

Plus de 60 ans de v . . .



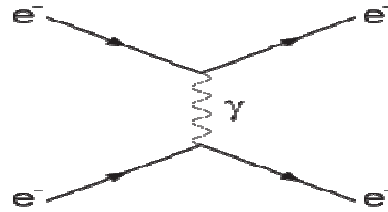
. . . et pas une ride

**NEUTRINO 2016**  
Imperial College, London, UK  
July 2016



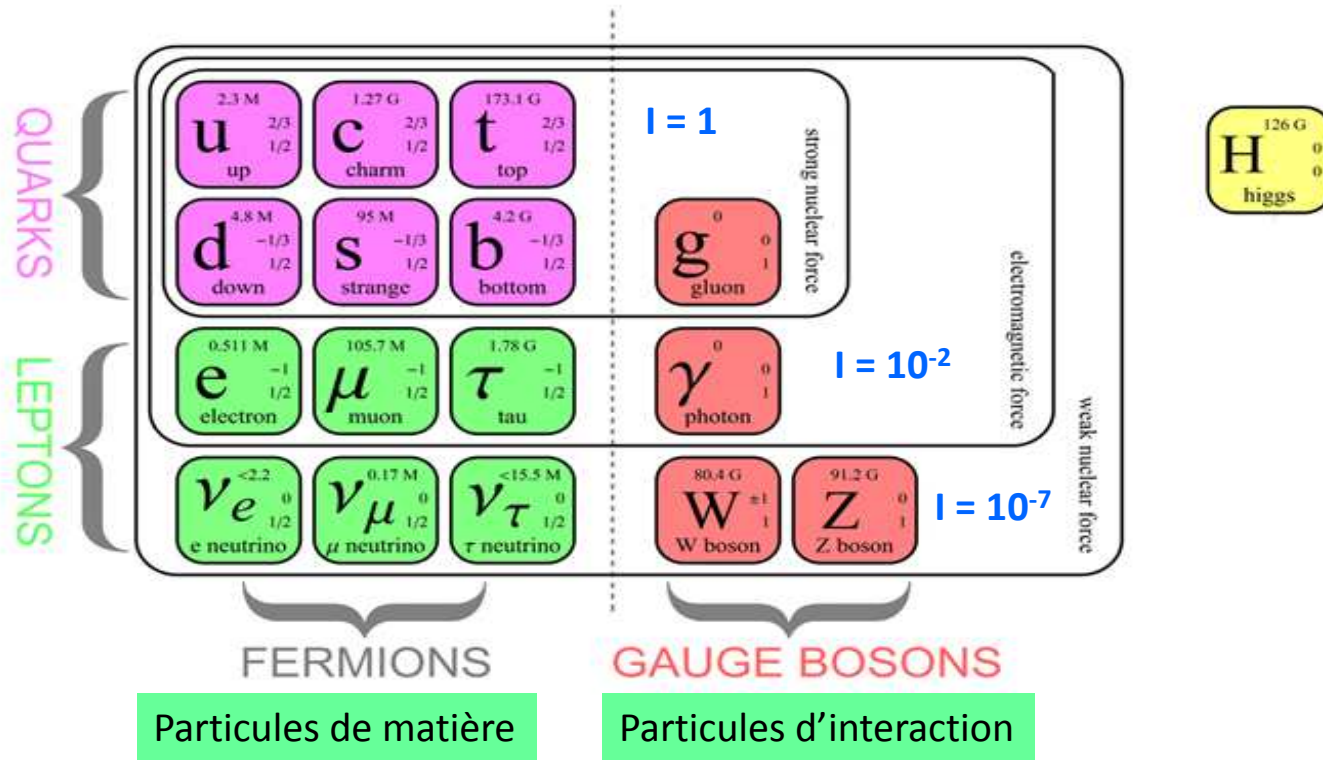
# Le modèle Standard

Modèle de particules élémentaires et leurs interactions



Agrégats de Quarks

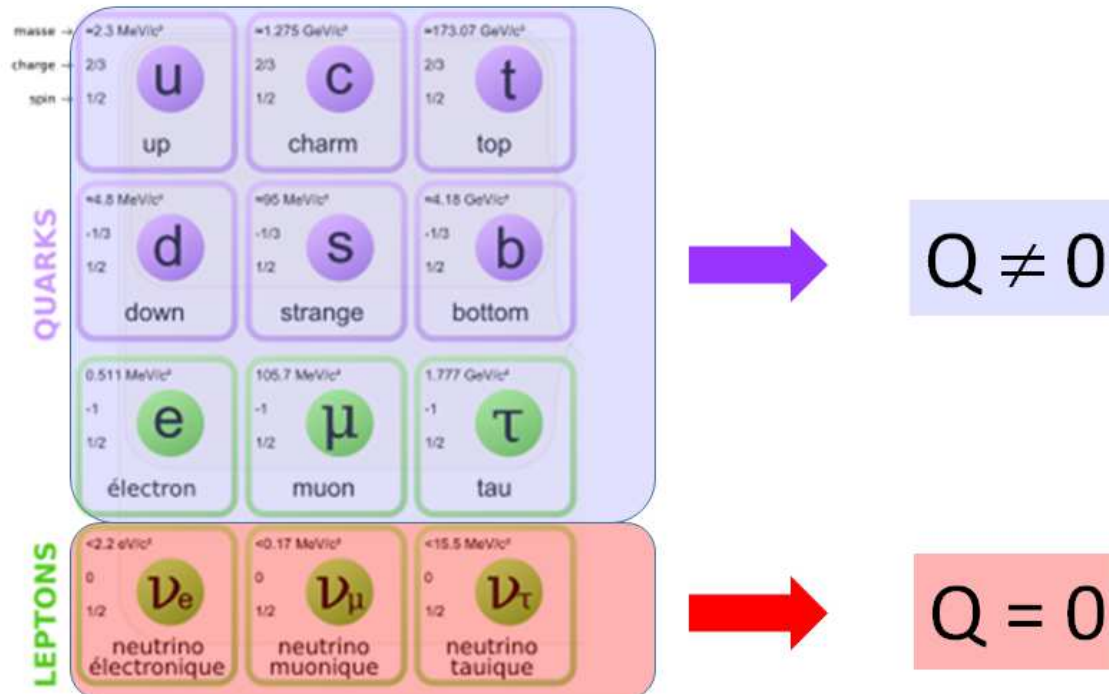
p	uud	$\pi^+$	$u\bar{d}$
$\bar{p}$	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	$K^-$	$s\bar{u}$
n	udd	$\rho^+$	$u\bar{d}$
$\Lambda$	uds	$B^0$	$d\bar{b}$
$\Omega^-$	sss	$\eta_c$	$c\bar{c}$



# Particules de matière

## Charge électrique

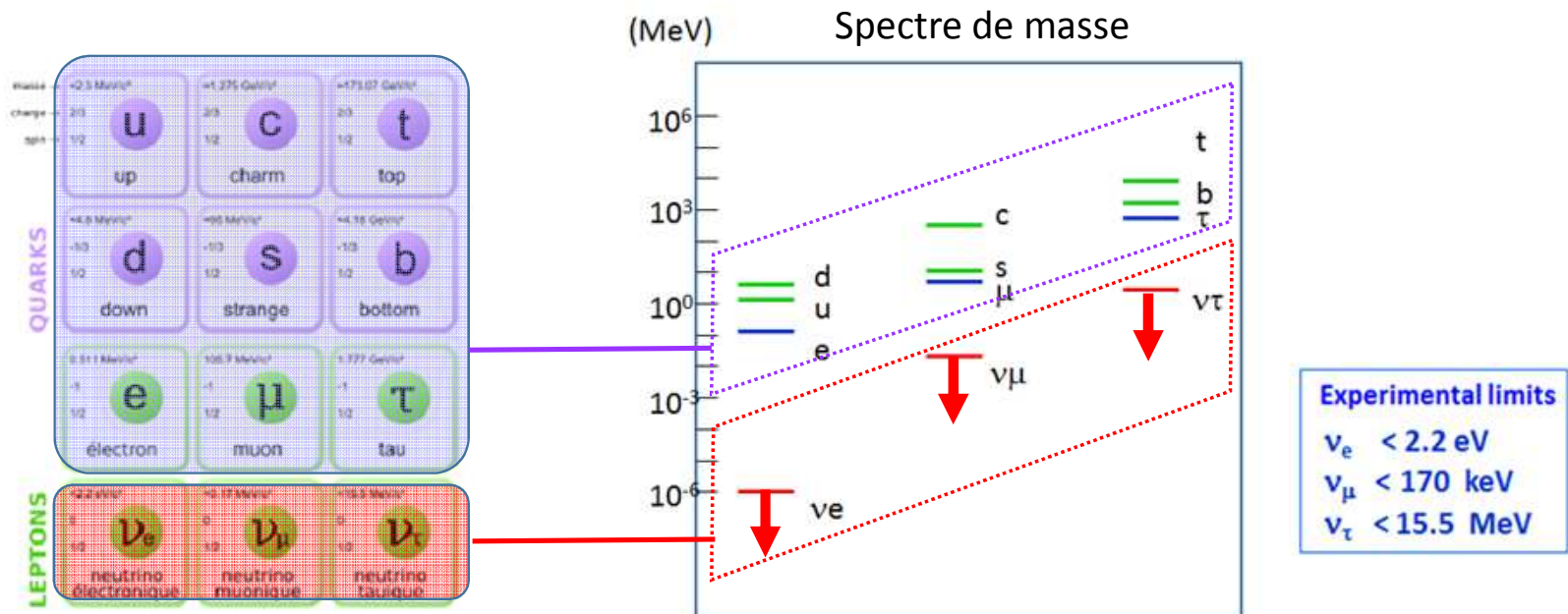
*Le neutrino est l'unique particule élémentaire neutre*



# Particules de matière

## Masse

*Le neutrino est l'unique particule élémentaire sans masse déterminée*



REMARQUE : dans la version de base du SM (modèle minimal)  
le neutrino possède une masse = 0 !

# Particules de matière

## Nature

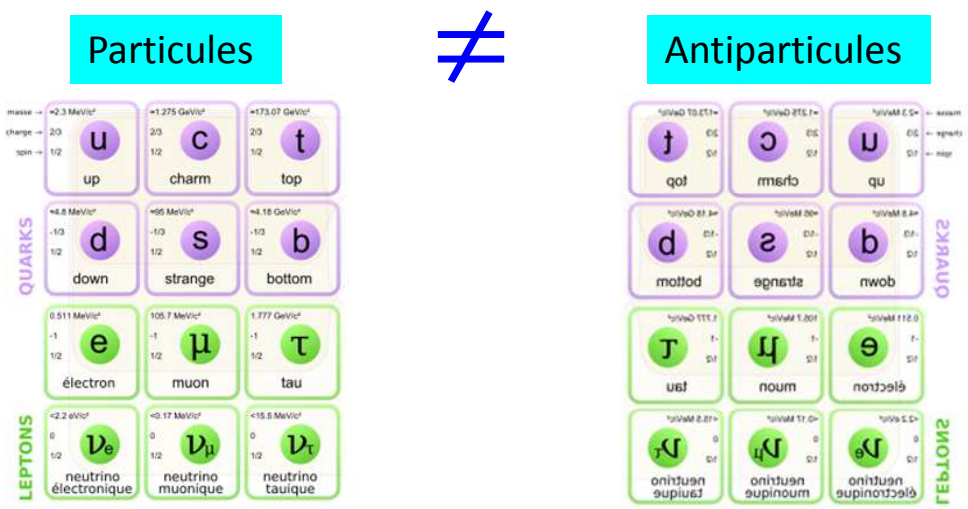
Equation  
quantique  
relativiste

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi^c = 0$$

Solutions énergie positive : **particules**  
Solutions énergie négative : **antiparticules**



Dirac 1928



Dans le Modelé Standard  
les particules sont des  
particules de Dirac

Solutions réelles de l'équation de Dirac => **Particule ≡ Antiparticule**

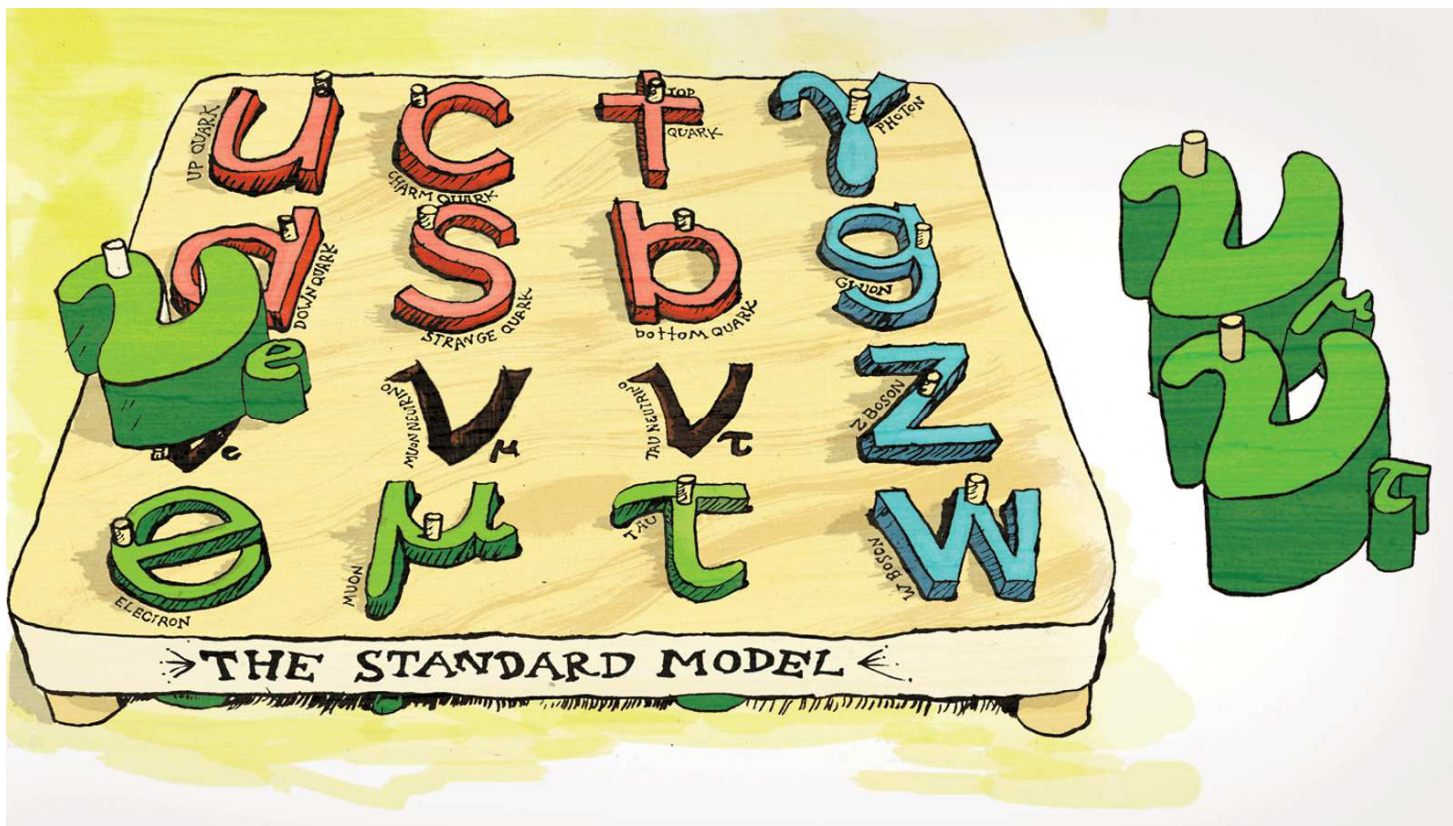
Seulement valable pour particules neutres : **neutrinos**

**Nature du neutrino : Dirac ou Majorana ???**

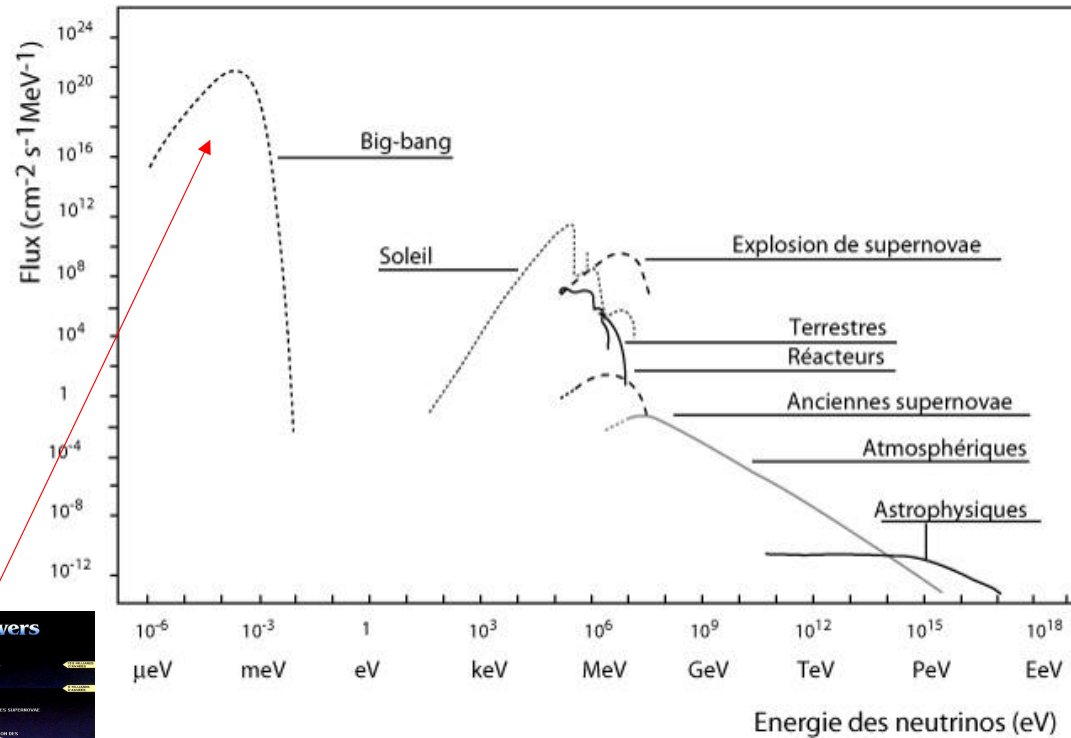


Majorana 1937

Le neutrino est une particule qui n'est pas « très standard »



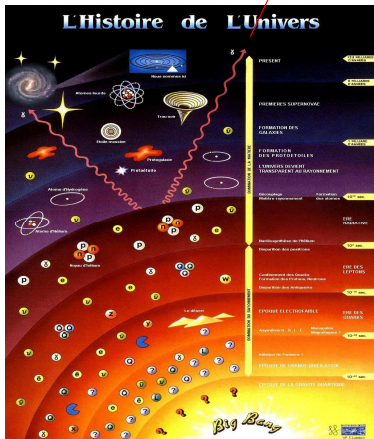
# Abondance des neutrinos dans l'Univers



Le neutrino est la 2<sup>ème</sup> particule la plus abondante de l'Univers

- 400 photons/cm<sup>3</sup>
- 340 neutrinos/cm<sup>3</sup>
- 5. 10<sup>-7</sup> proton /cm<sup>3</sup>

*Une meilleure compréhension de la physique du neutrino conduit à une meilleure compréhension de l'Univers*



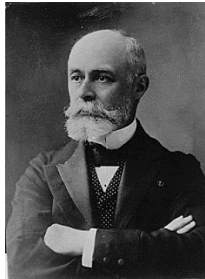
Découplage des neutrinos quelques secondes après le Big Bang



Pourquoi a-t-on besoin des  
neutrinos ?

# RADIOACTIVITÉ

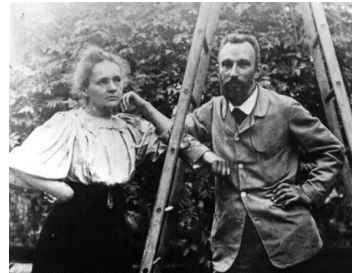
Fin 19<sup>eme</sup> début 20<sup>eme</sup> siècle



Becquerel



Rutherford



Curie



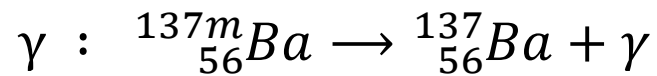
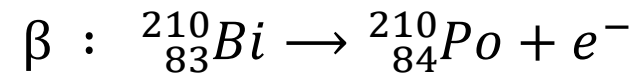
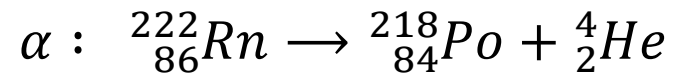
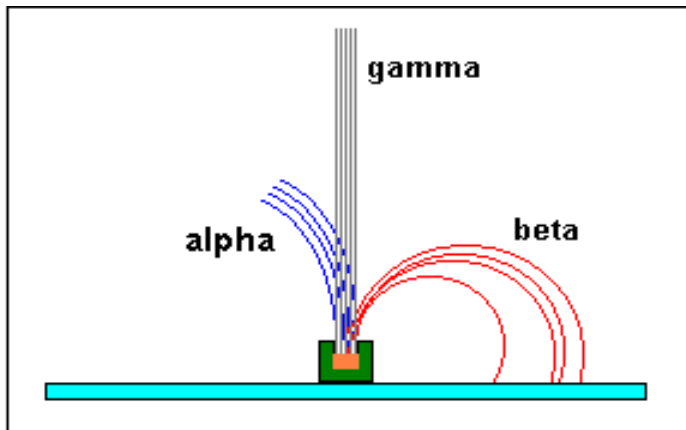
Soddy



Geiger

...

