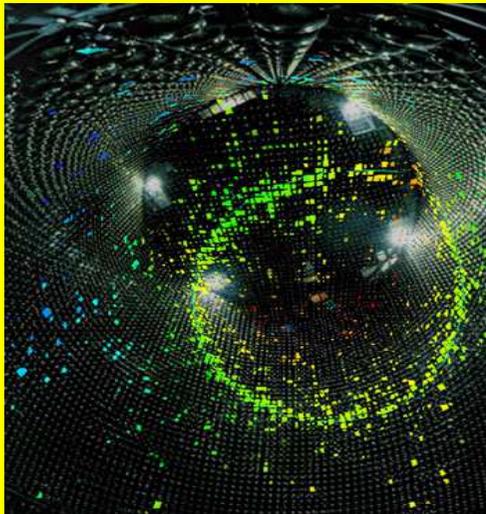


Astro - Neutrinos



Jose Busto
Centre de physique des particules de Marseille
Université Aix - Marseille

CPPM
25 / 06 / 2015

LE NEUTRINO

*Histoire et Physique d'un
invraisemblable Remède*

Naissance de la radioactivité

DÉCOUVERTE DES RAYONS X

1895



Wilhelm Conrad Röntgen



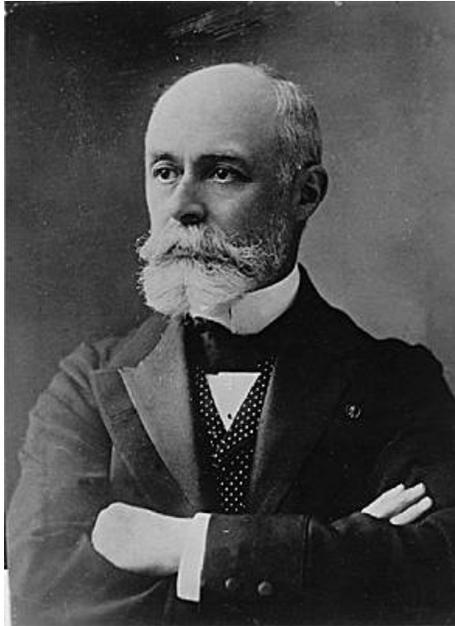
Tube de Crookes



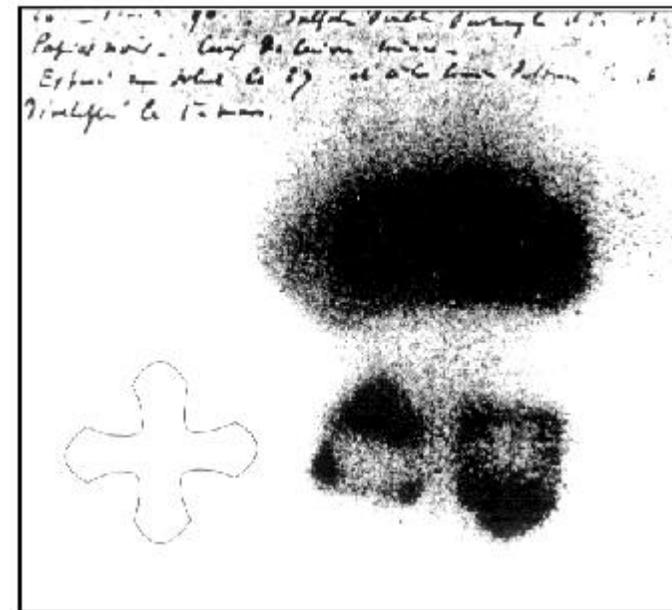
Radiographie aux rayons X

DÉCOUVERTE DE LA RADIOACTIVITÉ

Janvier 1896



Henri Becquerel



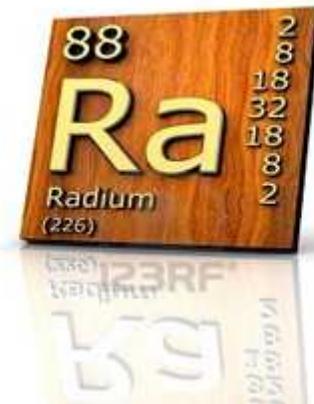
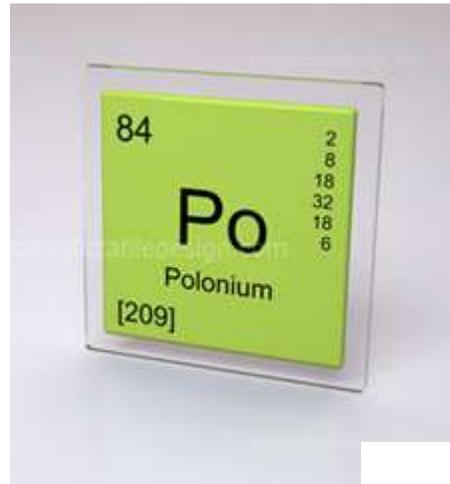
Plaque photographique impressionnée par la radioactive

