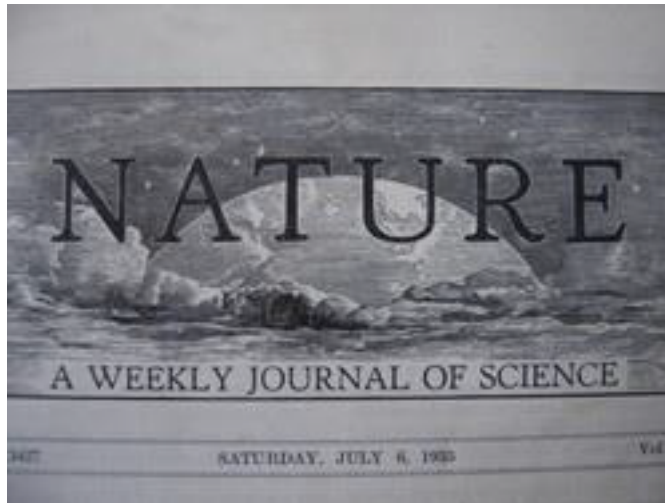
Les 3 conditions de Sakharov pas satisfaites

- 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 »



1930



“ Fermi’s theory of weak interactions : contains speculations too remote from reality to be of interest to the reader?”

2020



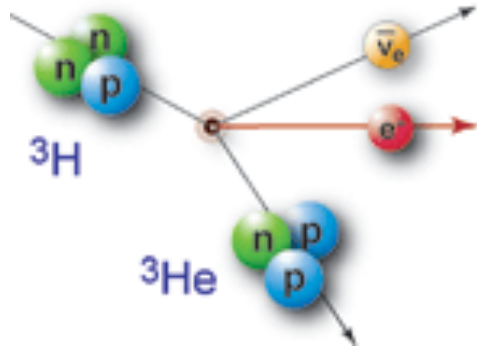
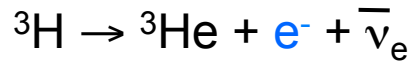
DE LA RECHERCHE À L'INDUSTRIE



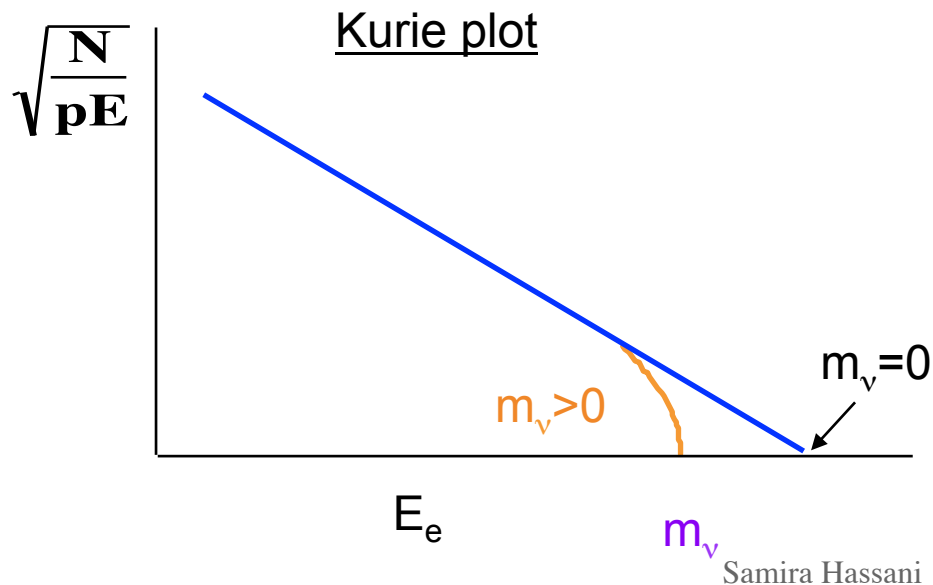
BACKUP



www.cea.fr



Limite : $m(\nu_e) < 0.8 \text{ eV}$



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