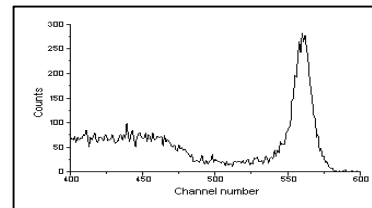
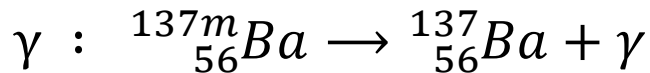
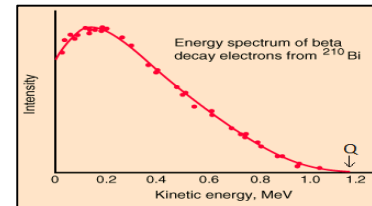
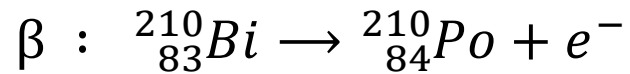
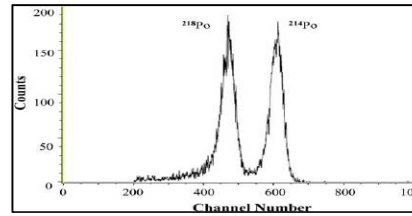
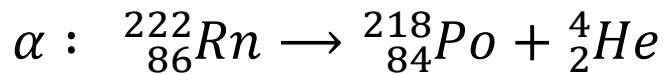
Trois type de décroissance



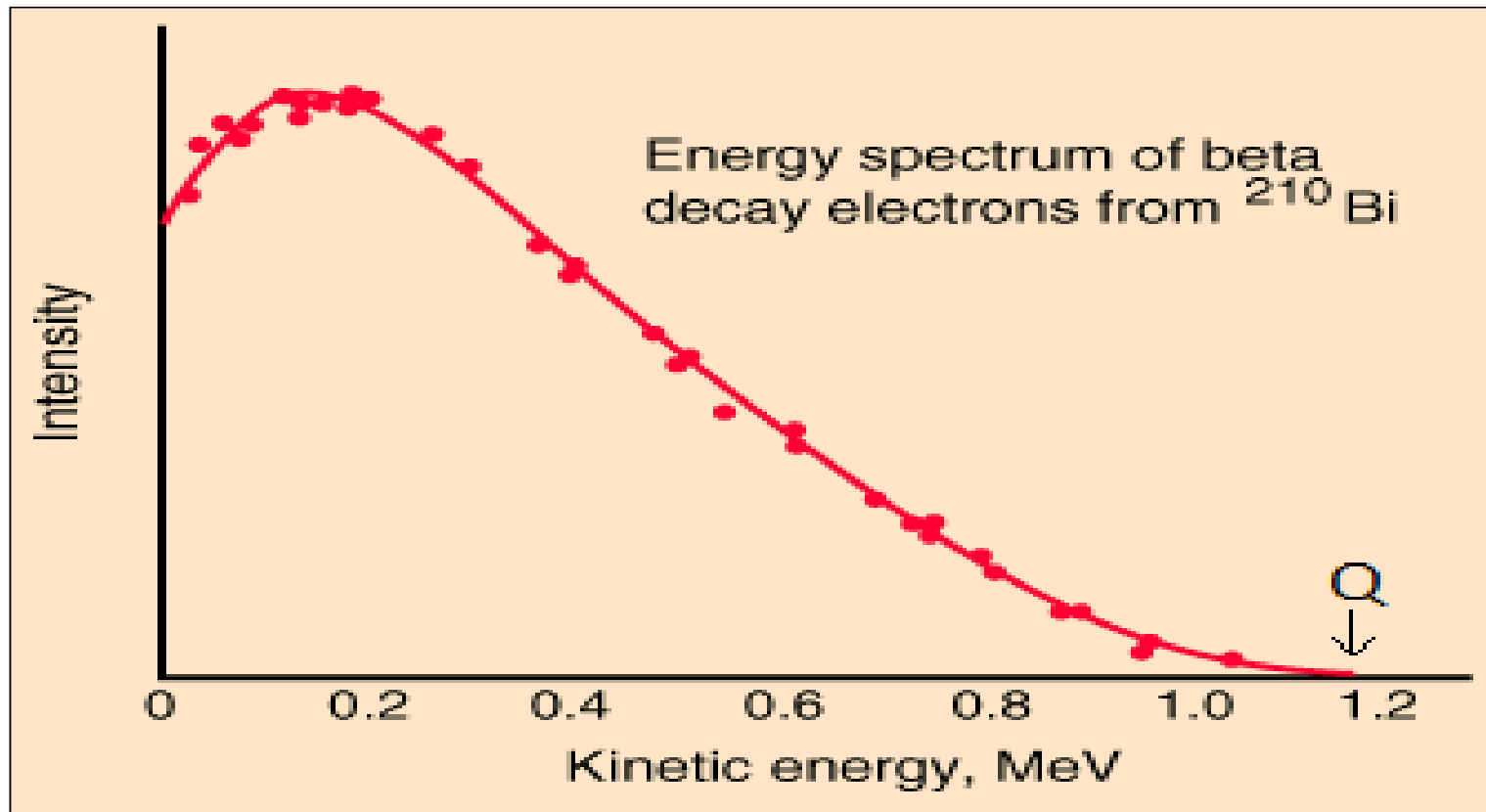
Modèle général de décroissance :  $\boxed{{}_Z^A X \rightarrow {}_{Z'}^{A'} X' + \text{particule}}$

Conservation de l'énergie  
 Conservation de l'impulsion

$$\Rightarrow E_p = (M_X - M_{X'} - M_p) \times \frac{M_{X'}}{M_{X'} + M_p} = C^{te}$$



1914 Chadwick découvre le spectre continue des électrons bêta



L' énergie des électrons  $\beta$  est comprise entre 0 et 1162 MeV (pour  $^{210}\text{Po}$ )

## Grand débat et beaucoup d'idées

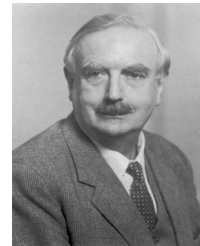
- Non conservation de l'énergie à échelle microscopique
- Processus nucléaire
- Processus secondaire atomique



Meitner



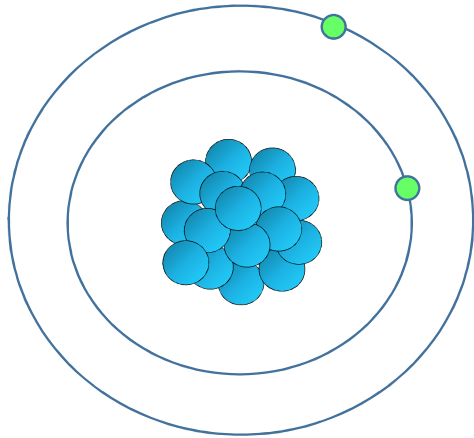
Bohr



Ellis

• • •

## L'atome en 1930



➤ Atome Rutherford - Bohr

➤ Les atomes sont neutres

➤ Particules : proton, électron, photon

{ Noyau chargé positivement  
Masse  $\propto M_{\text{proton}}$   
Electrons avec orbite quantifié

Exemple :  ${}^{12}_6\text{C}$   $\left[ \begin{array}{l} 12 \text{ protons} \Rightarrow 12 \text{ charges positives} \\ 6 \text{ électrons} \Rightarrow 6 \text{ charges négatives} \end{array} \right]$  Atome neutre  $\Rightarrow$  6 électrons nucléaires

└─▶ état neutron : « agglomérat » proton + électron (Rutherford)

# Le remède invraisemblable de Pauli

4 décembre 1930



*Chers dames et messieurs radioactifs,*

*Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le messenger de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la « mauvaise » statistique des noyaux N et Li-6 et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons par ce 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 de 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 est constante.....*

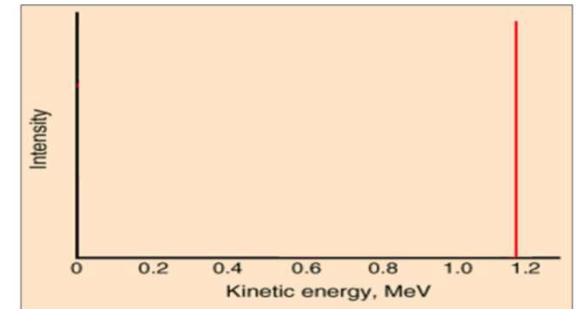
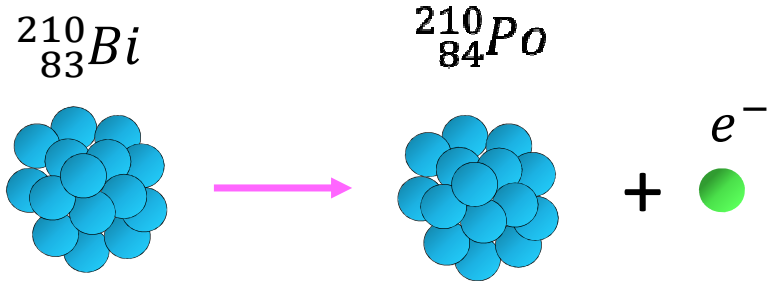
*J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable, car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagner, et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre, est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, Monsieur 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 être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.*

*Votre serviteur le plus dévoué,*

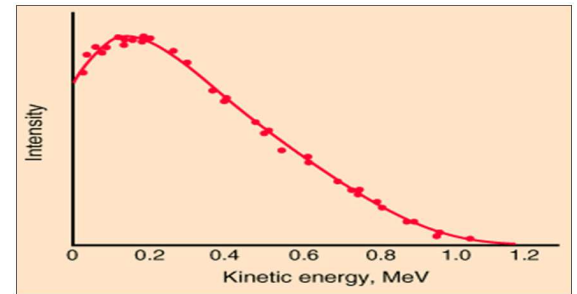
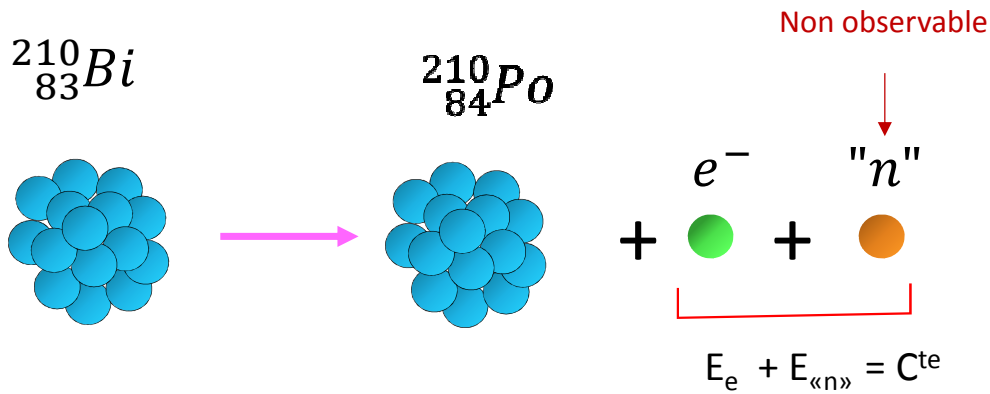
*W. Pauli.*

# Remède de Pauli

Avant Pauli



Pauli

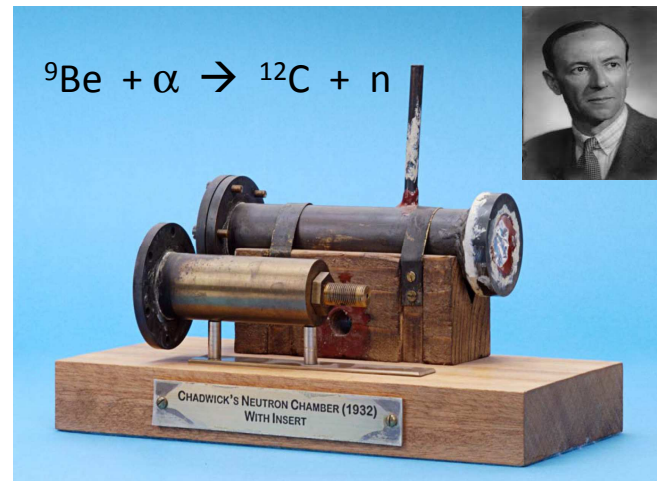




# Petit à petit fait le neutrino son nid



1931  
Pauli parle avec Fermi  
sur son idée a Rome



1932  
Chadwick découvre  
le vrai neutron

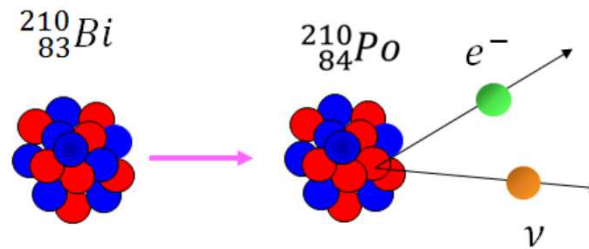
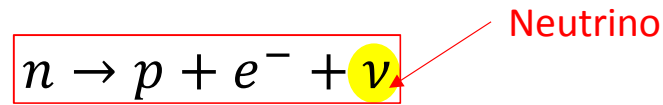


1933  
Congres de Solvay  
Fermi munit ses idées  
sur la décroissance  $\beta$

# Théorie de Fermi sur la désintégration $\beta$

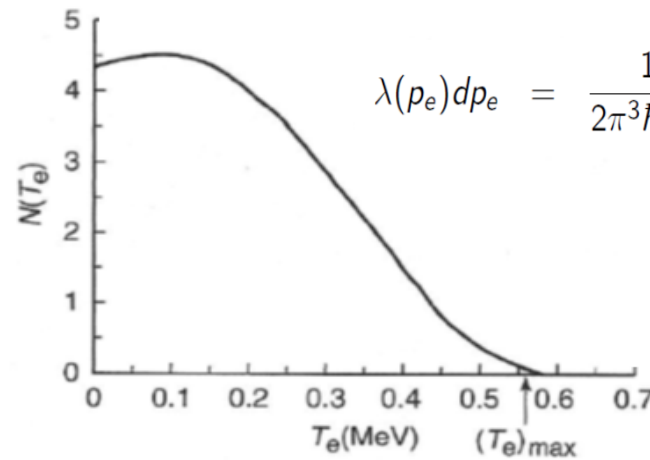
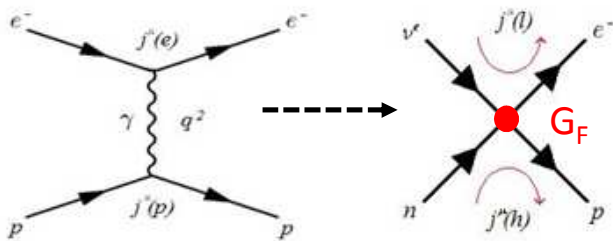


Fermi 1933



Le neutron de Pauli est remplacé par le neutrino de Fermi

Analogie avec l'électrodynamique  
Interaction courant-courant



$$\lambda(p_e) dp_e = \frac{1}{2\pi^3 \hbar^7 c^3} g^2 |M_{if}|^2 F(Z_d, p_e) (Q - T_e)^2 p_e^2 dp_e$$

## La particule indétectable



Bethe



Peierls

1934 Bethe et Peierls calculent la probabilité d'interaction d'un neutrino



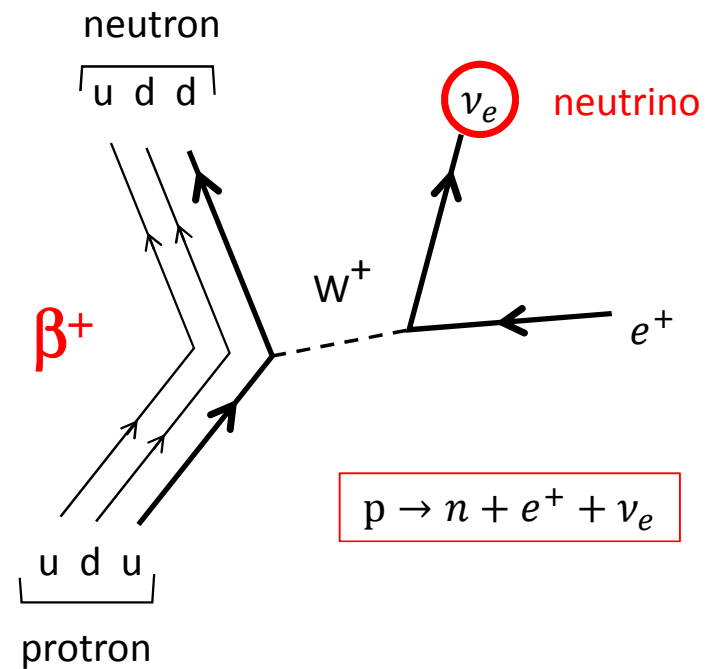
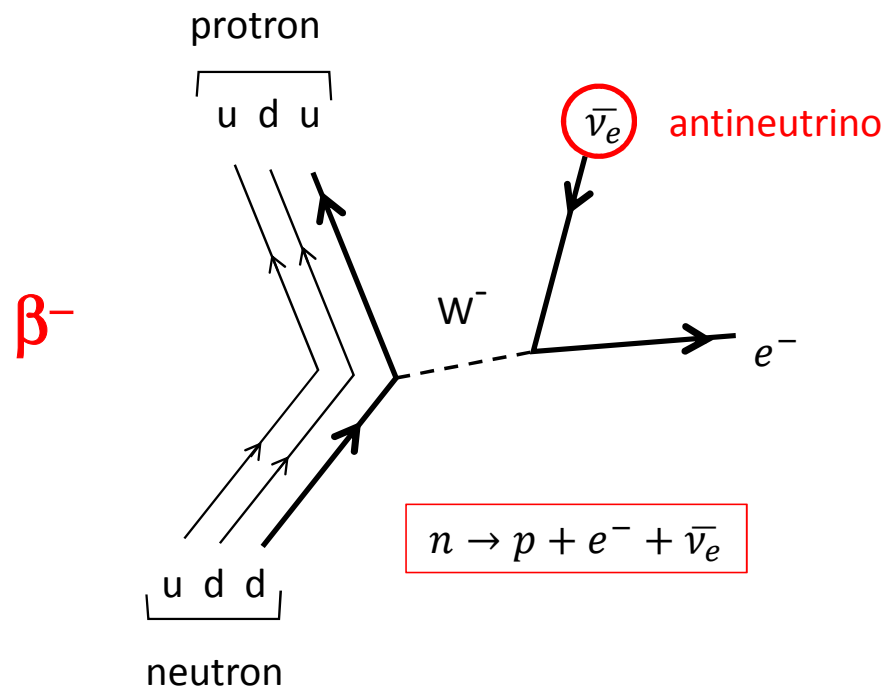
$$\sigma \approx 10^{-44} \text{ cm}^2 @ 2 \text{ MeV} \Rightarrow \text{Distance d'interaction} = \mathbf{1600 \text{ a.l.}}$$

Les neutrinos traversent tout avant d'interagir => impossible de les détecter

Le neutrino c'est une idée non vérifiable

... sauf s'il y en a beaucoup !

# Décroissance bêta aujourd'hui



$\beta^- \rightarrow$  antineutrino  
 $\beta^+ \rightarrow$  neutrino

Car dans le Modelé Standard le nombre leptonique se conserve



Fred Reines

# La découverte

De la bombe au neutrino

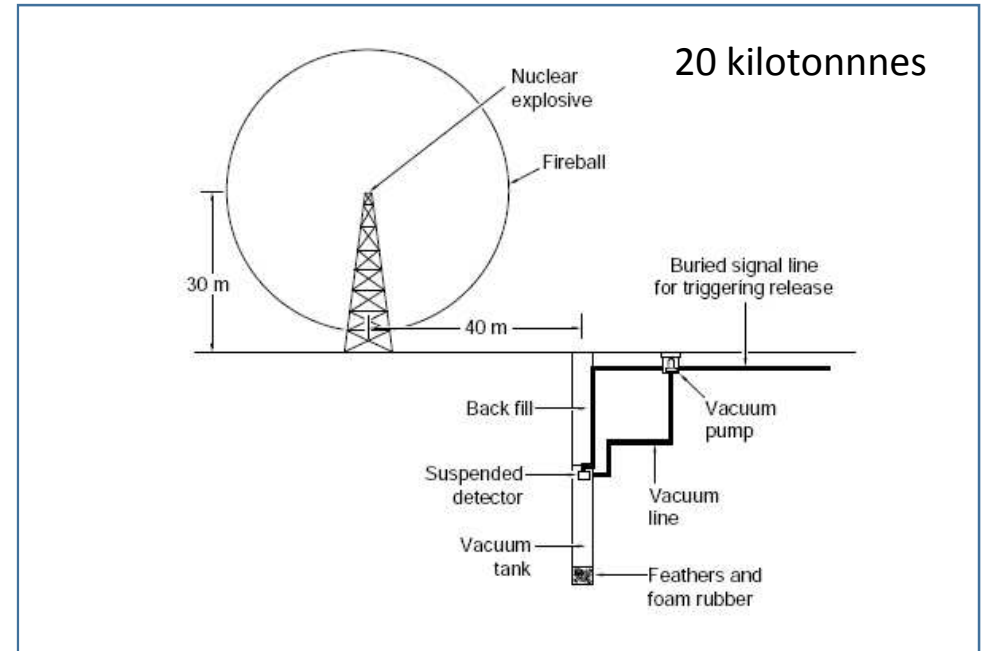
Pour découvrir le neutrino il faut une source radioactive,  $\beta$ , très intense



Clyde Cowan



Fermi suggère l'utilisation d'une bombe nucléaire.