DÉCOUVERTE DES PREMIERS RADIOÉLÉMENTS

1898

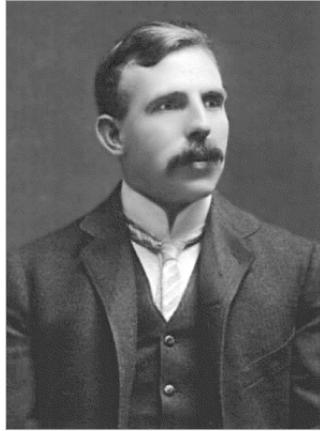


Pierre et Marie Curie



PROPRIÉTÉS DES RAYONNEMENTS

1900 . . .



Rutherford



Curie



Soddy



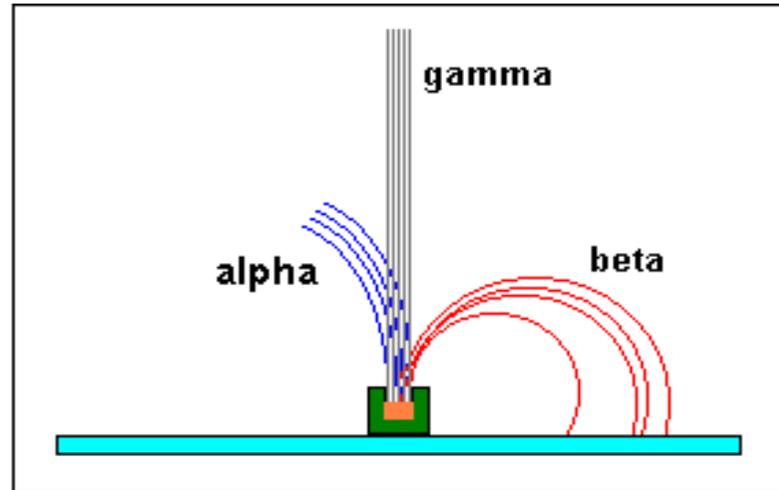
Geiger



Villard

et bien d'autres

PROPRIÉTÉS DES RAYONNEMENTS



- Radioactivité alpha : charge positive => noyau d'He
- Radioactivité beta : charge négative => électrons
- Radioactivité gamma : photons de haute énergie



PROPRIÉTÉS DES RAYONNEMENTS

En général :

Noyau_A → **Noyau_B** + **Particule**

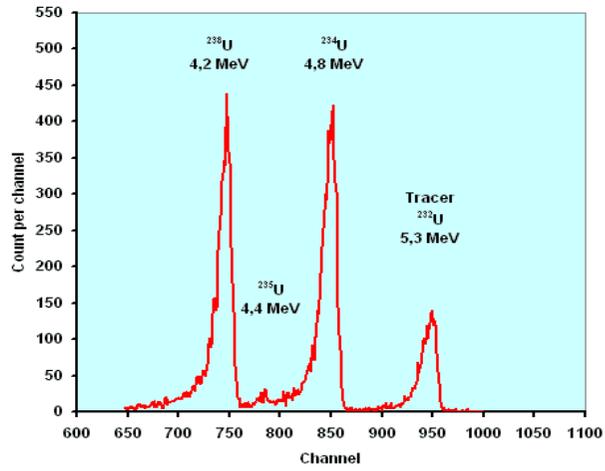
Avec Masse (Noyau) \gg Masse (Particule)