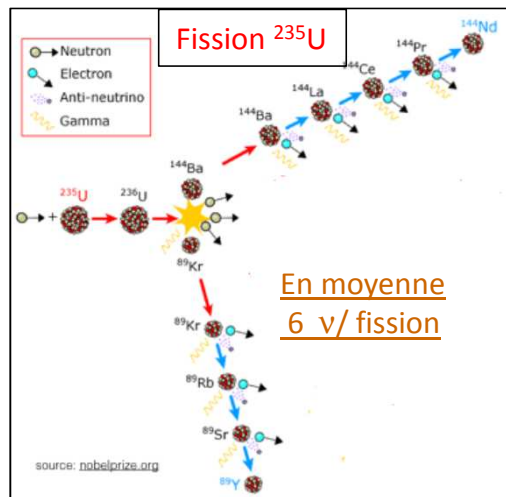


## Mieux avec un réacteur : 1953 Handford experiment

### Source

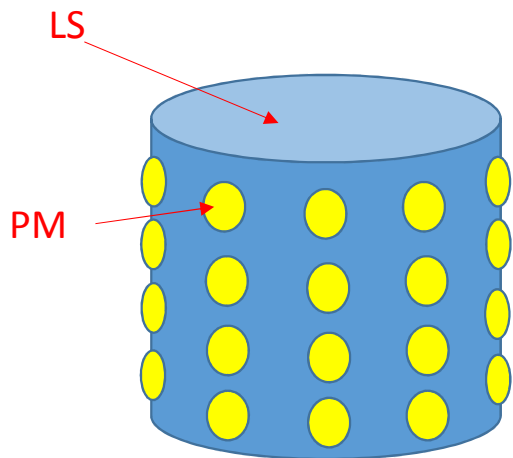


Handford Nuclear Reactor  
(Réacteur plutonigène)

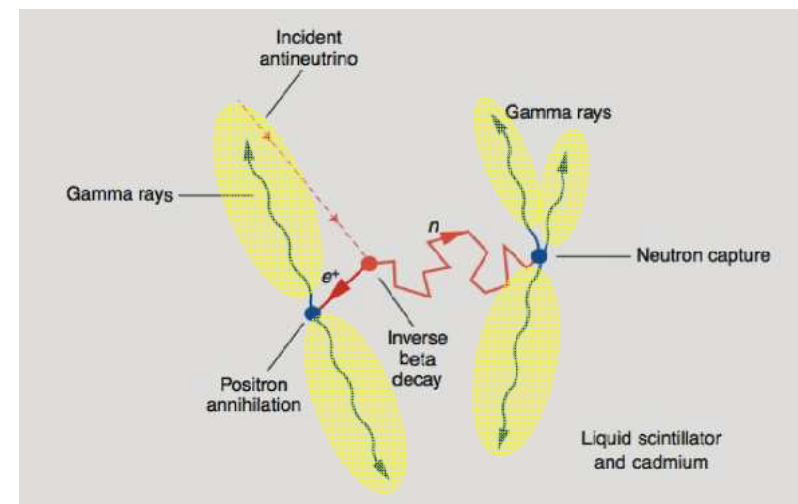


### Détection

Réaction beta-inverse

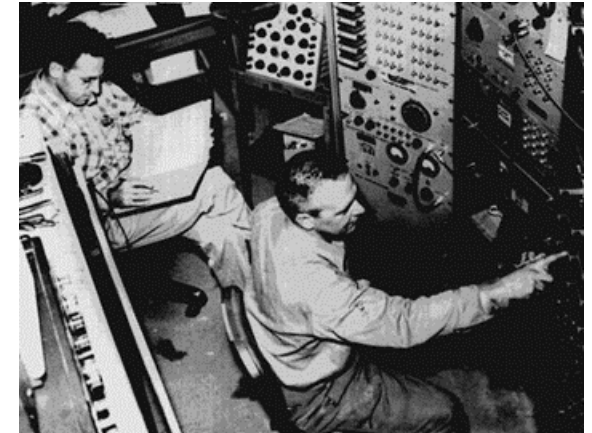
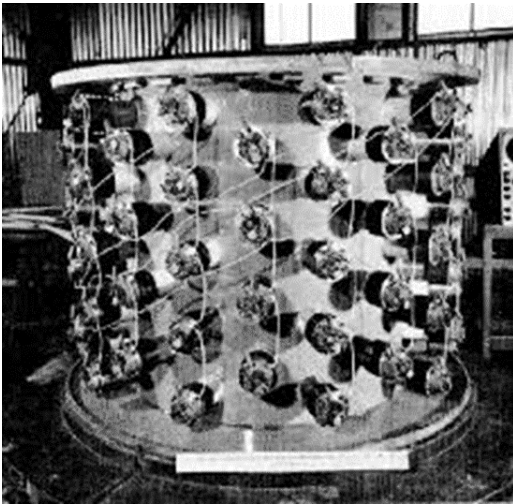


- 300 L scintillateur liquide dopé au Cd
- 90 photomultiplicateurs
- Plusieurs tonnes de Pb



Signature très forte  
=> Réduction du bruit de fond

## 1953 Experiment at Hanford



Rapport signal / bruit = 1/ 20  
 $0.41 \pm 0.20$  events / min (Réacteur ON – OFF)

- Résultat non concluant
- Principale source de bruit vient des cosmiques

# 1956 Savannah river experiment



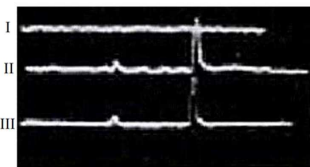
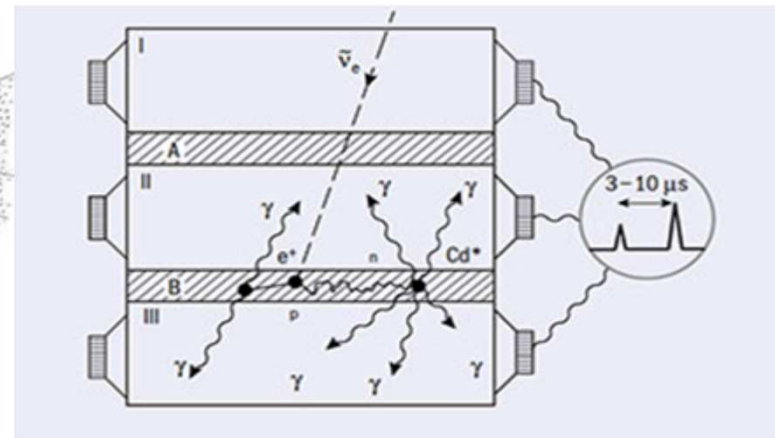
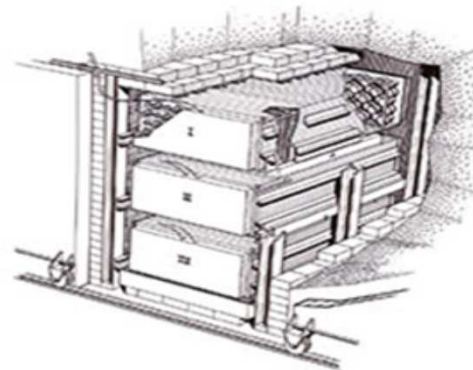
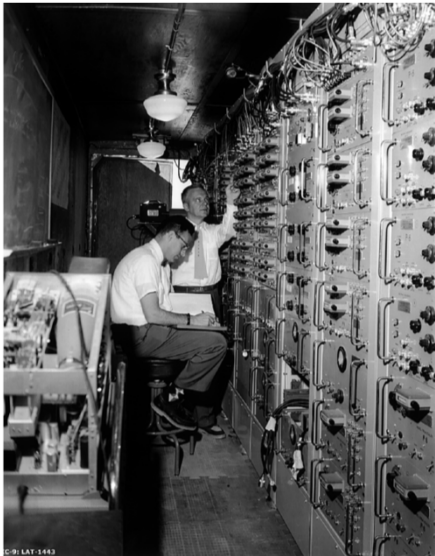
## Empilement de détecteurs

- 3 conteneurs de scintillateur
- 2 conteneurs d'eau +  $CdCl_2$

La cible c'est l'eau

## Réduction du bruit cosmique

Signal / Bruit = 3/1

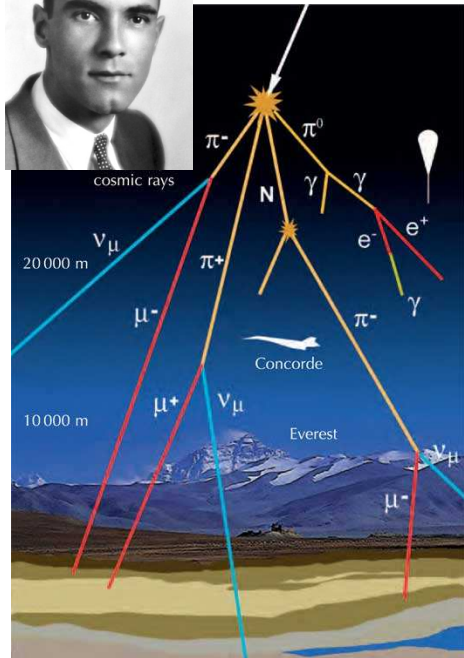




Le 15 juin Reines et Cowan annoncent la découverte du neutrino à Pauli le 15 juin 1956

Erhalten - Reçu		„VIA RADIOSUISSE“		Befördert - Transmis	
von - de	Stunde - Heure	NAME - NOM	nach - à	Stunde - Heure	NAME - NOM
NEWYORK	1956 JUN 15 AM 1 00	lh	Brieftelegramm	74	15. VI. 56 -1 10
NACHLASS PROF. W. PAULI			LT PROFESSOR W PAULI ZURICH UNIVERSITY ZURICH 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					

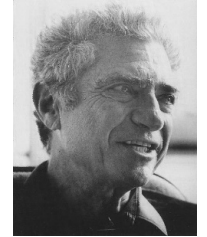
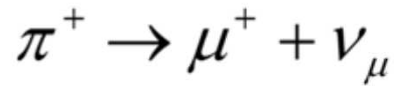
Nr. 20 6500 x 100 3/54



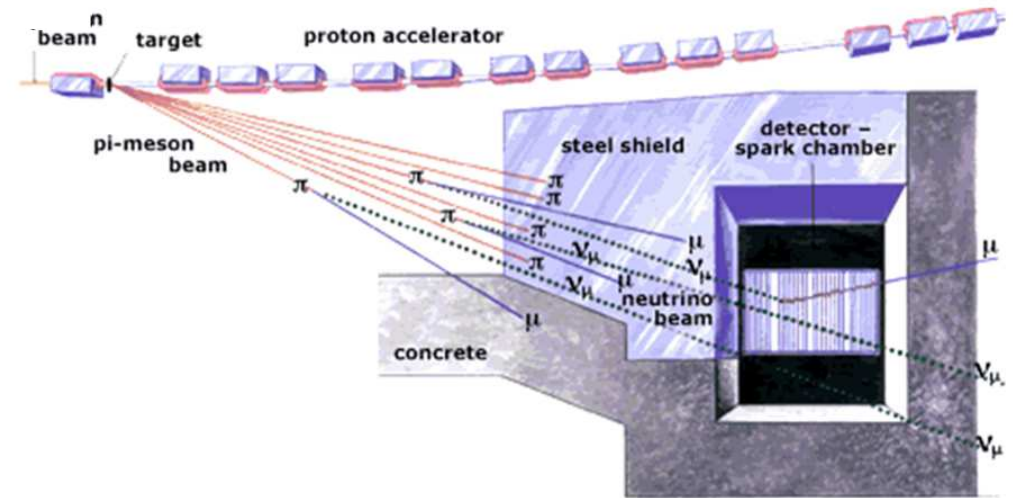
# Deuxième neutrino

Premier faisceau de neutrinos artificiels

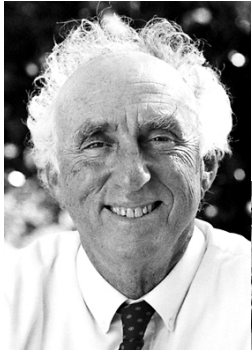
Brookhaven National Laboratory



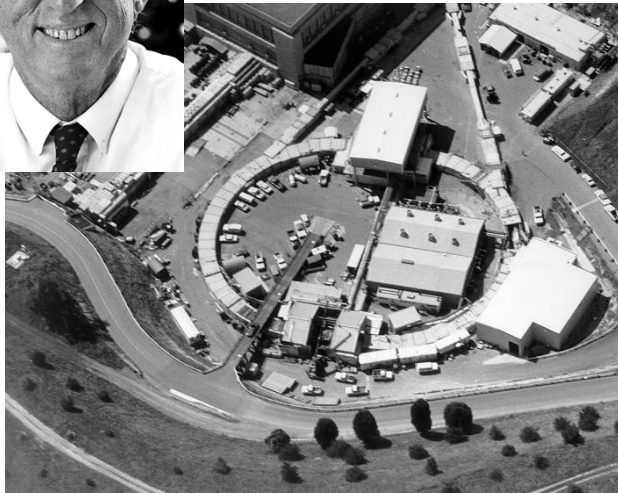
1962 Schwartz Lederman Steinberger  
Découvrent le neutrino muonique



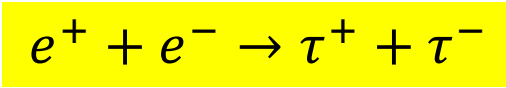
Le muon est découvert par Anderson Neddermeyer en 1937 dans les rayons cosmique.



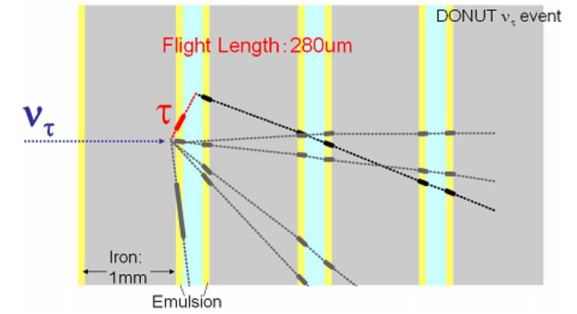
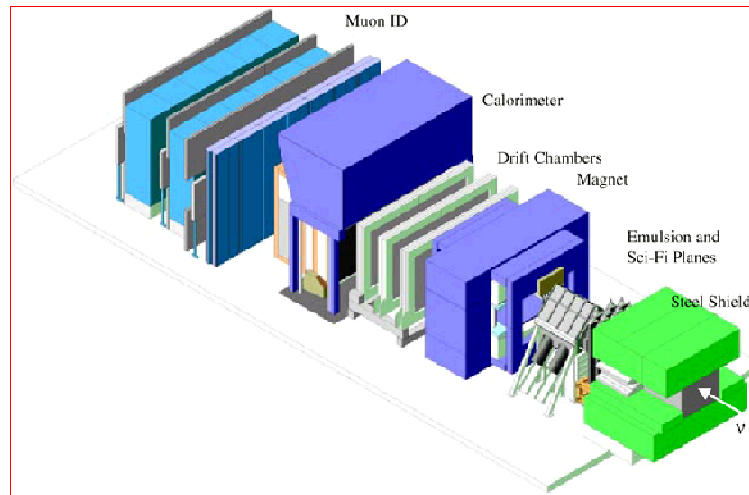
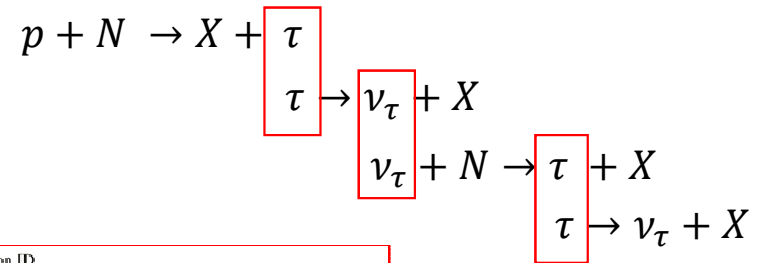
# Et de trois : neutrino tau



En 1973 M. Perl découvre le tau (« électron super lourd ») Au SLAC



En 2001 la collaboration DONUT découvre le neutrino tau à FERMILAB



*Frederick Reines reçoit le prix Nobel de Physique en 1995, 40 ans après la découverte du  $\nu_e$ . Il souffrait d'Alzheimer depuis 1990. Clyde Cowan était décédé en 1974.*

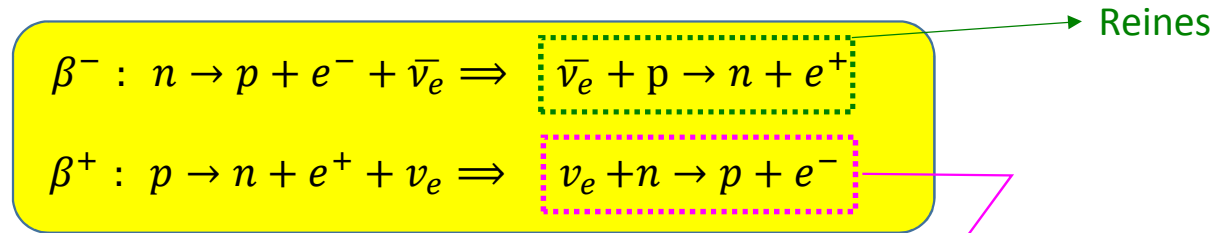
*En 1988, Schwartz, Lederman et Steinberger avaient reçue le prix Nobel pour la découverte du  $\nu_\mu$ .*



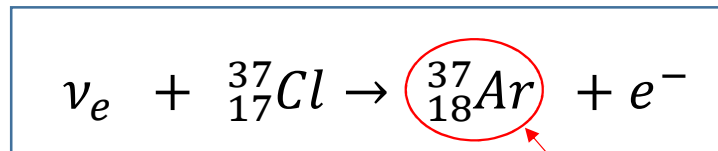
## Retour en arrière



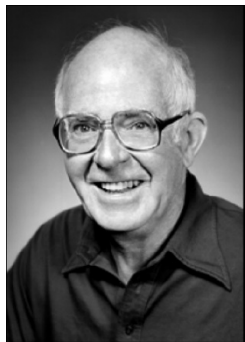
Bruno Pontecorvo  
1946



Pontecorvo propose de mettre en évidence les neutrinos par la détection d'isotopes radioactifs qu'ils produisent lors de leur capture.



Isotope radioactif



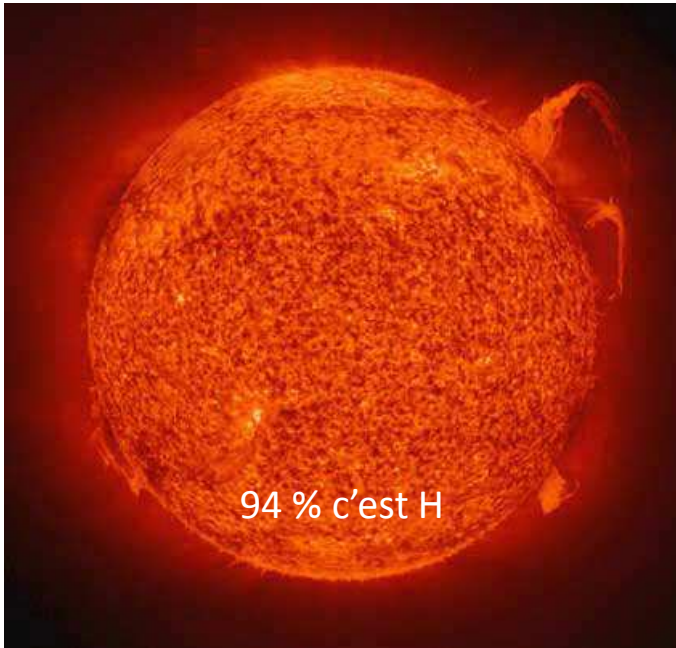
Ray Davis  
1964

Davis teste l'idée en 1954 à Savannah river dans un détecteur de 3800 L rempli avec du tétrachloroéthylène.

=> Rien !

Résultat « normal » car les réacteurs nucléaires produisent des anti-neutrinos. Mais à cette époque personne ne le savait pas très bien.

# Le Soleil, source de neutrinos



Le fonctionnement du Soleil est totalement incompris jusqu'au début du 20<sup>ème</sup> siècle



En 1920 Eddington propose que la source d'énergie Solaire est la fusion de l'hydrogène.



**OK mais comment ça marche ?**

# Qu'est ce qui fait briller le Soleil ?

## Hand Bethe 1938

MARCH 1, 1939

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 55

### Energy Production in Stars\*

H. A. BETHE  
Cornell University, Ithaca, New York  
(Received September 7, 1938)

#### §1. INTRODUCTION

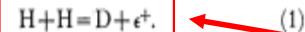
THE progress of nuclear physics in the last few years makes it possible to decide rather definitely which processes can and which cannot occur in the interior of stars. Such decisions will be attempted in the present paper, the discussion being restricted primarily to main sequence stars. The results will be at variance with some current hypotheses.

The first main result is that, under present conditions, no elements heavier than helium can be built up to any appreciable extent. Therefore we must assume that the heavier elements were built up *before* the stars reached their present state of temperature and density. No attempt will be made at speculations about this previous state of stellar matter.

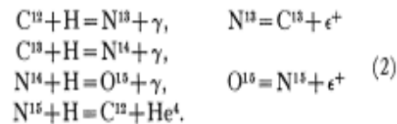
The energy production of stars is then due entirely to the combination of four protons and two electrons into an  $\alpha$ -particle. This simplifies the discussion of stellar evolution inasmuch as

the amount of heavy matter, and therefore the opacity, does not change with time.

The combination of four protons and two electrons can occur essentially only in two ways. The first mechanism starts with the combination of two protons to form a deuteron with positron emission, *viz.*

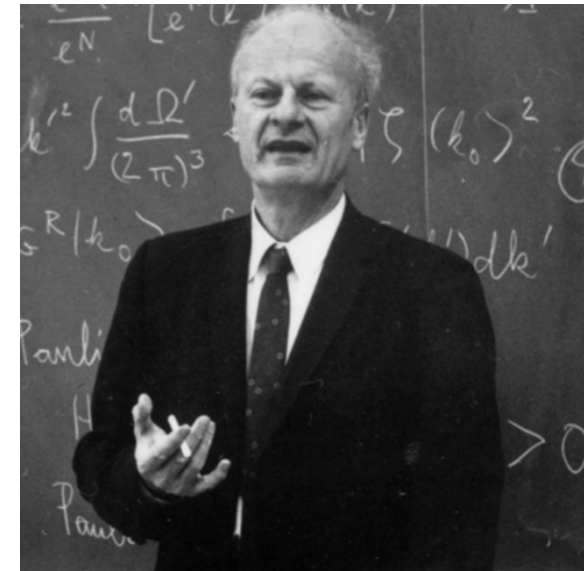


The deuteron is then transformed into  $He^4$  by further capture of protons; these captures occur very rapidly compared with process (1). The second mechanism uses carbon and nitrogen as catalysts, according to the chain reaction

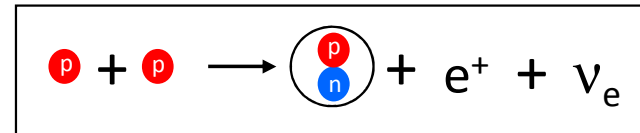


The catalyst  $C^{12}$  is reproduced in all cases except about one in 10,000, therefore the abundance of carbon and nitrogen remains practically unchanged (in comparison with the change of the number of protons). The two reactions (1) and

\* Awarded an A. Cressy Morrison Prize in 1938, by the New York Academy of Sciences.



Pas de neutrinos pour Bethe en 1938 !!!



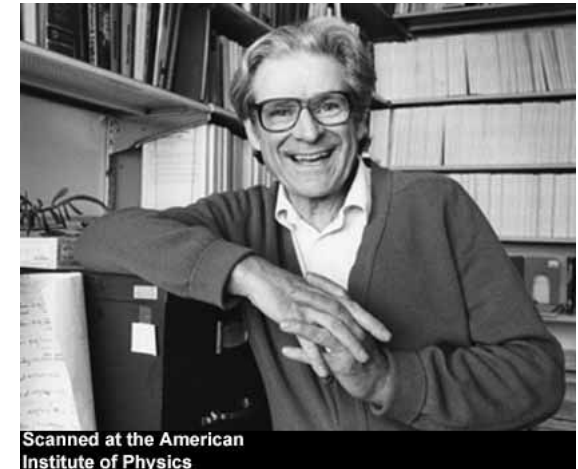
# Qu'est ce qui fait briller le Soleil ?

Edwin Salpeter 1952

$1.8 \times 10^{35}$   $\nu$ /s

2% énergie rayonnée

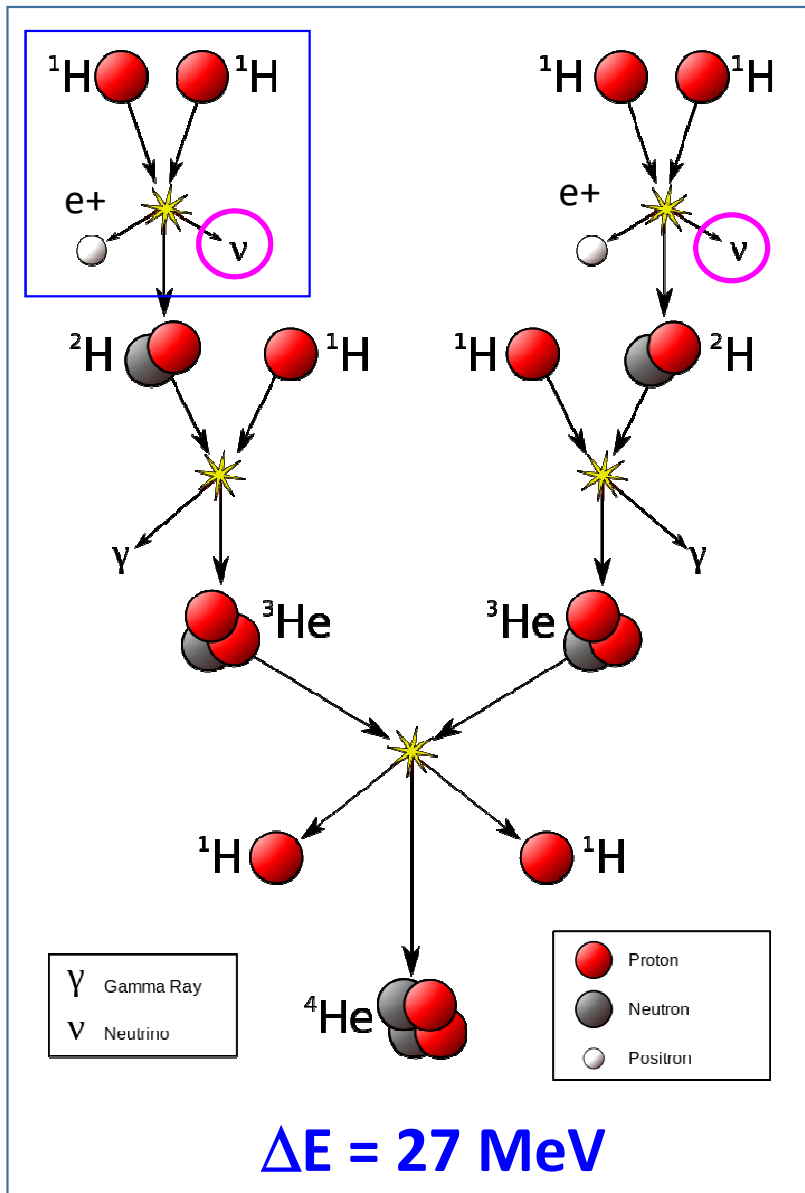
64 milliards  $\nu$ /s/cm<sup>2</sup>  
sur Terre !



Est il vrai tout ca ?

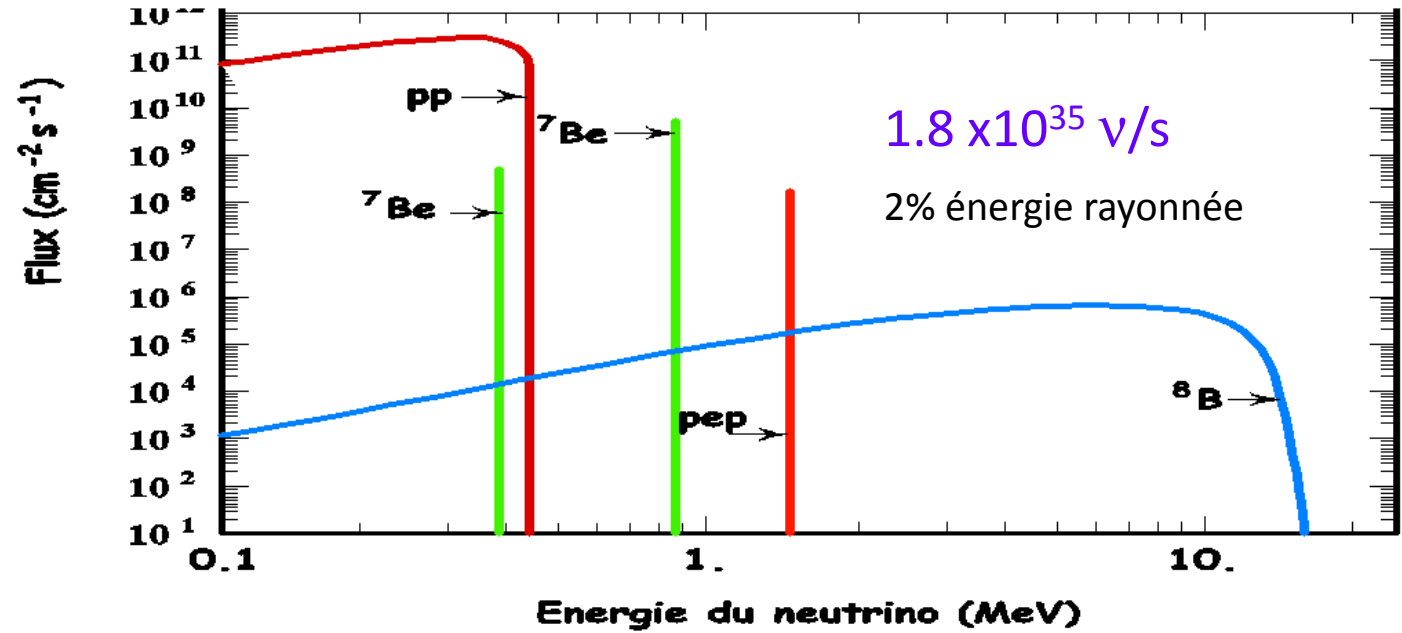
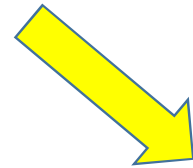
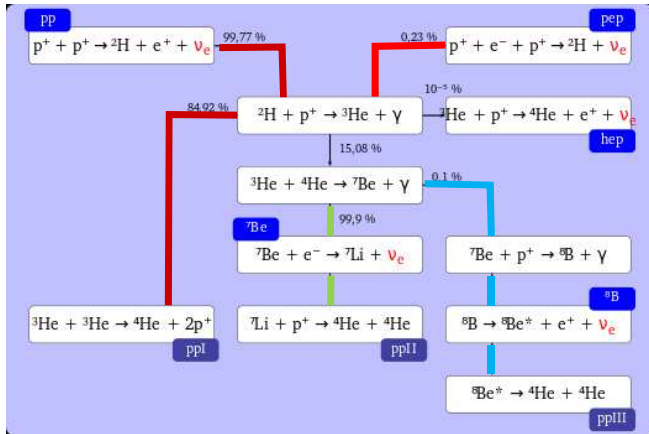
## Modèle théorique :

- > Physique nucléaire à très basse énergie ( $\sim$  keV)
- > Les données sont extrapolées de mesures sur Terre  
( $T_{\text{noyau}} = 14$  °K,  $\rho_{\text{noyau}} = 150$  g/cm<sup>3</sup>)





# Spectre des neutrinos solaires

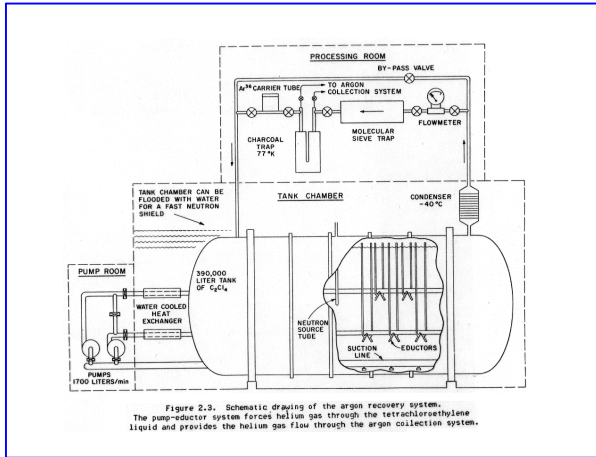


# Expérience de Davis

1968 - 1994

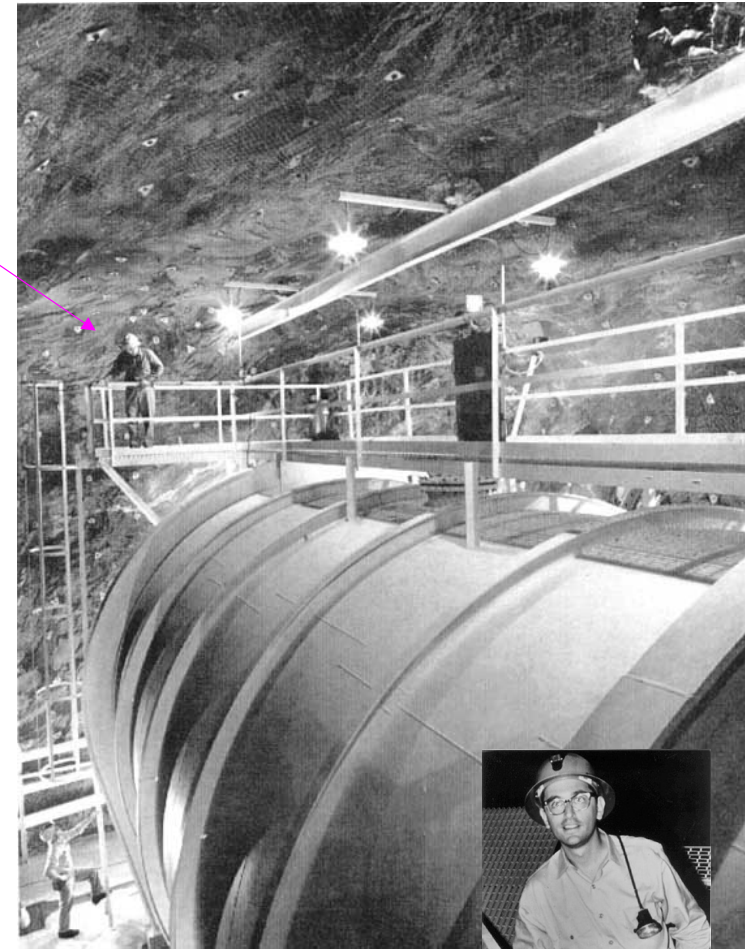
## Radiochimie

(380 000 L. de tétrachloroéthylène)

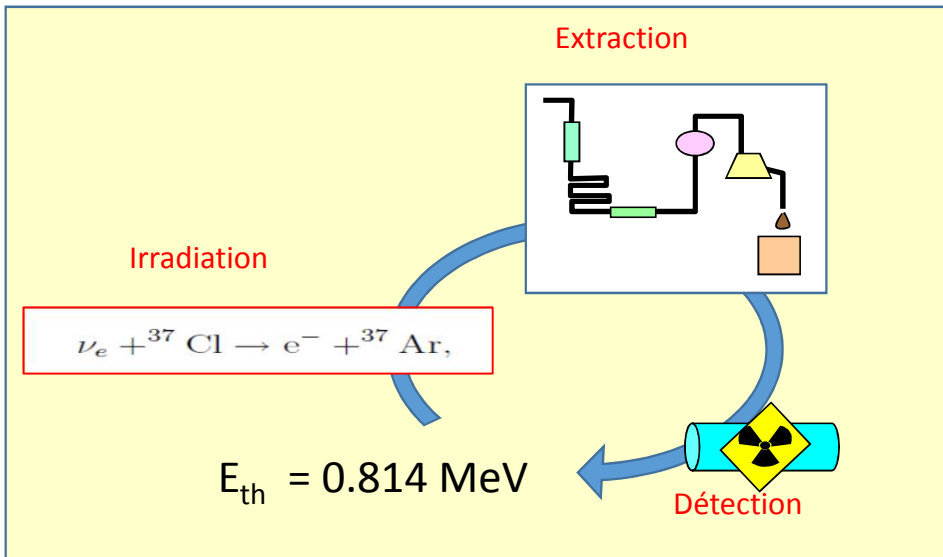


Original Motivation :

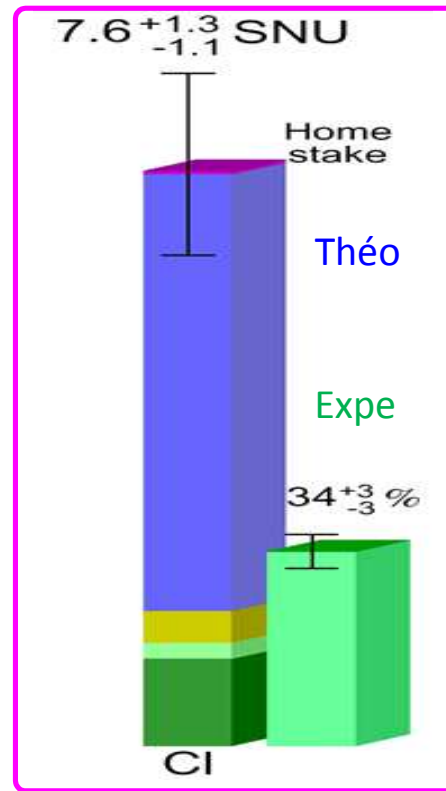
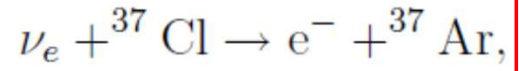
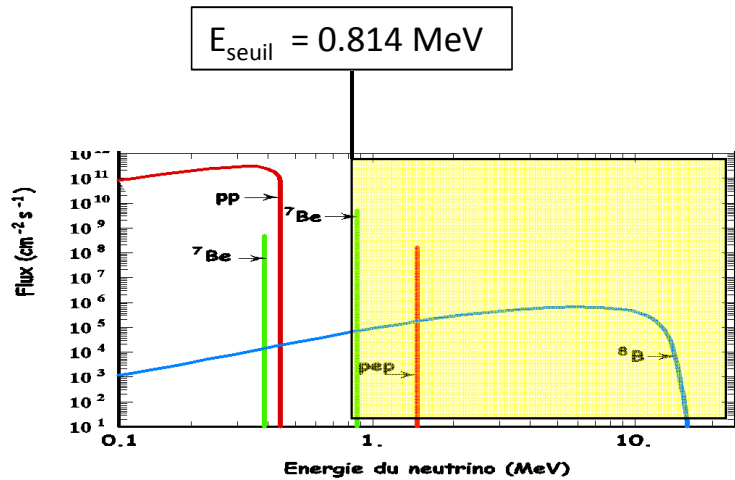
*“... to see into the interior of star and thus verify directly the hypothesis of nuclear energy generation in star.”*



John Bahcall



# Les résultats

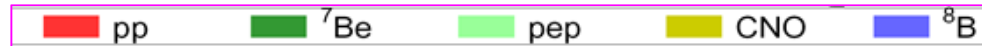


(Unité SNU = 1 capture / 10<sup>36</sup> atomes)

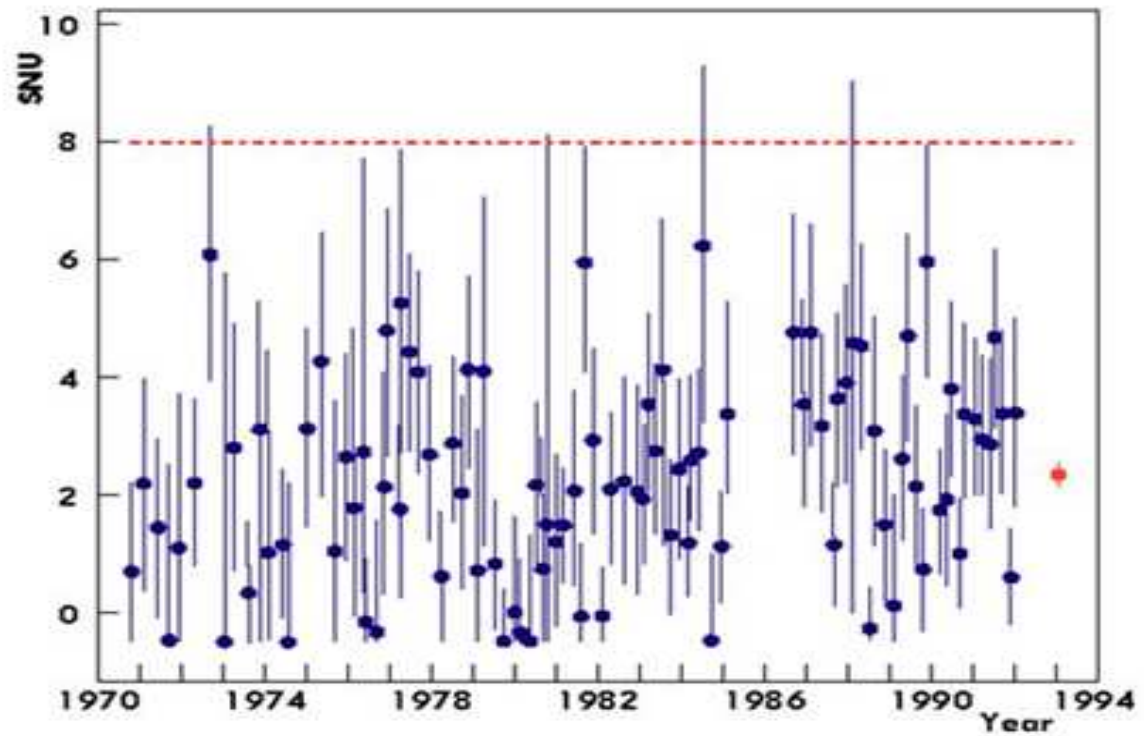
Exp / Theo = 34 %

Déficit de neutrinos

**Problème du Neutrino Solaire**

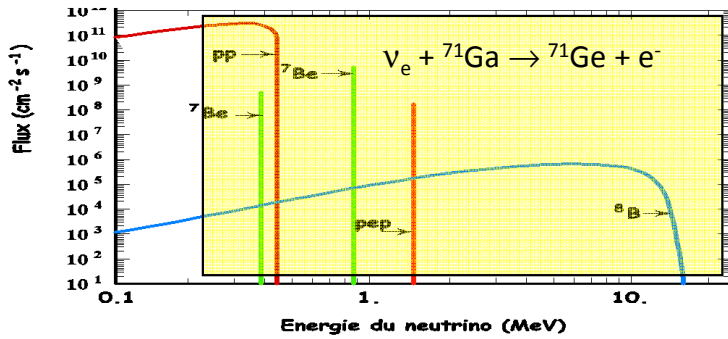


et ça va durer 20 plus ans

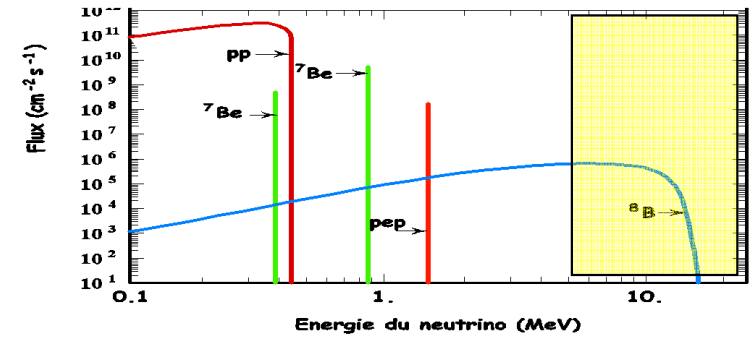


# Confirmation à d'autres énergies et avec d'autres techniques

GALEX / SAGE

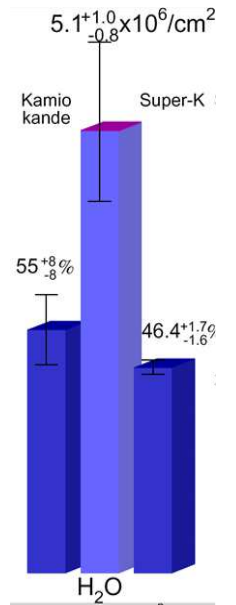
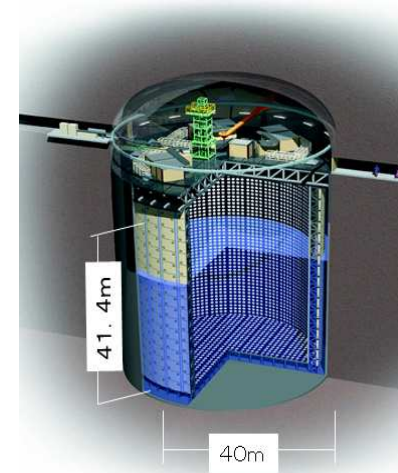
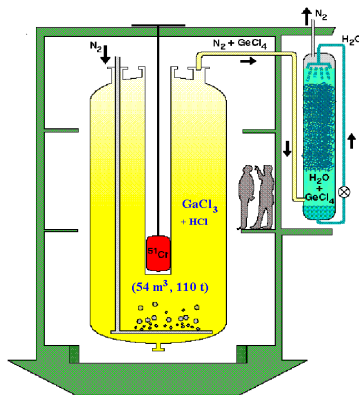
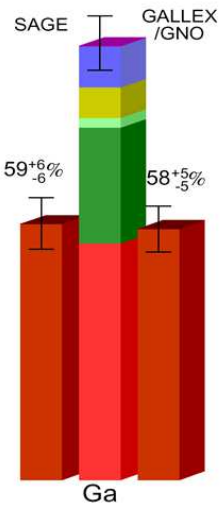


Kamiokande / Superkamiokande



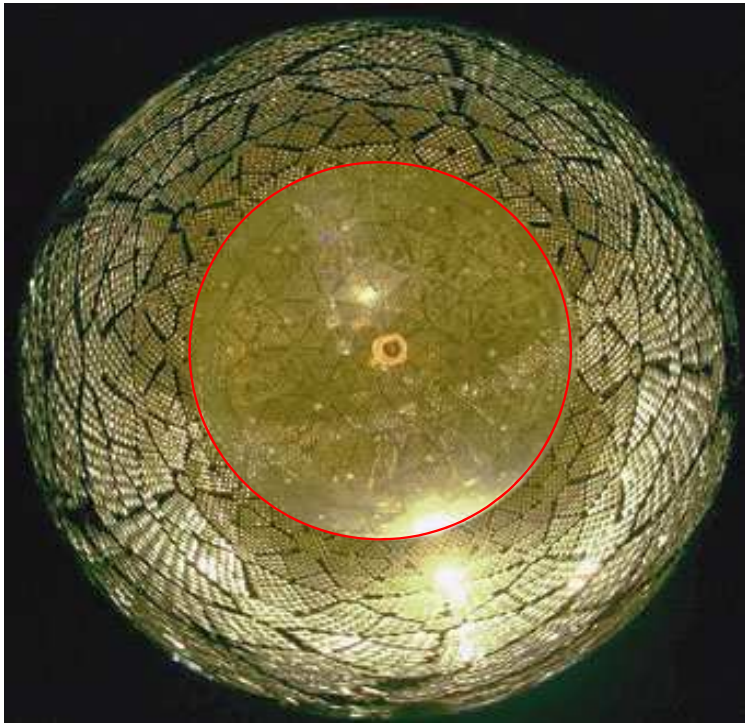
Toujours déficit de neutrinos

$128^{+9}_{-7}$  SNU

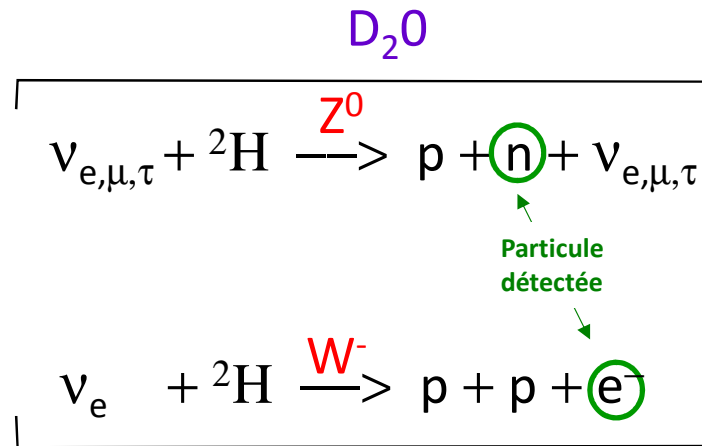


# Expérience Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

(L'expérience ultime)

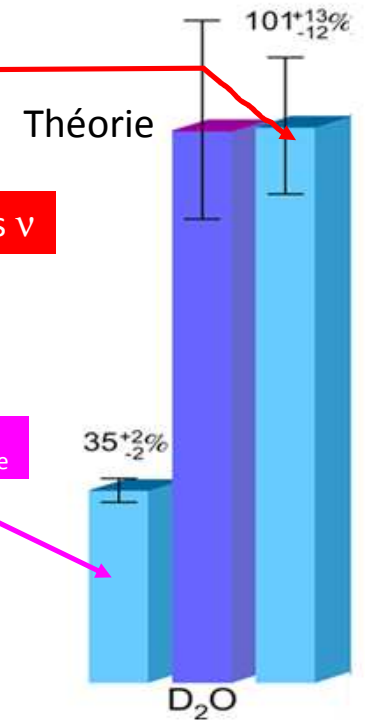


1000 tonnes d'eau lourde comme cible  
5300 tonnes d'eau légère comme blindage



Sensible à tous les  $\nu$

Sensible aux les  $\nu_e$



Si on prend toutes les saveurs ( $\nu_{e,\mu,\tau}$ ) ça marche !