Conservation de :

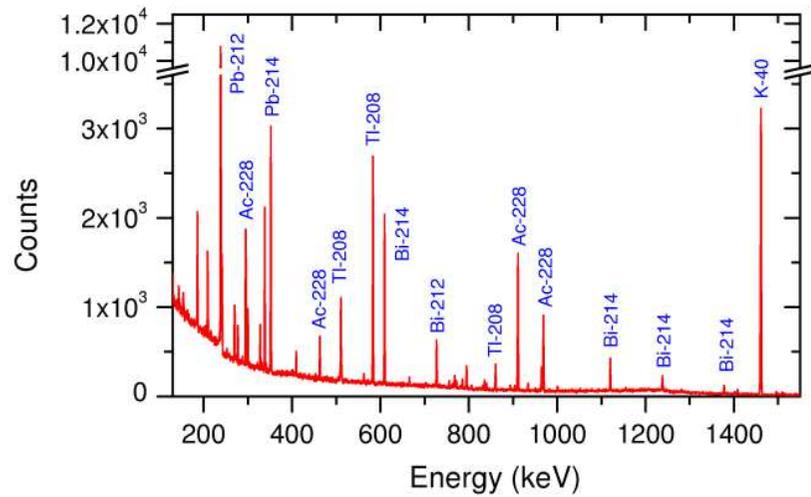
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Energie} \quad E_A = E_B + E_p \\ \text{Impulsion} \quad \vec{P}_A = \vec{P}_B + \vec{P}_p \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow E_p = (M_A - M_B - M_p) \times \frac{M_B}{M_B + M_p} = C^{te}$$

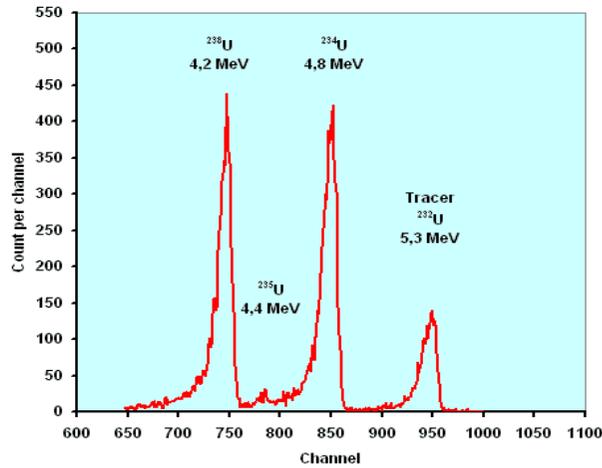
\Rightarrow l' énergie de la particule est « discrète »



Spectre alpha => OK

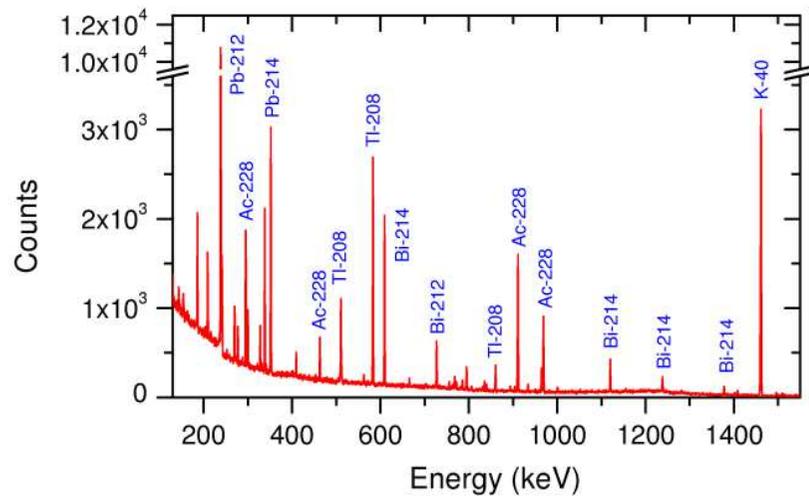
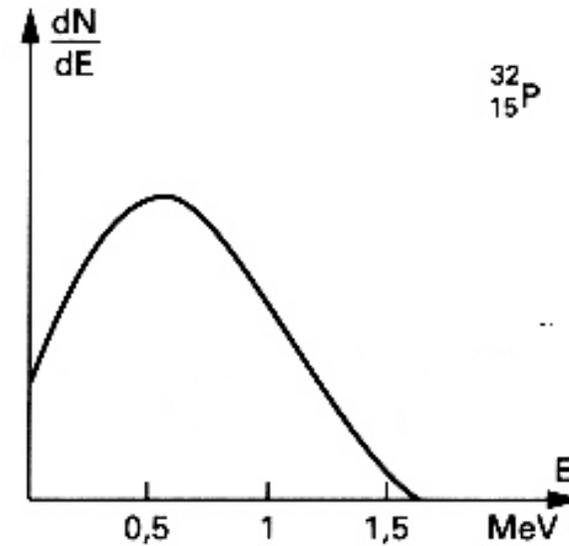