Pourquoi les neutrinos changent-ils de saveur ?



## Oscillation des neutrinos

1968 : Afin d'expliquer le déficit de neutrinos solaires, Pontecorvo considère la possibilité que les neutrinos puissent osciller entre différentes saveurs .

### NEUTRINO ASTRONOMY AND LEPTON CHARGE

V. GRIBOV\* and B. PONTECORVO  
*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, USSR*

Received 20 December 1968

It is shown that lepton nonconservation might lead to a decrease in the number of detectable solar neutrinos at the earth surface, because of  $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$  oscillations, similar to  $K^0 \rightleftharpoons \bar{K}^0$  oscillations. Equations are presented describing such oscillations for the case when there exist only four neutrino states.

$$\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$$

En 1968 on ne connaît que deux types de neutrinos

# Deux manières pour caractériser les neutrinos (2 neutrinos)

## Etats de Saveur (interaction)

$$\text{électronique} : \nu_e \quad \nu_e \leftrightarrow e^-$$

$$\text{muonique} : \nu_\mu \quad \nu_\mu \leftrightarrow \mu^-$$

**Pontecorvo propose**

## Etats de Masse (propagation)

$$m_1 : \nu_1 \quad \nu_1 \sim e^{-iE_1 t} \quad E_1 = \sqrt{p_1^2 + m_1^2}$$

$$m_2 : \nu_2 \quad \nu_2 \sim e^{-iE_2 t} \quad E_2 = \sqrt{p_2^2 + m_2^2}$$

*Si Etats Propres de saveur  $\neq$  Etats Propres de masse*

*(L'état qui caractérise l'interaction n'est pas l'état qui caractérise la propagation)*

alors

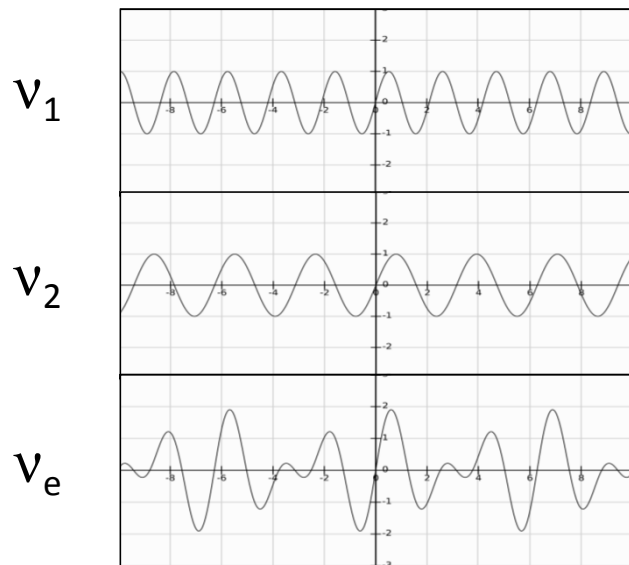
$$\begin{cases} \nu_e = a_{11}\nu_1 + a_{12}\nu_2 \\ \nu_\mu = a_{21}\nu_1 + a_{22}\nu_2 \end{cases}$$

$$a_{ij} = cte$$

$\nu_1$  et  $\nu_2$  sont de fonctions périodiques qui dépendent de la masse et qui varient dans le temps  
 $\Rightarrow \nu_e$  et  $\nu_\mu$  varient dans le temps de manière périodique

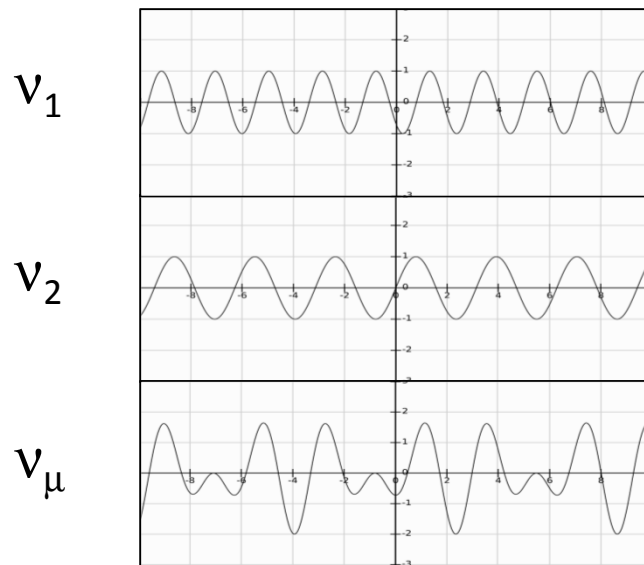


A l'instant  $t_1$



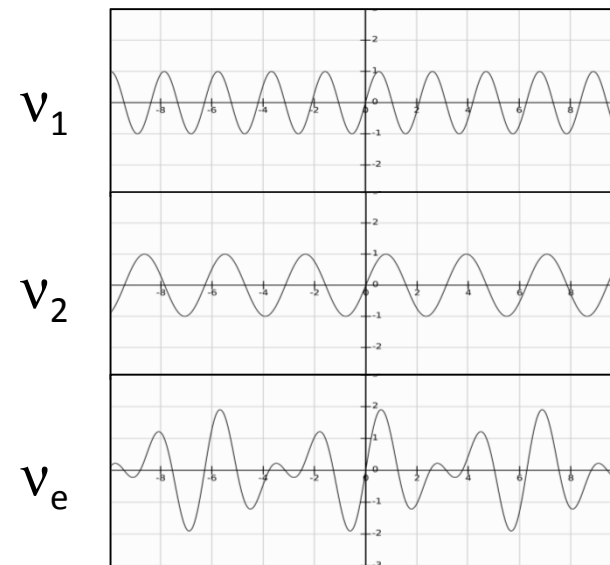
$$v_e(t_1) = v_1(t_1) + v_2(t_1)$$

A l'instant  $t_2$

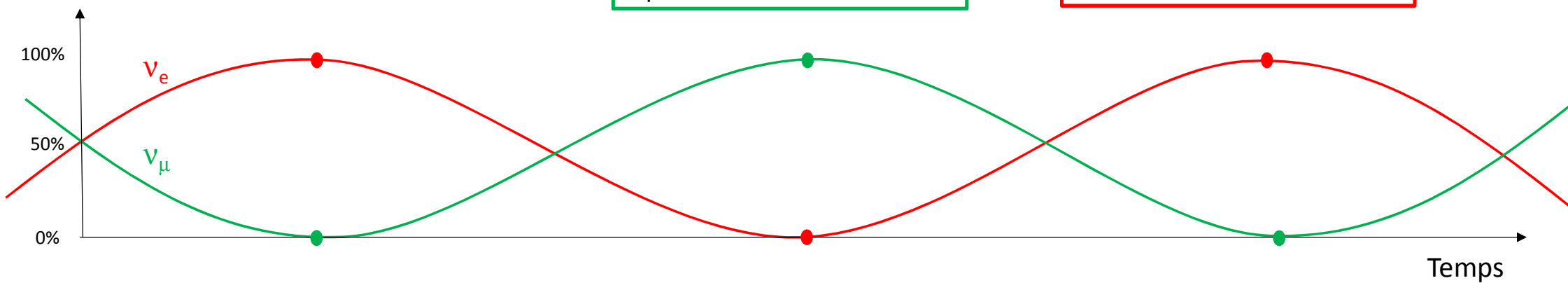


$$v_\mu(t_2) = v_1(t_2) + v_2(t_2)$$

A l'instant  $t_3$



$$v_e(t_3) = v_1(t_3) + v_2(t_3)$$



## Probabilité d'oscillation (a deux neutrinos)

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

Matrice de mélange

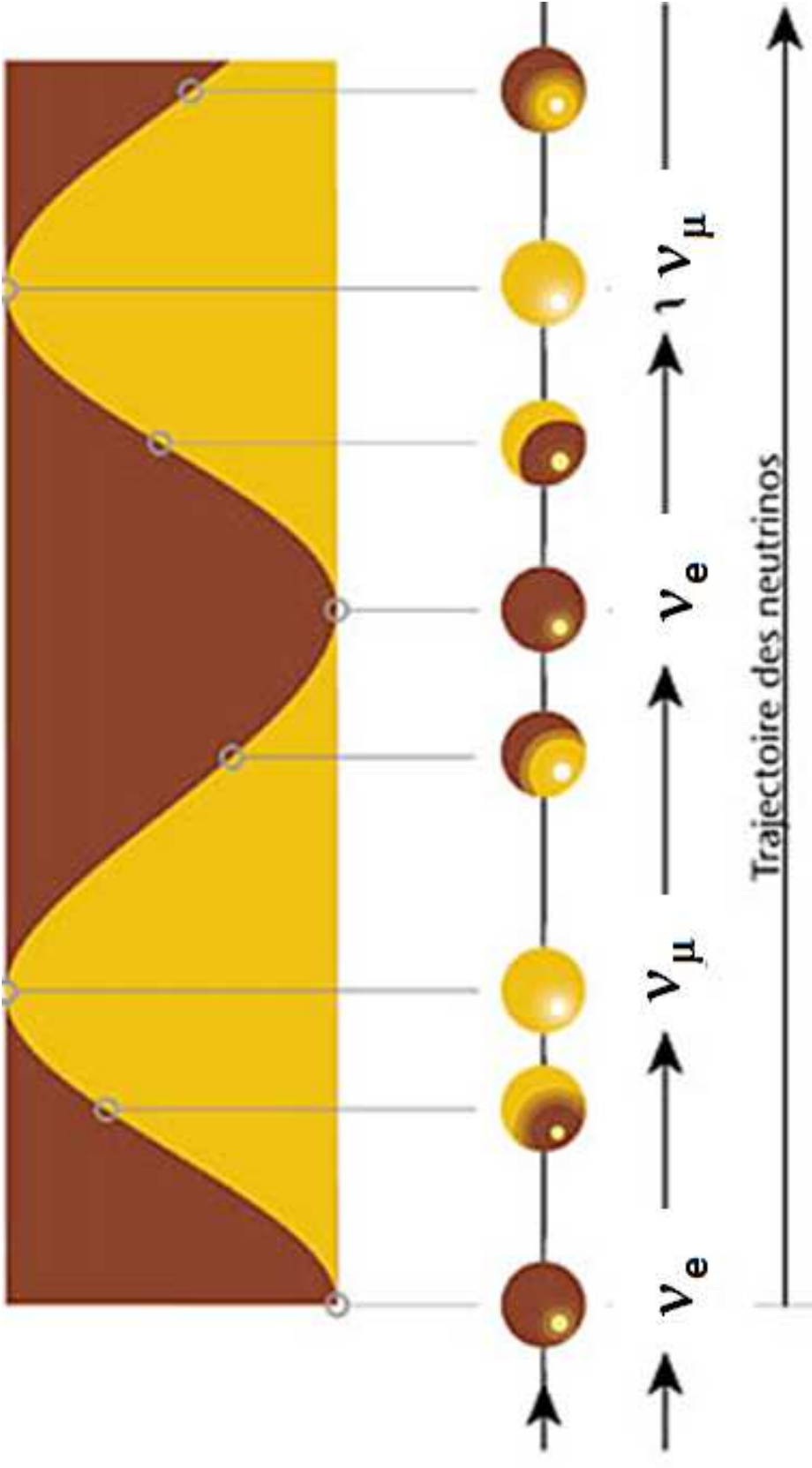
Oscillation

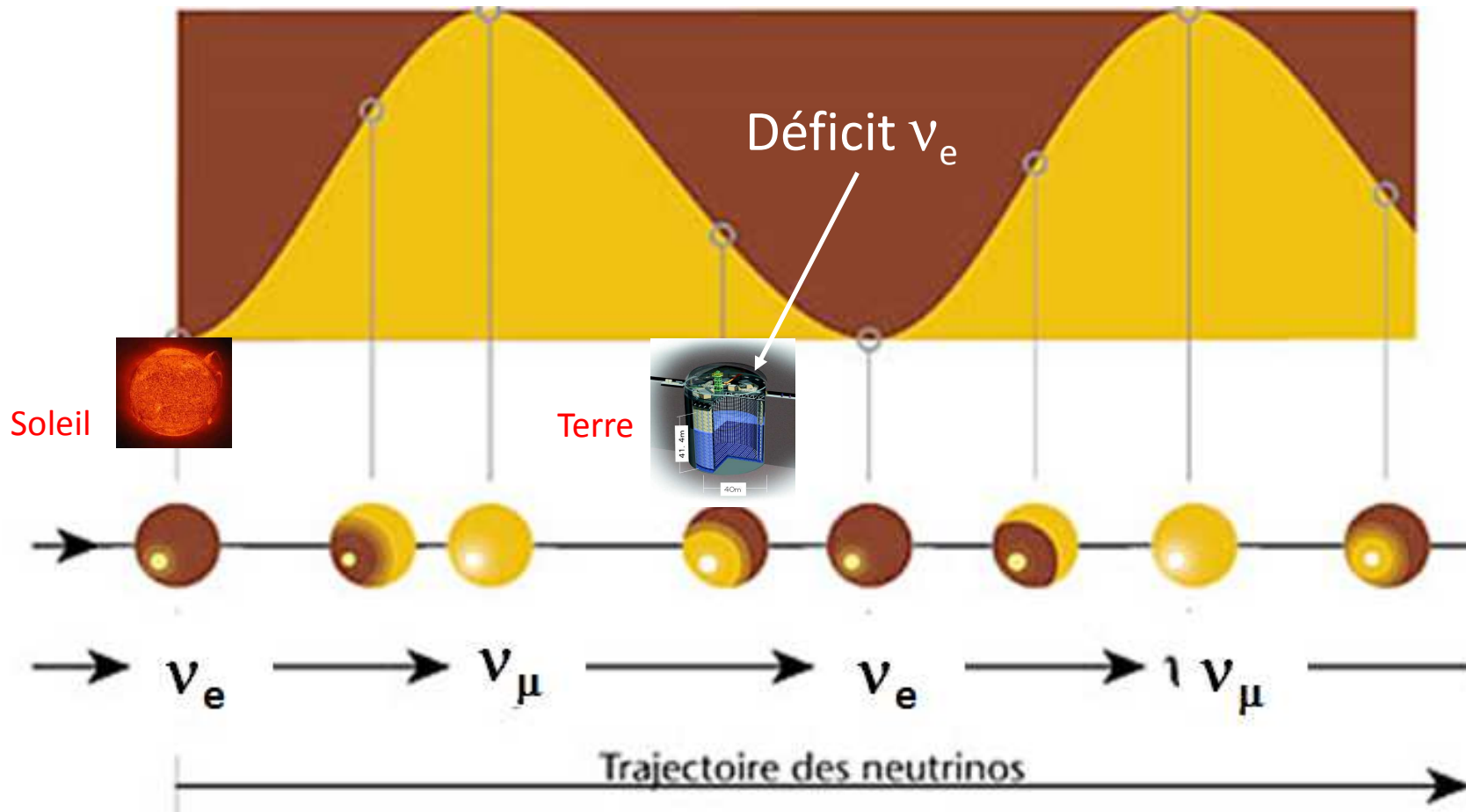
$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2\theta \times \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L}{4E_\nu}\right)$$

Pour que le neutrino oscille il faut :

- $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2 \neq 0$
- $\theta \neq 0$

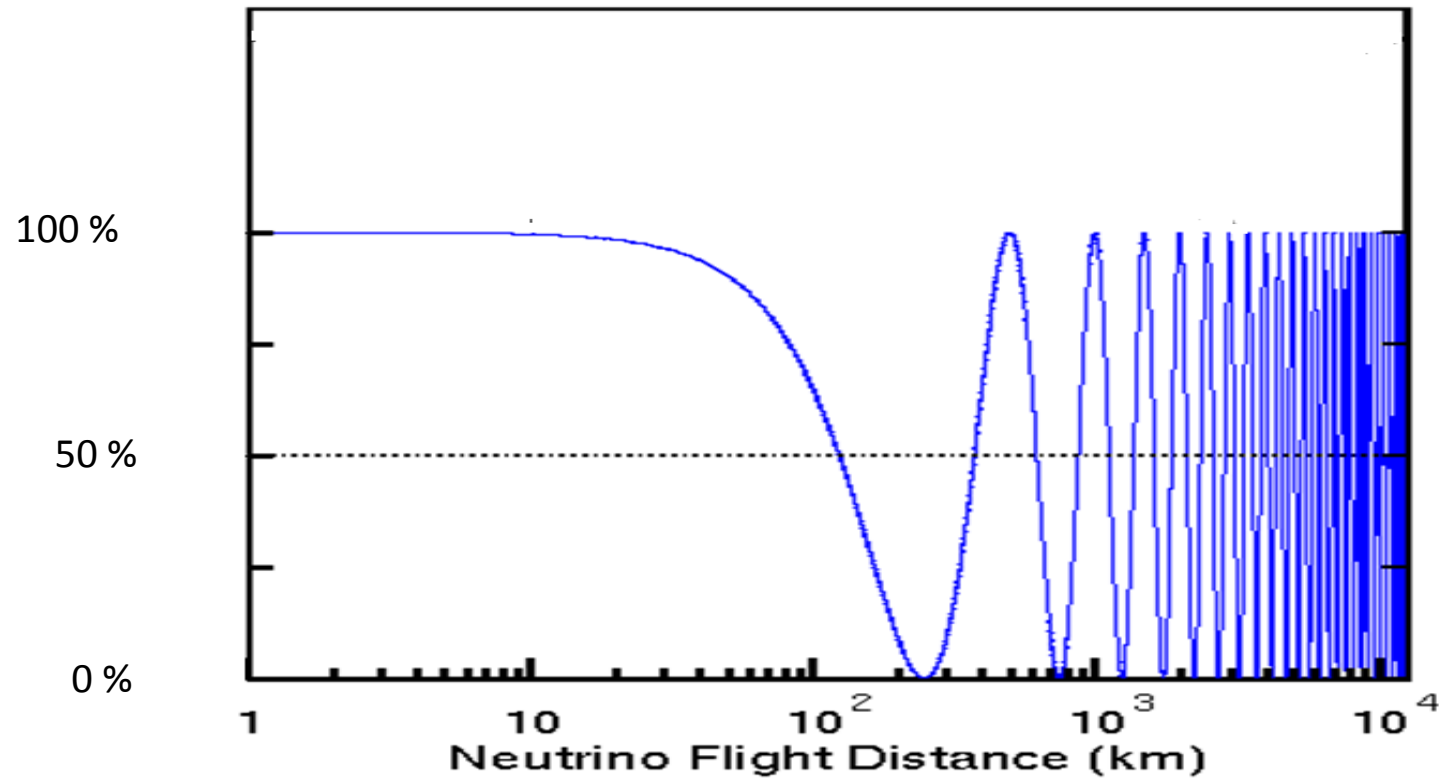
Si le neutrino oscille il doit posséder une masse, ce qui n'est pas prévu dans le Modèle Standard





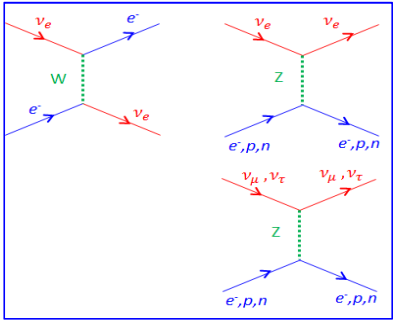
## Probabilité de survie d'un neutrino

$$P(\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}) = 1 - \sin^2 \theta^2 \times \sin^2 \left( 1.27 \frac{\Delta m^2}{4E} L \right)$$



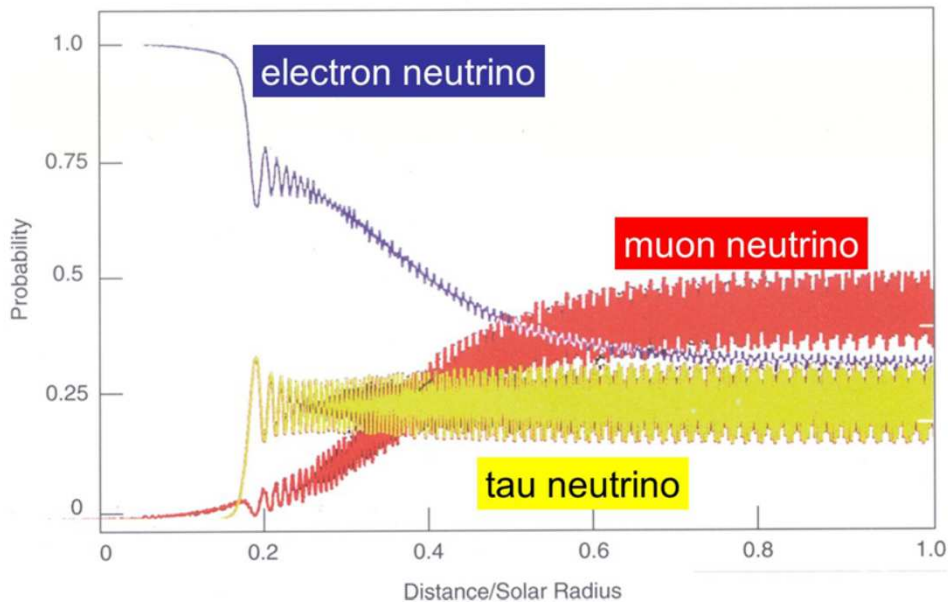
# L'effet de la matière

## Interaction dans la matière

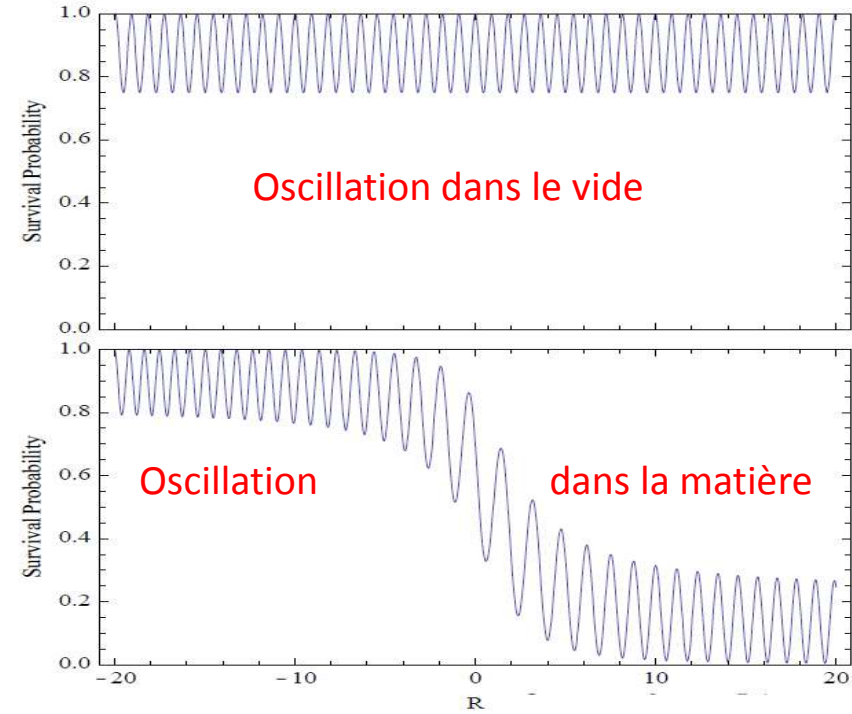


Oscillation résonante lorsque le neutrino se déplace dans la matière

Effet MSW



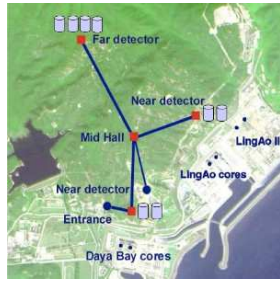
Oscillation résonante dans le Soleil



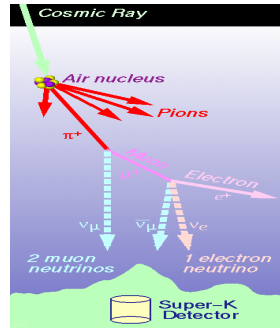
# Confirmation avec de neutrinos réacteurs, atmosphériques et accélérateur