Spectre gamma => OK



Spectre alpha => OK

Spectre beta => !!!!???



Spectre gamma => OK

L'énergie n'est elle pas conservée ?!



NAISSANCE D'UNE IDÉE

December 4, 1930

Dear radioactive ladies and gentlemen,

...I have hit upon a 'desperate remedy' to save...the law of conservation of energy.

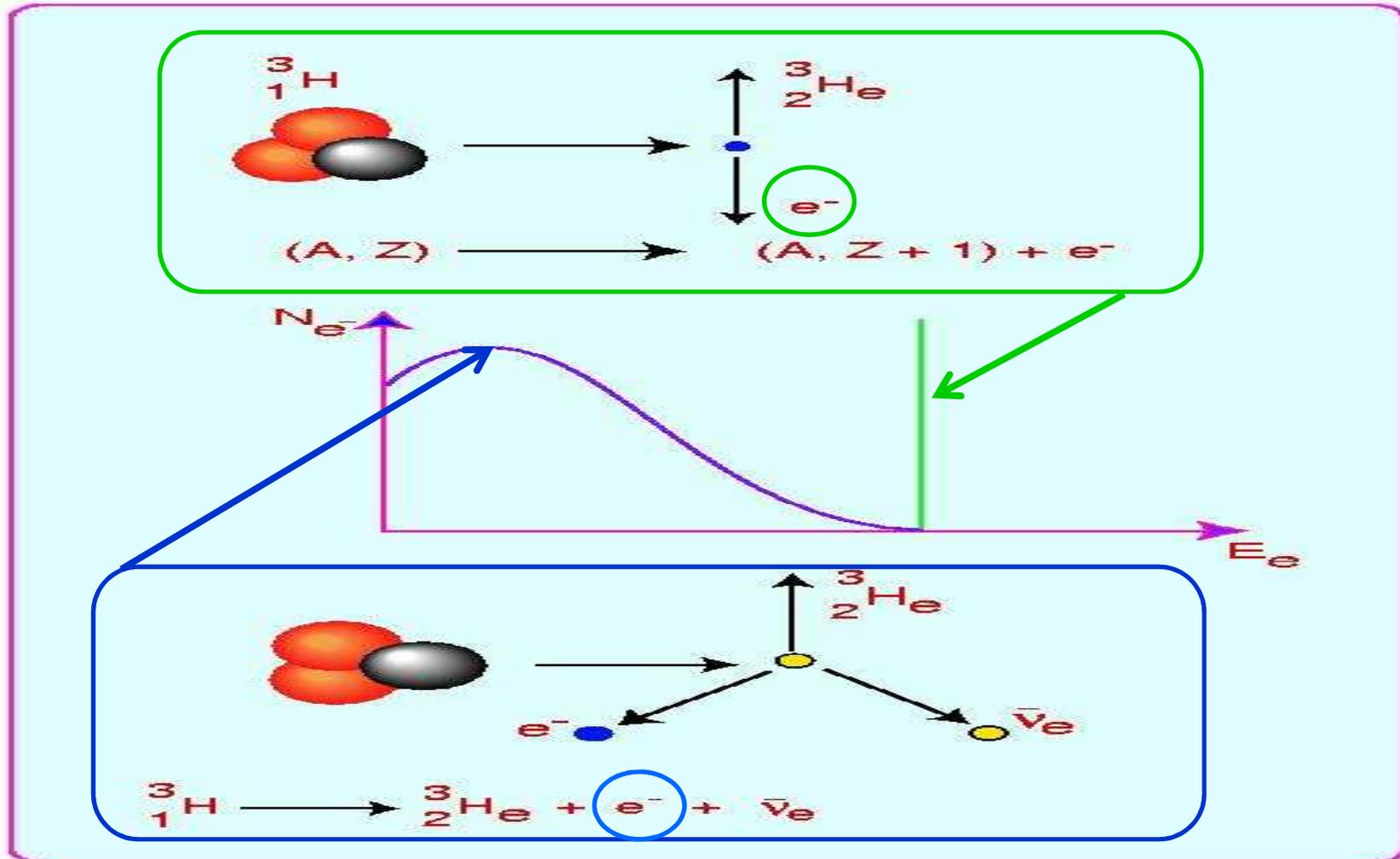
Namely the possibility that there exists in the nuclei electrically neutral particles, that I call neutrons... I agree that my remedy could seem incredible... but only the one who dare can win...