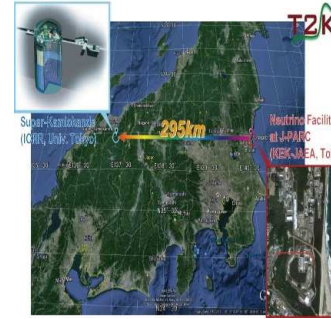
Kamland



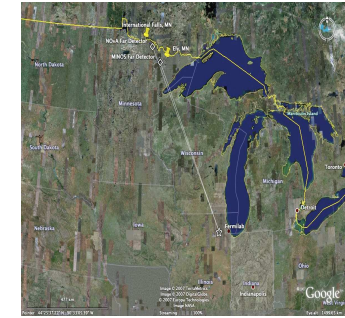
Daya Bay



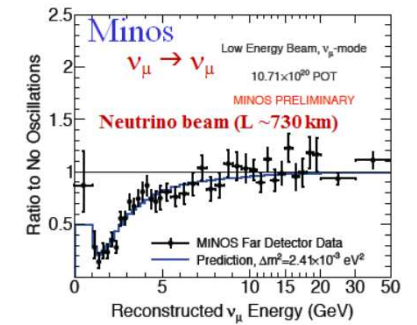
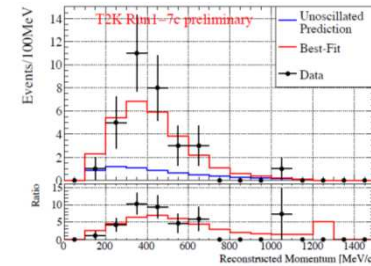
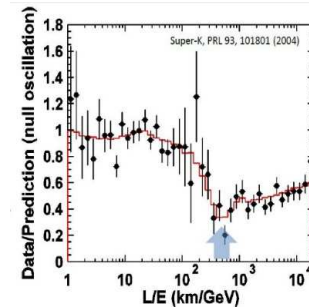
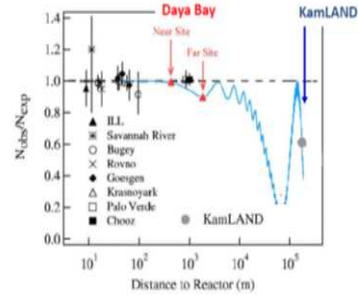
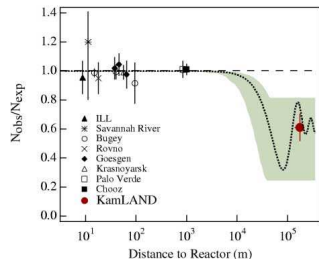
Kamioka



T2K

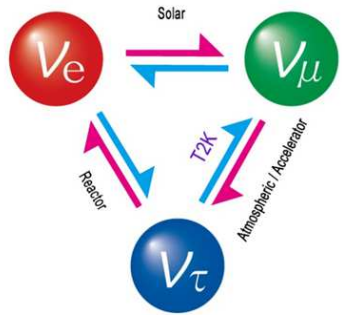


MINOS



Confirmation à 3 neutrinos dans de nombreuses expériences à haute et basse énergie

# A trois neutrinos ça se complique



Neutrino oscillation between three generations

Mélange

$\Delta m$

$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix}$$

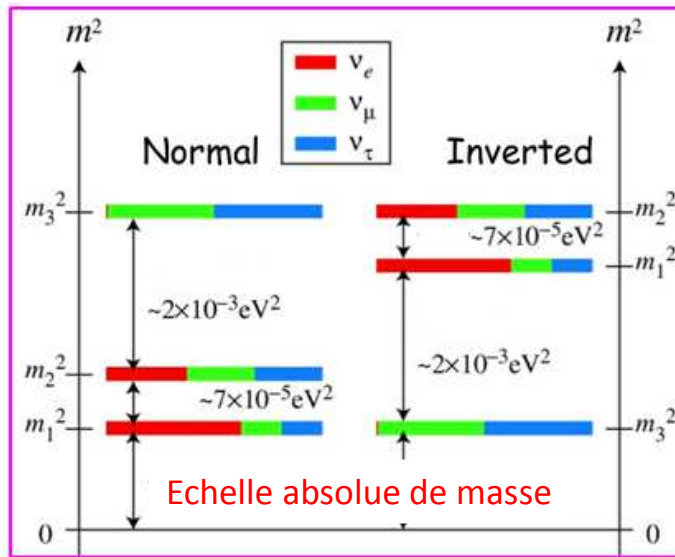
Phase de CP

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$$

$$\Delta m_{23}^2 = m_3^2 - m_2^2$$

$$\Delta m_{31}^2 = m_3^2 - m_1^2$$

Parameter	Best-fit value
$\sin^2 2\theta_{12}$	$0.857 \pm 0.024$
$\sin^2 2\theta_{23}$	$> 0.95$
$\sin^2 2\theta_{13}$	$0.098 \pm 0.013$
$\Delta m_{21}^2$	$7.50 \pm 0.20 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
$ \Delta m_{32}^2 $	$2.32_{-0.08}^{+0.12} \times 10^{-3} \text{ eV}^2$



- Hiérarchie de masse ?
- Echelle absolue ?

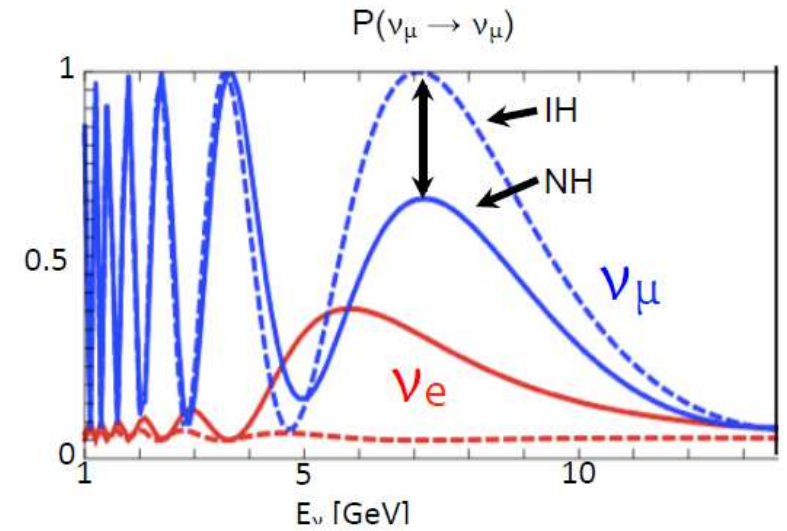
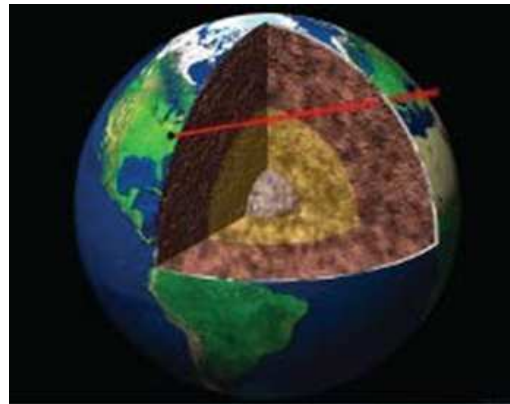
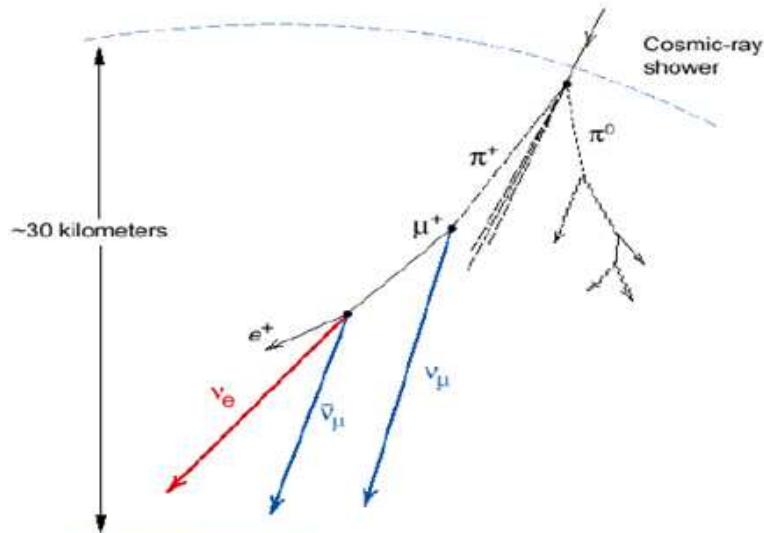


# Hiérarchie de masse

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$$

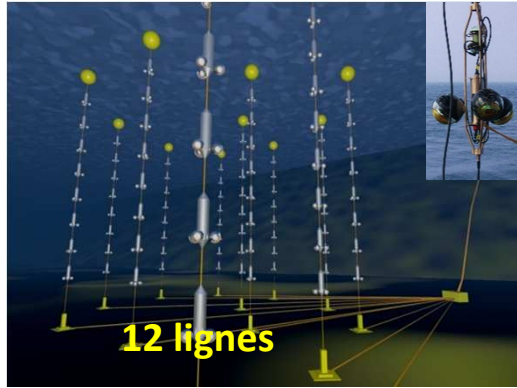
Neutrinos atmosphériques

$$P_{3\nu}^M(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \simeq \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13}^M \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E_\nu} \right)$$

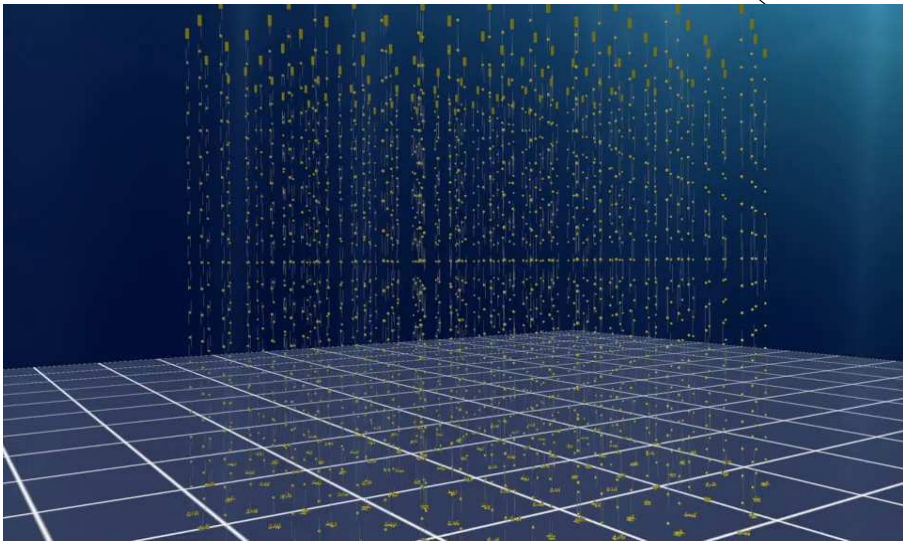
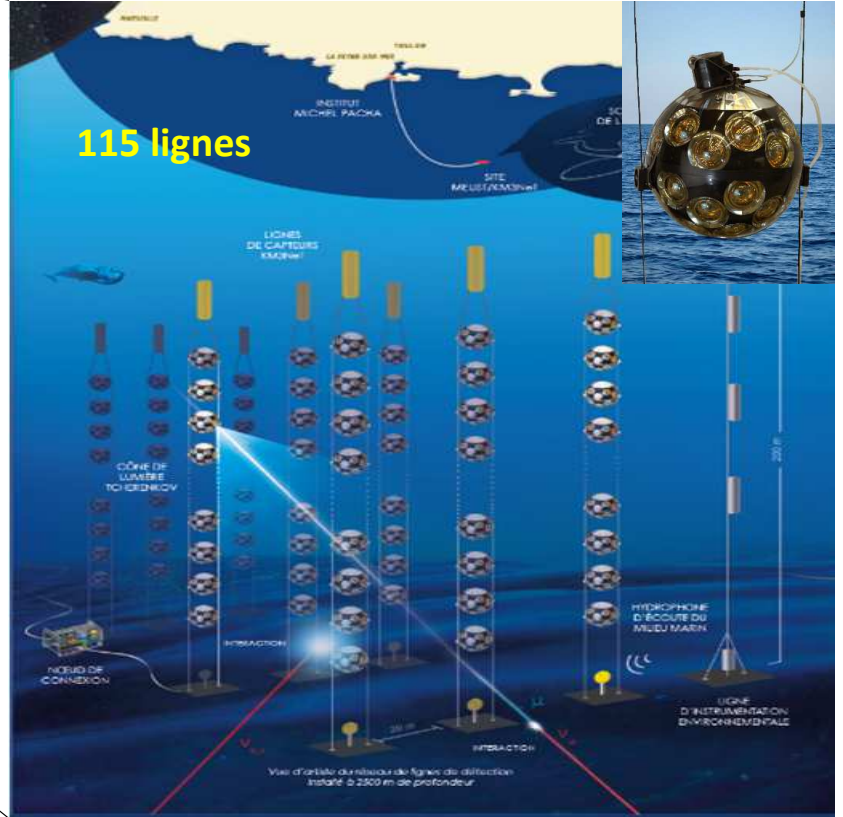


# Projet ORCA / KM3NeT

## Détecteur sous-marin

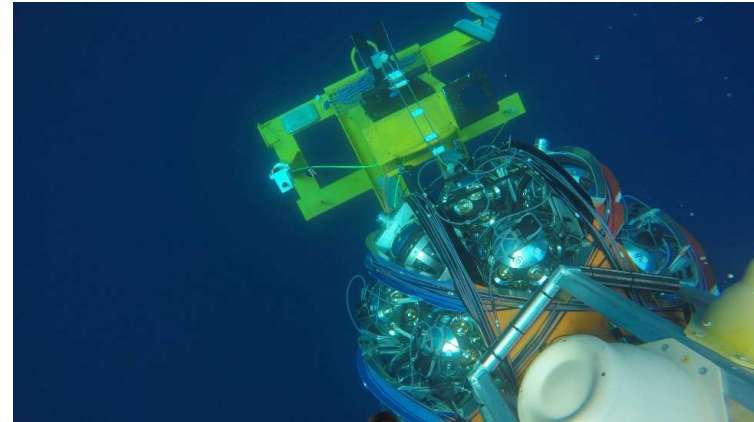


Extrapolation d'ANTARES



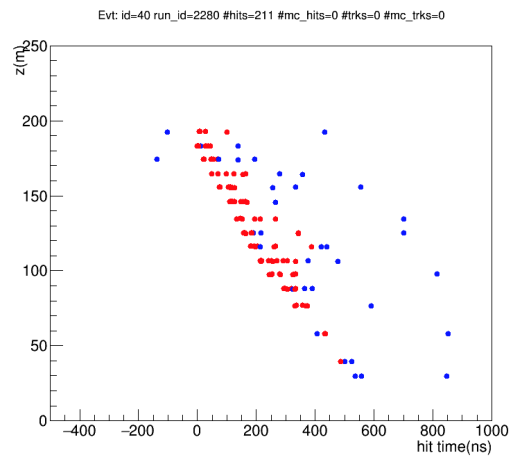
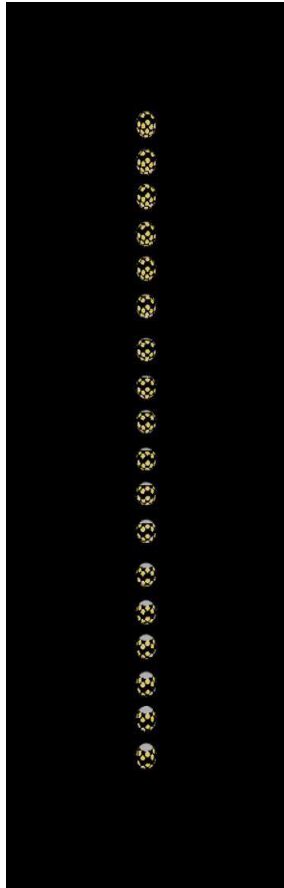


# Installation de la première ligne

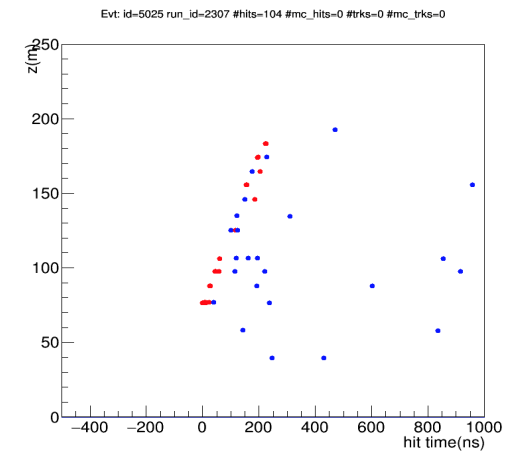
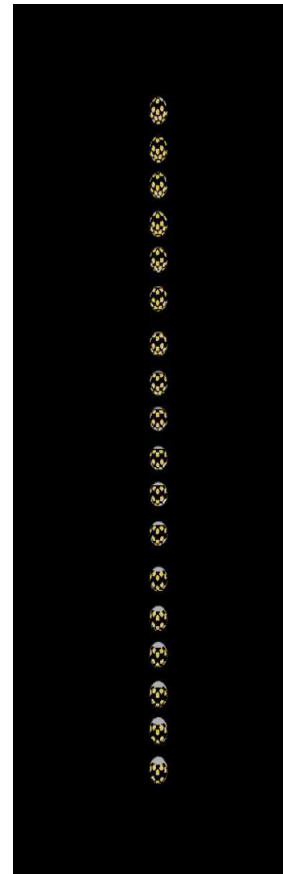


# Premiers évènements

## Atmospheric Muon Bundle



## Neutrino Candidate



# Hiérarchie de masse

$$P_{ee}(L/E) = 1 - P_{21} - P_{31} - P_{32}$$

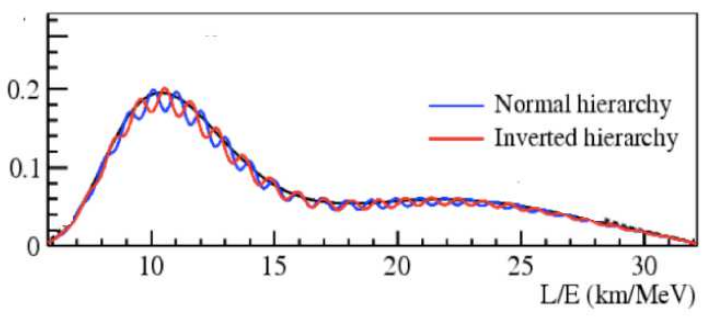
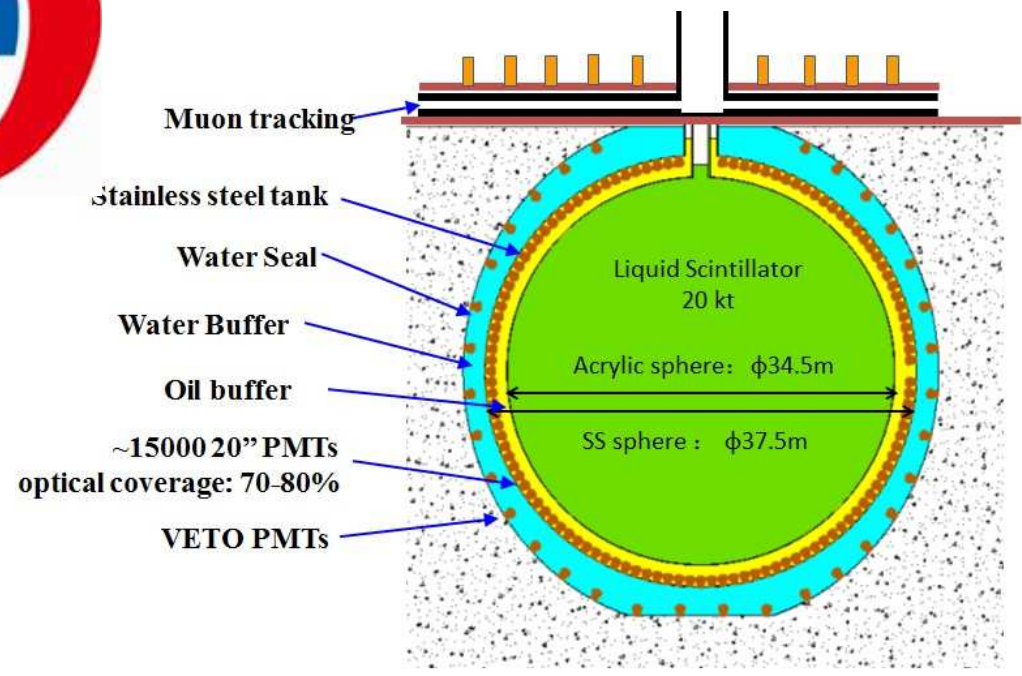
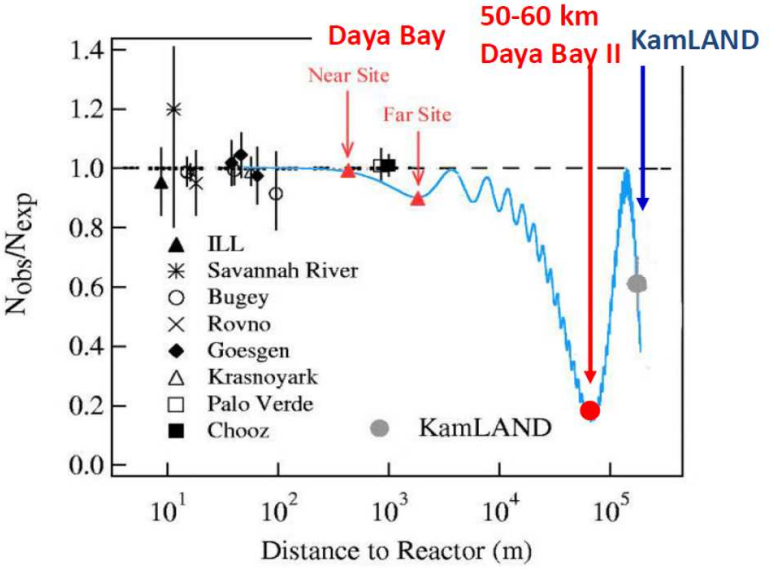
$$P_{21} = \cos^4(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2(\Delta_{21})$$

$$P_{31} = \cos^2(\theta_{12}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta_{31})$$