Unfortunately I cannot appear in person, since I am indispensable at a ball here in Zurich.

Your humble servant
W. Pauli



L'idée de Pauli



UNE IDÉE INVÉRIFIABLE ?

- Masse très faible ou nulle
- Charge nulle
- Interaction très difficile



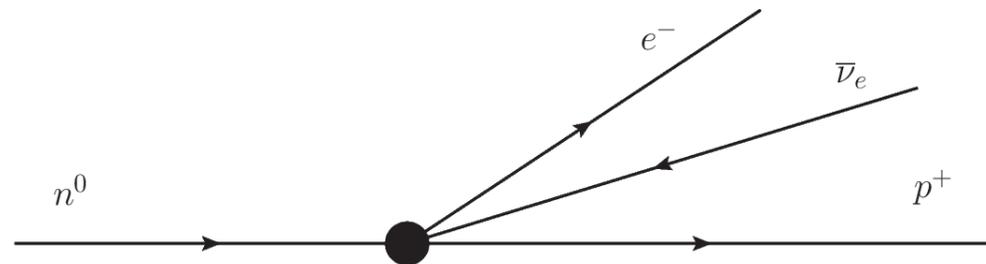
*« Je viens de faire quelque chose d'horrible.
J'ai inventé une particule indétectable »*