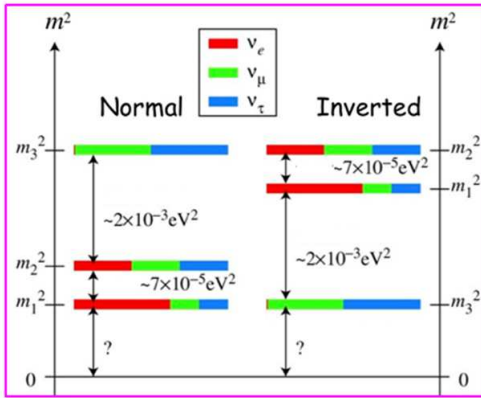
$$P_{32} = \sin^2(\theta_{12}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\Delta_{32})$$

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$$

Neutrinos réacteur



# La mesure de la masse



□  $\Delta m = 7 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2 \Rightarrow$  au moins un neutrino avec  $m_i > \sqrt{7 \cdot 10^{-5}} = 50 \text{ meV}$

Lequel ? Dépend de la hiérarchie

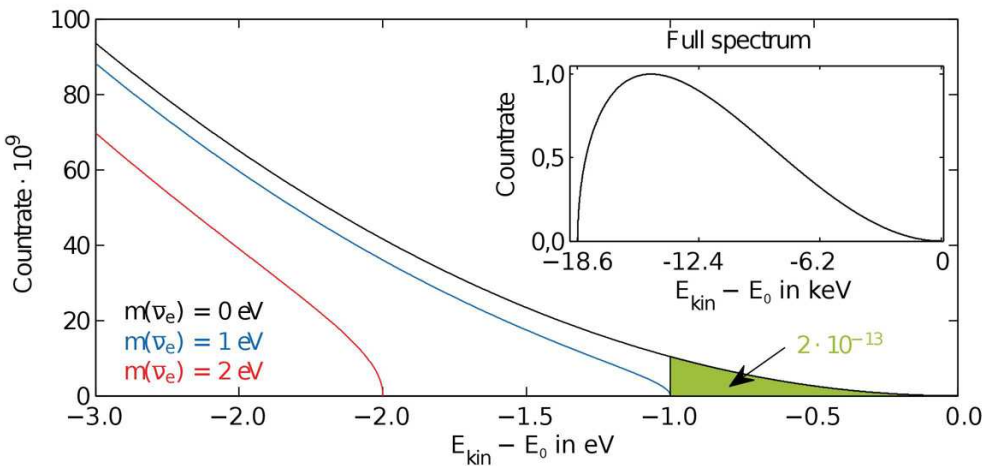
□ Mesures directes

$m_{\nu_e} < 2 \text{ eV}$  from  $\beta$ -decay (95%CL)

$m_{\nu_\mu} < 0.19 \text{ MeV}$  from  $\pi \rightarrow \mu \nu$  (90% CL)

$m_{\nu_\tau} < 18.2 \text{ MeV}$  from  $\tau$  decays (95%CL)

## Mesures "End Point" : Fermi



Désintégration beta du tritium :  ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \bar{\nu}_e$

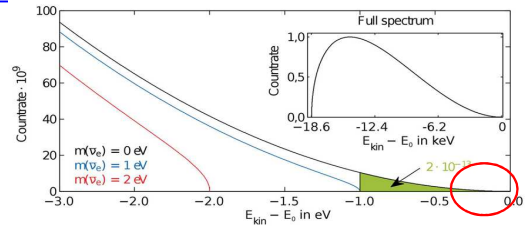
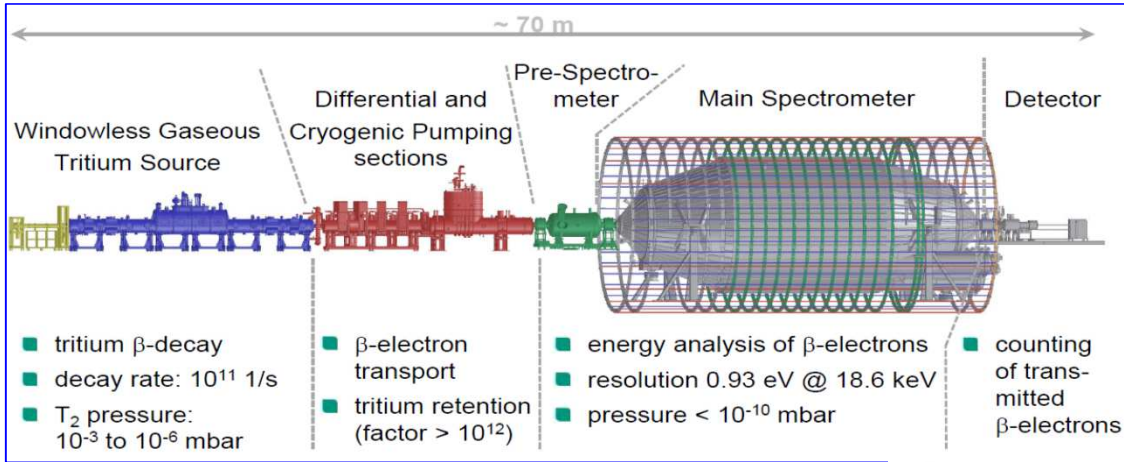
$Q_\beta = 18.57 \text{ KeV}$

MAINZ :  $m_{\nu_e} c^2 < 2.3 \text{ eV}$

TROITSK :  $m_{\nu_e} c^2 < 2.05 \text{ eV}$

# KATRIN

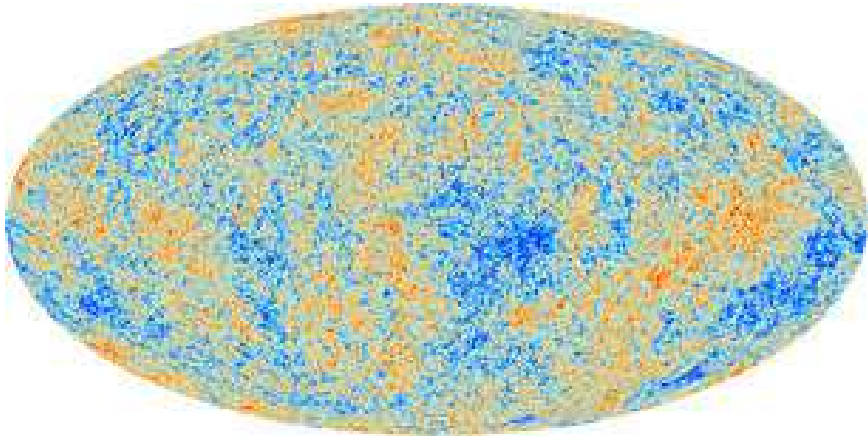
Debut construction en 2006



Sensibilité finale :  $< 0.2$  eV

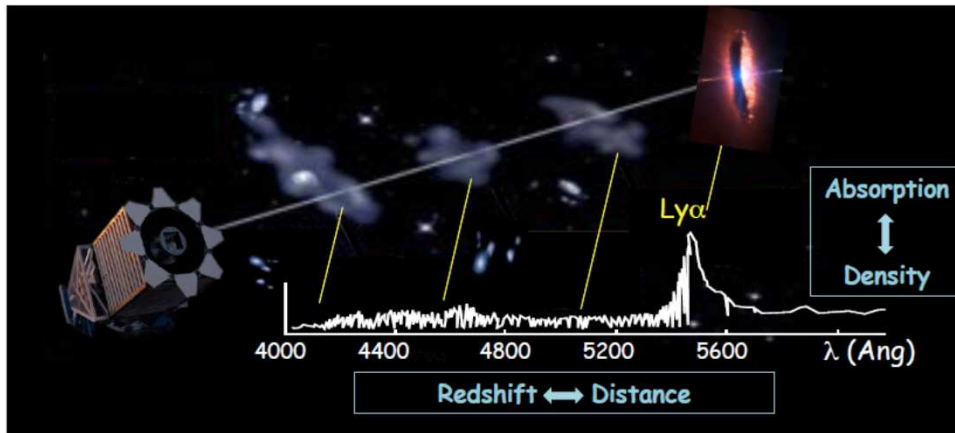
# Limites cosmologiques

CMB



Les neutrinos affectent la structure du CMB et la formation de grandes structures.

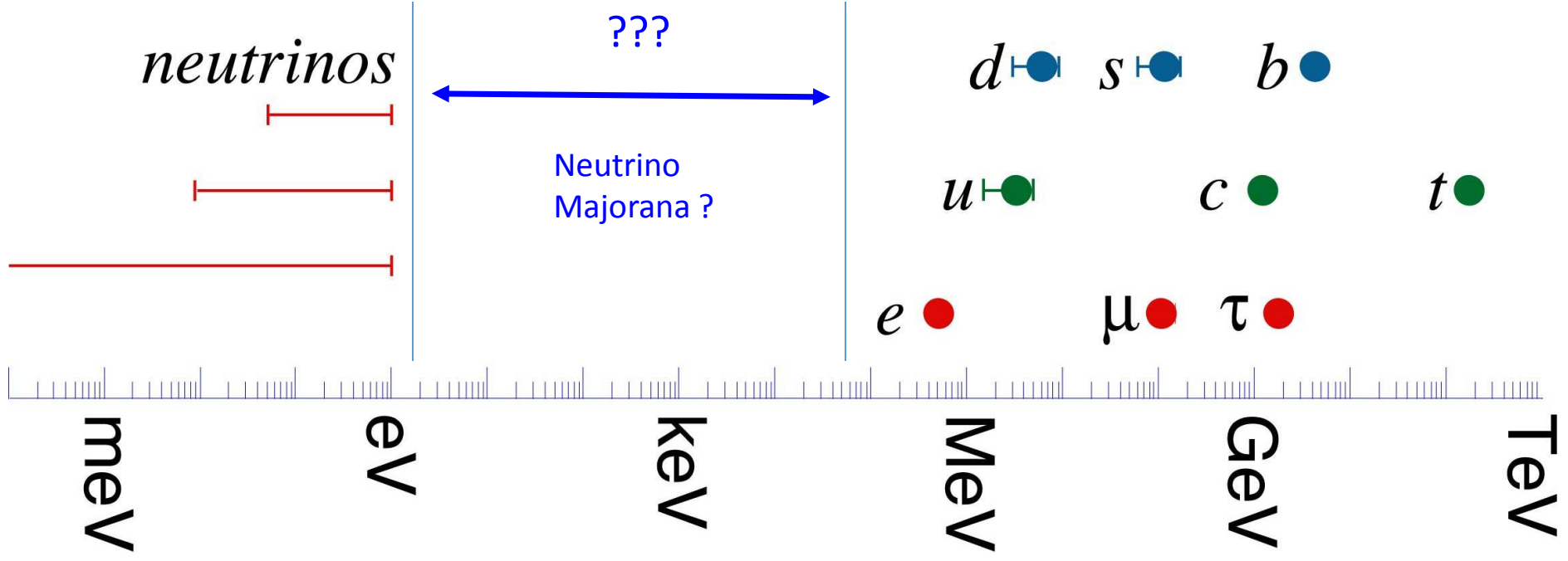
Lyman  $\alpha$



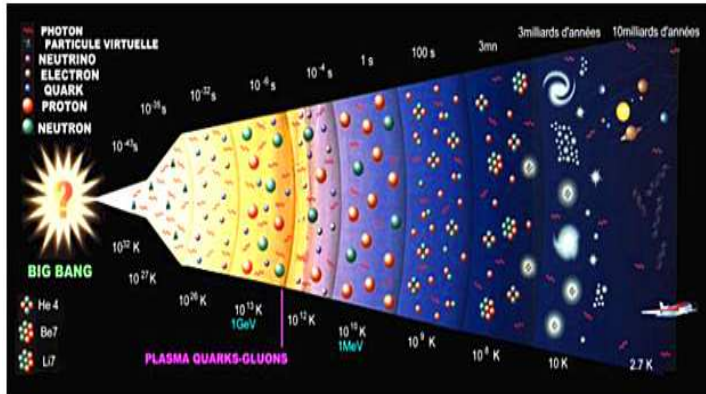
$$\sum_i m_i < 0,23 \text{ eV} \rightarrow \text{CMB (PLANK)}$$

$$\sum_i m_i < 0,12 \text{ eV} \rightarrow \text{Ly}\alpha + \text{CMB}$$





# Asymétrie Matière - Antimatière



→ Particules et antiparticules on dû être créées en nombre équivalent.  
 Pourquoi aujourd'hui on observe seulement matière ??

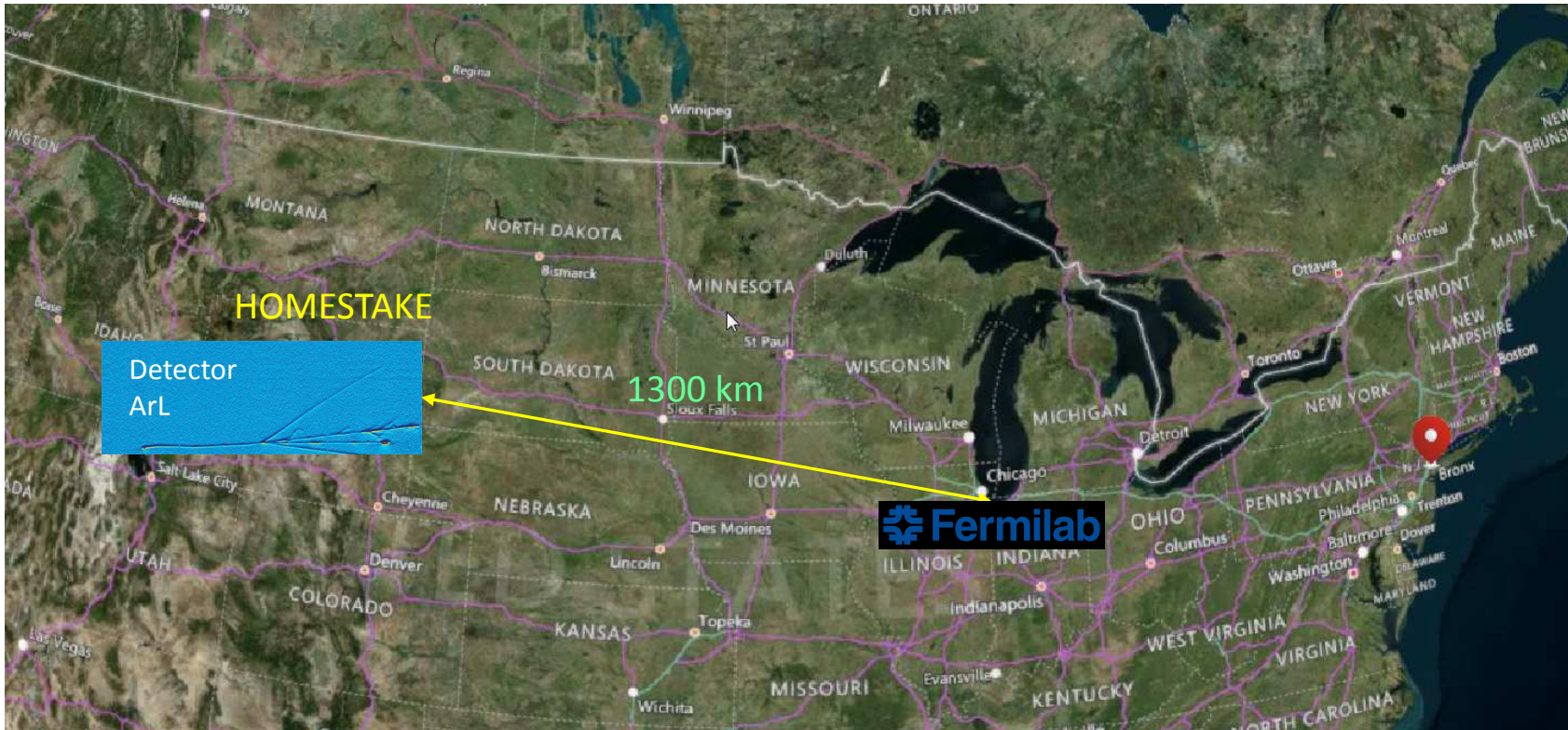
Asymétrie si

- Non conservation du nombre leptonique => neutrino Majorana (*leptogenèse*)
- Non conservation de CP

C → Particule – Antiparticule  
 P → Symétrie miroir (x-> -x)

$$\begin{aligned}
 P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = & \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \Delta_{31} \\
 & + \Delta_{21} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23} \sin \Delta_{31} \cos(\Delta_{31} + \delta_{CP}) \\
 & + \Delta_{21}^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12}
 \end{aligned}$$

CP Violation  $\Rightarrow \nu_{\mu} \rightarrow \nu_e \neq \bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$





# Nature du neutrino



Dirac

Majorana

Particules		
charge = 2/3 masse = 2.3 MeV/c²	charge = 2/3 masse = 1.275 GeV/c²	charge = 2/3 masse = 173.2 GeV/c²
u up	c charm	t top
charge = -1/3 masse = 4.8 MeV/c²	charge = -1/3 masse = 95 GeV/c²	charge = -1/3 masse = 4.18 GeV/c²
d down	s strange	b bottom
charge = -1 masse = 0.511 MeV/c²	charge = -1 masse = 106.7 MeV/c²	charge = -1 masse = 1.777 GeV/c²
e électron	μ muon	τ tau
charge = 0 masse = 0.2 eV/c²	charge = 0 masse = 0.17 eV/c²	charge = 0 masse = 1.6 MeV/c²
ν <sub>e</sub> neutrino électronique	ν <sub>μ</sub> neutrino muonique	ν <sub>τ</sub> neutrino tauique

≠

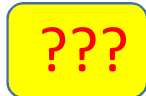
Antiparticules		
charge = -2/3 masse = 2.3 MeV/c²	charge = -2/3 masse = 1.275 GeV/c²	charge = -2/3 masse = 173.2 GeV/c²
ū anti-up	c̄ anti-charm	t̄ anti-top
charge = 1/3 masse = 4.8 MeV/c²	charge = 1/3 masse = 95 GeV/c²	charge = 1/3 masse = 4.18 GeV/c²
d̄ anti-down	s̄ anti-strange	b̄ anti-bottom
charge = 1 masse = 0.511 MeV/c²	charge = 1 masse = 106.7 MeV/c²	charge = 1 masse = 1.777 GeV/c²
ē positron	μ̄ anti-muon	τ̄ anti-tau
charge = 0 masse = 0.2 eV/c²	charge = 0 masse = 0.17 eV/c²	charge = 0 masse = 1.6 MeV/c²
ν̄ <sub>e</sub> anti-neutrino électronique	ν̄ <sub>μ</sub> anti-neutrino muonique	ν̄ <sub>τ</sub> anti-neutrino tauique

ou

Particules		
charge = 0 masse = 0.2 eV/c²	charge = 0 masse = 0.17 eV/c²	charge = 0 masse = 1.6 MeV/c²
ν <sub>e</sub>	ν <sub>μ</sub>	ν <sub>τ</sub>

≡

Antiparticules		
charge = 0 masse = 0.2 eV/c²	charge = 0 masse = 0.17 eV/c²	charge = 0 masse = 1.6 MeV/c²
ν̄ <sub>e</sub>	ν̄ <sub>μ</sub>	ν̄ <sub>τ</sub>

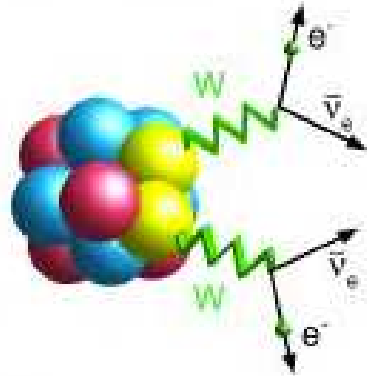
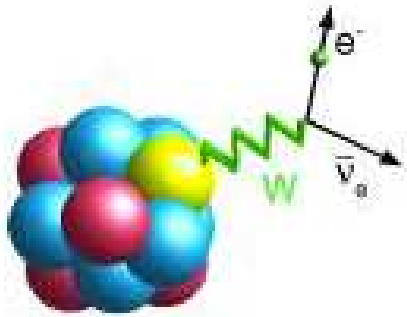


- Neutrino Majorana : Hors Modèle Standard (*nombre leptonique non conservé*)
- : Nécessaire en Leptogenèse
- : Masse neutrino léger (*see saw mecanism*)

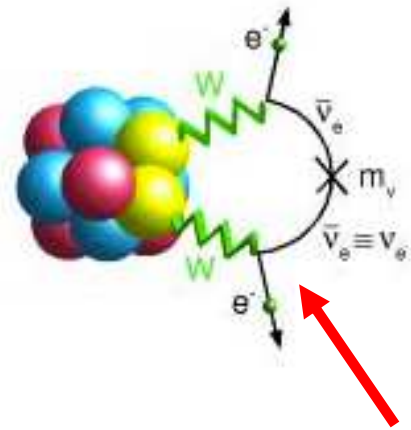
Si neutrino Majorana la Décroissance Double Bêta doit exister

# Nature du neutrino : Décroissance $\beta\beta$

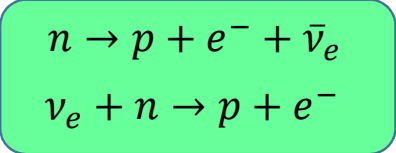
Décroissance  $\beta$  simple



Décroissance  $\beta$  avec  $\nu$   
Permise  
 $(\beta\beta)2\nu$

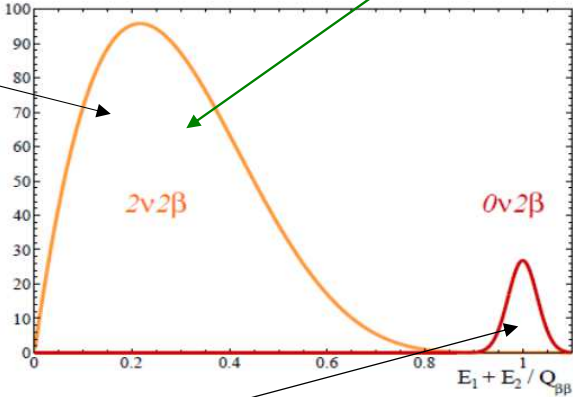


Décroissance  $\beta$  sans  $\nu$   
Interdite  
 $(\beta\beta)0\nu$



$\nu \equiv \bar{\nu} = \nu_{Majorana}$

Observée depuis 1991



# Nature du neutrino : Décroissance $(\beta\beta)0\nu$

Processus radioactive a basse énergies

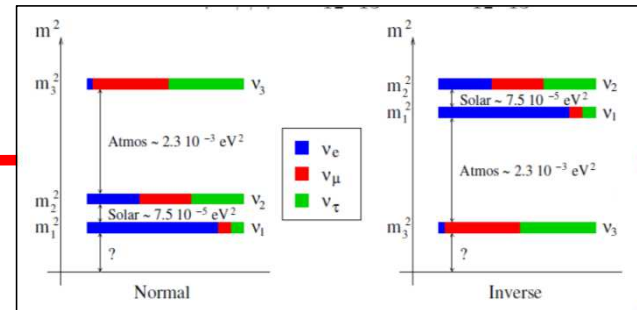
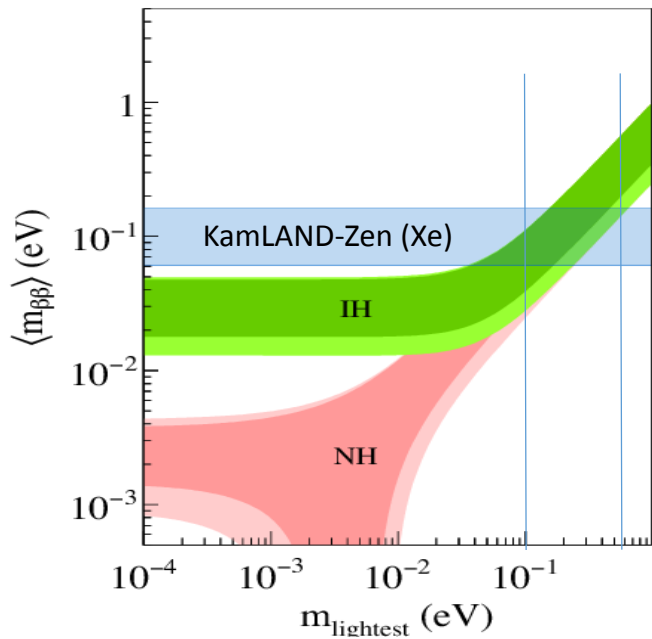
Les sources  $\beta\beta$

Isotope	$Q_{\beta\beta}$ [MeV]
$^{48}\text{Ca}$	4.274
$^{76}\text{Ge}$	2.039
$^{82}\text{Se}$	2.996
$^{96}\text{Zr}$	3.348
$^{100}\text{Mo}$	3.035
$^{116}\text{Cd}$	2.805
$^{130}\text{Te}$	2.529
$^{136}\text{Xe}$	2.462
$^{150}\text{Nd}$	3.368

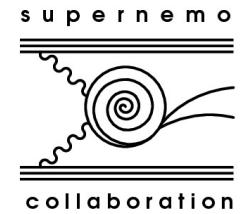
➤ Jamais observée :  $T_{\frac{1}{2}} > 10^{24} - 10^{25}$  années

➤  $(T_{\frac{1}{2}}^{0\nu})^{-1} \propto \langle m_{\nu} \rangle^2$

➤  $\langle m_{\nu} \rangle = |\cos^2\theta_{13}(m_1\cos^2\theta_{12} + m_2e^{2i\alpha}\sin^2\theta_{12}) + m_3e^{2i\beta}\sin^2\theta_{13}|$

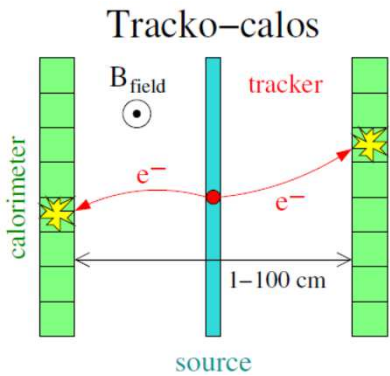


# Un exemple : SuperNEMO

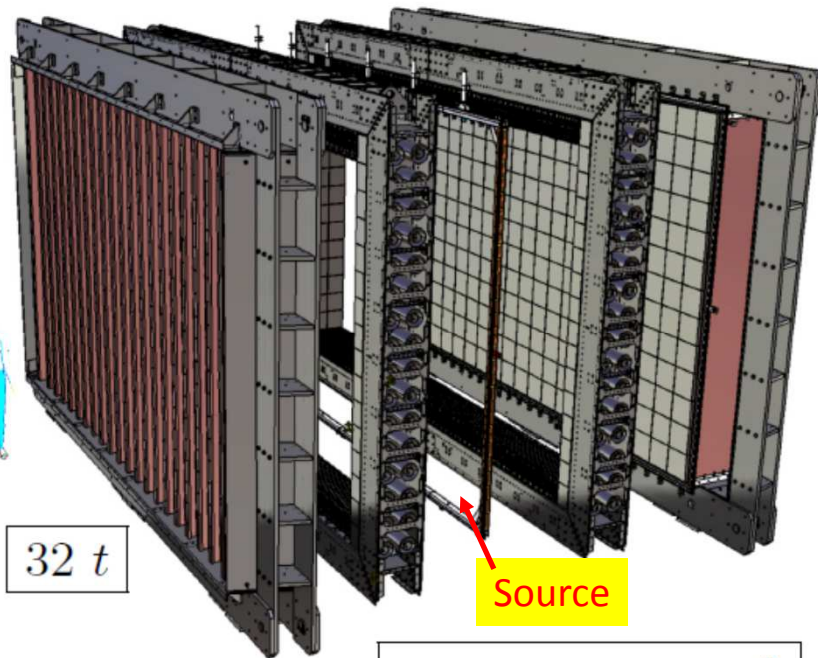


Détecteur modulaire

$$\langle m_\nu \rangle < 0.06 - 0.10 \text{ eV} \quad (20 \text{ modules})$$

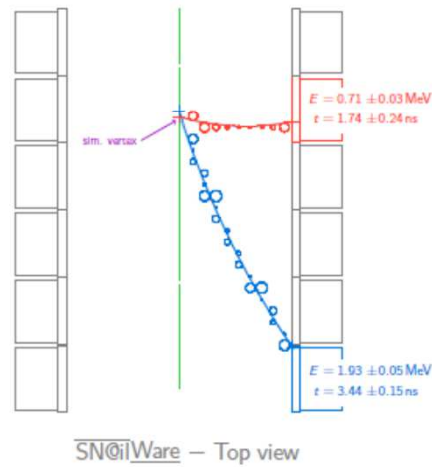


Trajectoire et énergie



32 t

$6.2 \times 2.1 \times 4.1 \text{ m}^3$



SN@iWare – Top view

Module démonstrateur en cours d'installation  
au Laboratoire Souterrain de Modane

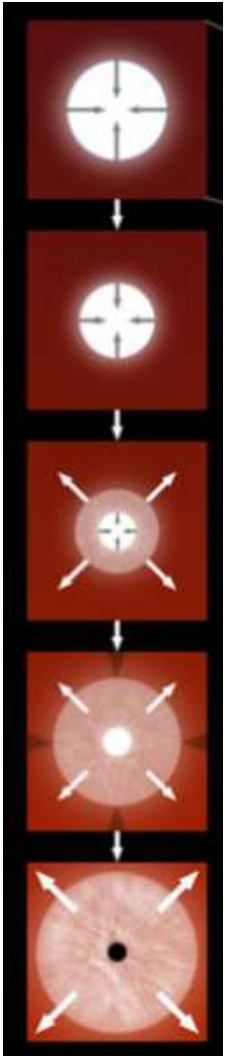
## Supernova 1987 A





# Supernova de type II

$M > 8 M_{\odot}$



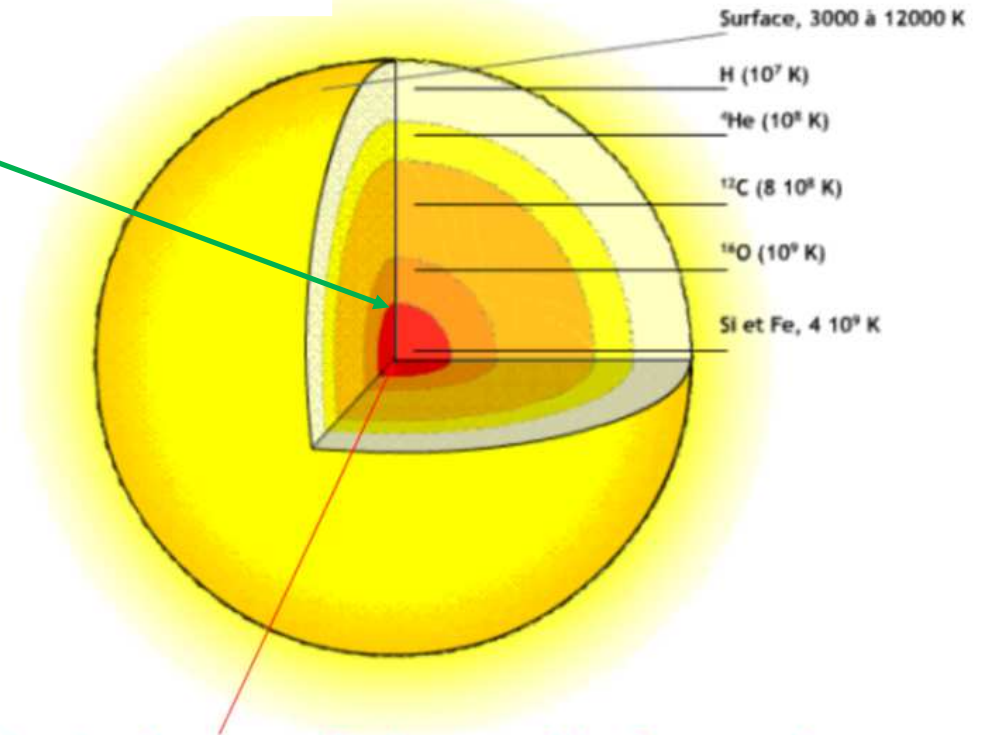
La masse du noyau  
Depasse  $1.44 M_{\odot}$   
Effondrement

Leptonisation du noyau  
 $p + e^{-} \rightarrow n + \nu$   
Le noyau rétréci

Le noyau atteint la densité nucléaire  
Les couches extérieures rebondissent

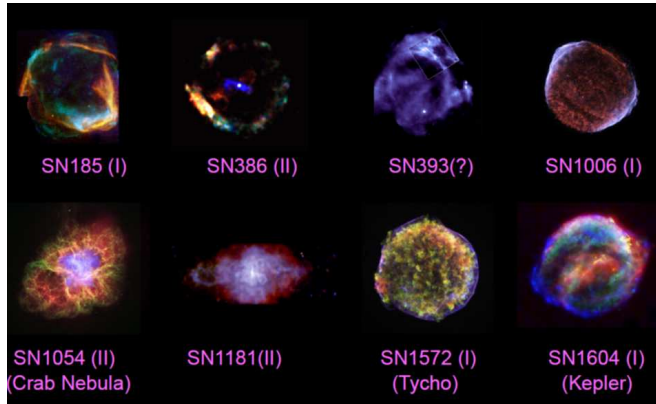
L'onde de choc ralentit

L'onde de choc est revigorée par les  $\nu$ .  
Lorsqu'il atteint la surface  
l'étoile brille comme une galaxie  
Au centre reste un trou noir ou une étoile à neutrons



Plus aucune réaction thermonucléaire => effondrement du noyau

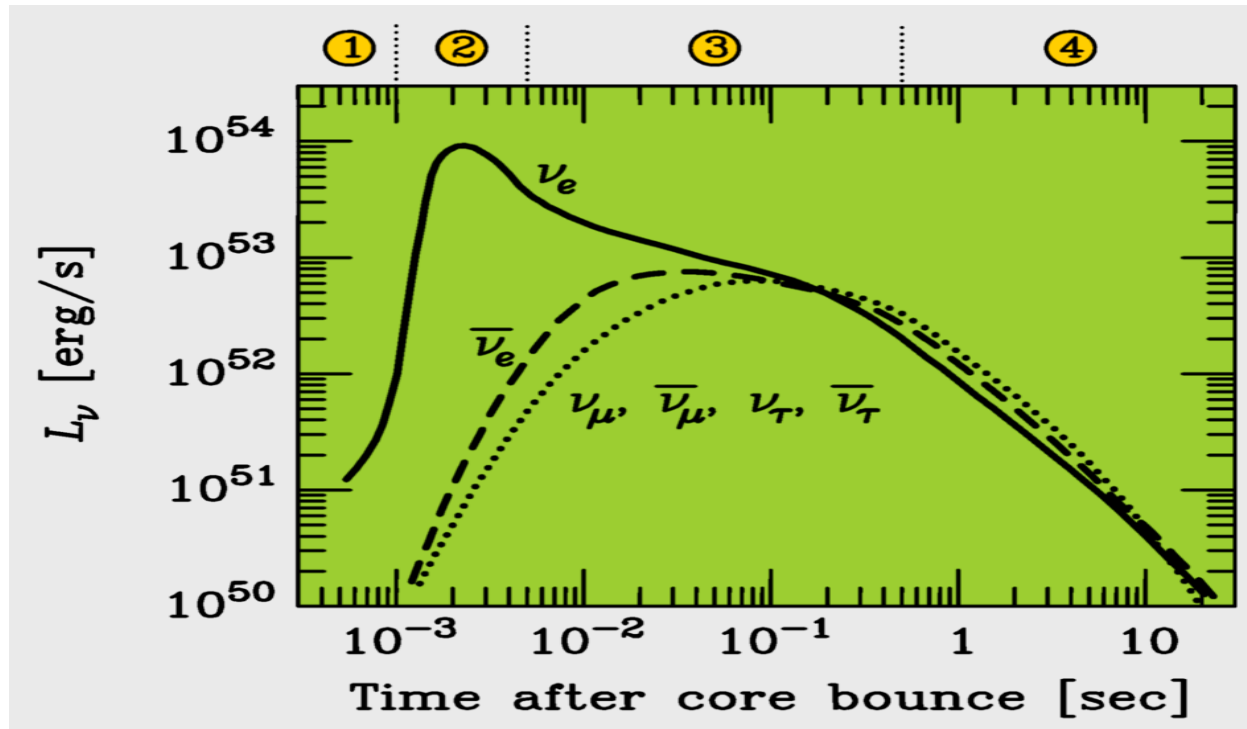
## Supernovas du passé



23 Février 1987, Ian Shelton découvre (à l'œil) une SN dans le grand Nuage de Magellan



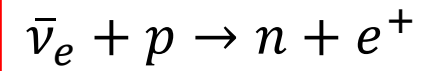
## Les neutrinos de la supernova



99 % de l'énergie produite est sous forme de neutrinos

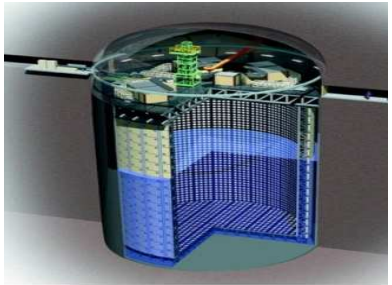
# Découverte rétrospective

3h avant l'observation en optique les neutrinos arrivent sur Terre



IMB (USA)

8 v



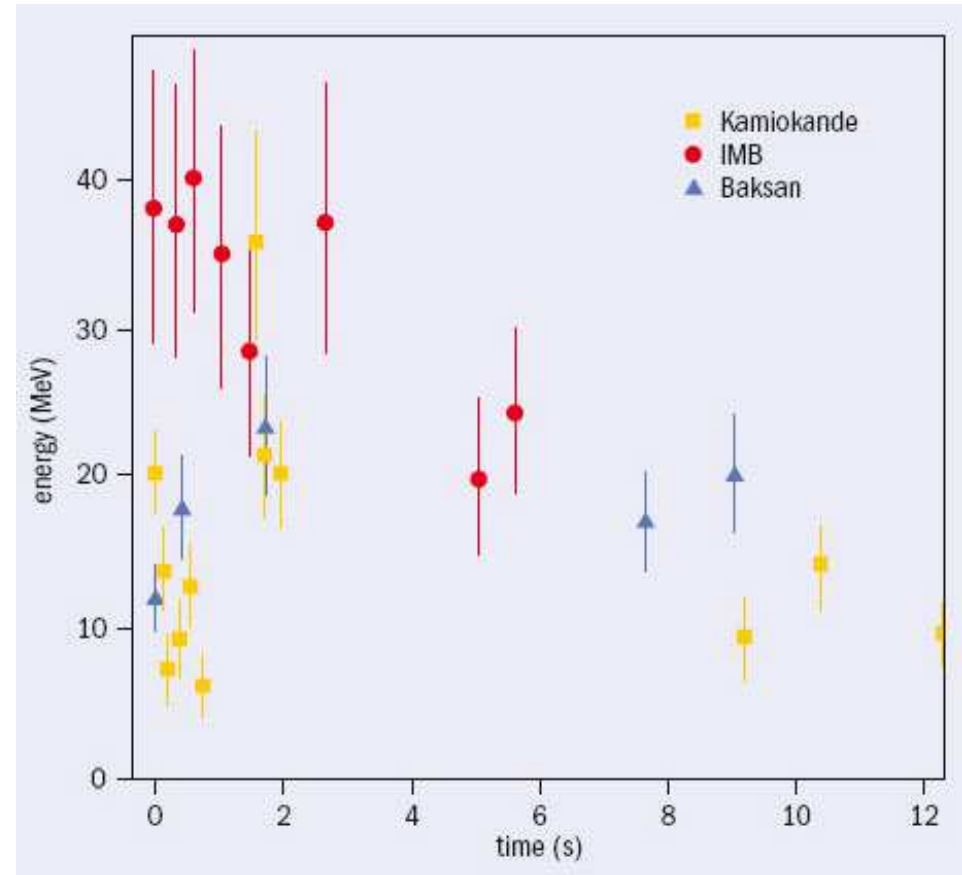
Kamiokande (Japon)

12 v



Baksan (URSS)

4 v



## Peu de neutrinos mais beaucoup d'information

- Energie produite dans l'explosion retrouvée à partir des neutrinos
- Confirmation du modèle physique sur les Supernovas (sphère de neutrinos)
  
- Masse du neutrino :  $m_\nu < 20 \text{ eV}$
- Moment magnétique du neutrino :  $\mu_\nu < 5 \cdot 10^{-13} \mu_B$
- Charge électrique :  $q_\nu < 10^{-17} q_e$
- Vie moyenne du neutrino
- etc

Et tout ça avec 24 neutrinos !

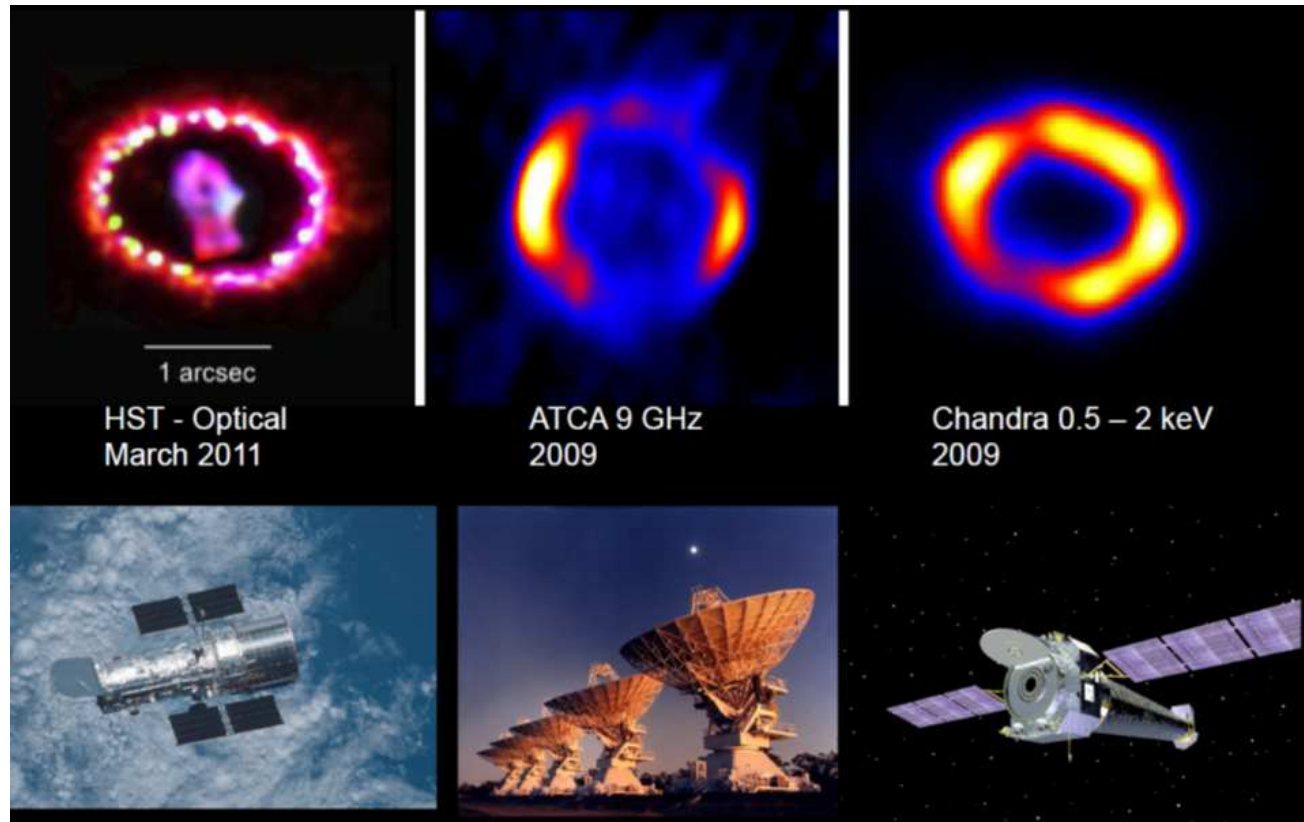


A l'avenir de milliers de neutrinos / SN pourraient être observées



SuperK, JUNO, KM3NeT, SNO+, ...

## Véritable premier évènement multi-messenger



Mais il y a encore beaucoup plus a dire sur le neutrino.

→ Neutrinos stériles

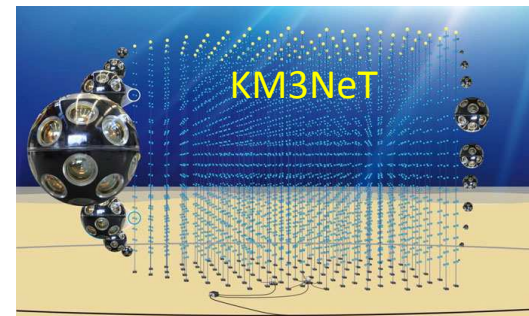
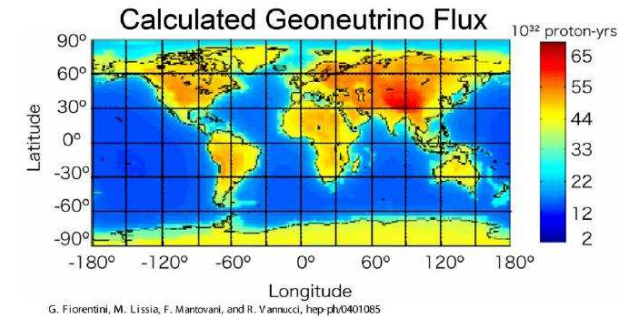
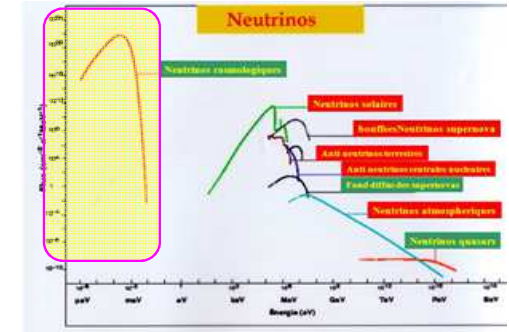
→ Geoneutrinos

→ Astronomie neutrino haute énergie

→ Propriétés électromagnétiques des neutrinos

→ Neutrinos cosmologique

→ ...



# Conclusion

« Un neutrino, ce n'est rien, quasiment rien ... C'est la quantité de réel la plus ténue jamais imaginée par l'être humain »

*Frederick Reines*

Mais c'est la plus extraordinaire des particules réelles jamais observée, a ce jour.