ADOPTION DU NEUTRINO



Fermi 1933

Théorie de la décroissance beta



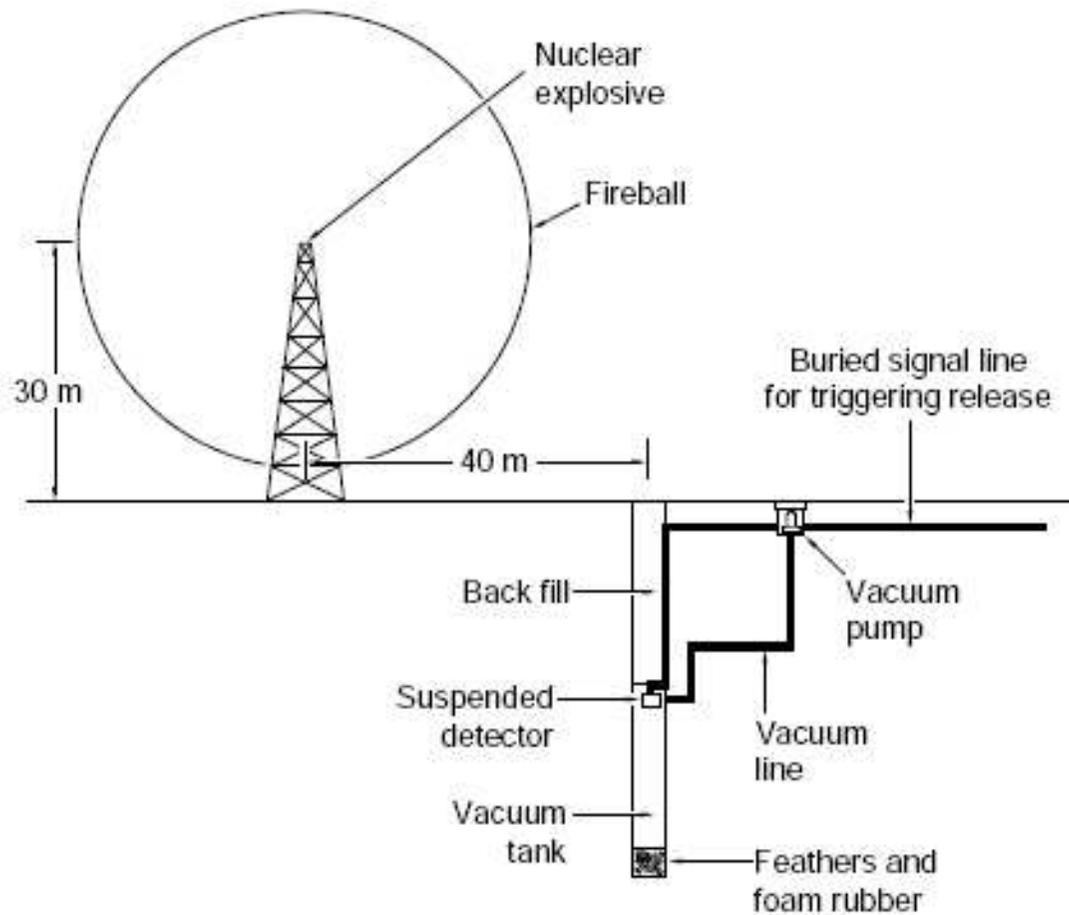
Le « neutron » de Pauli devient le neutrino de Fermi

Où peut-on trouver des neutrinos en grande quantité ?



Les produit de fission sont des émetteurs beta => neutrinos

Premières idées





Réacteur nucléaire de Handford



Réacteur nucléaire de Savannah River

Mieux dans une centrale nucléaire

Expérience plotergeist



C. Cowan

F. Reines

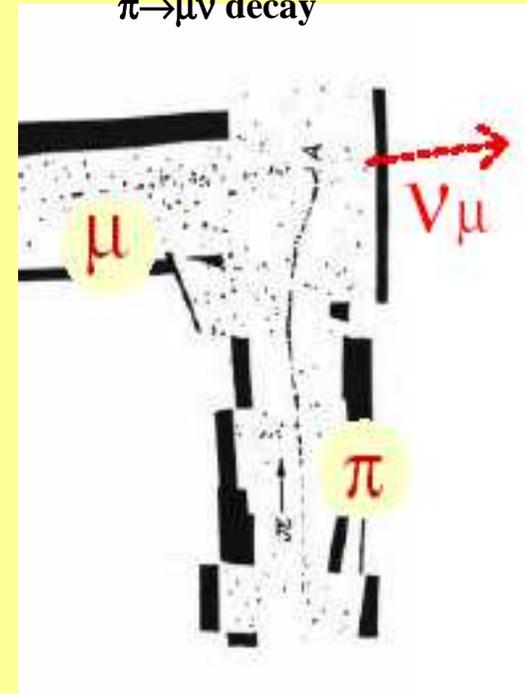
1953 a 1956

Découverte du neutrino électronique

UNE BALADE EN MONTAGNE



1st Observed
 $\pi \rightarrow \mu \nu$ decay



Découverte du muon (électron lourd) dans les rayons cosmiques en 1937 : Anderson et Neddermeyer

Deux Neutrinos

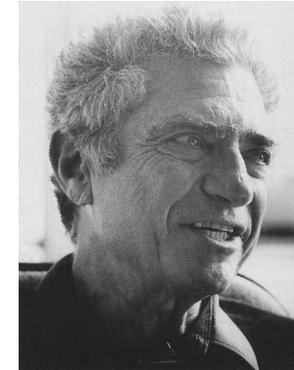
1962



Schwartz

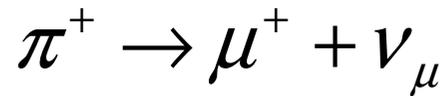


Lederman

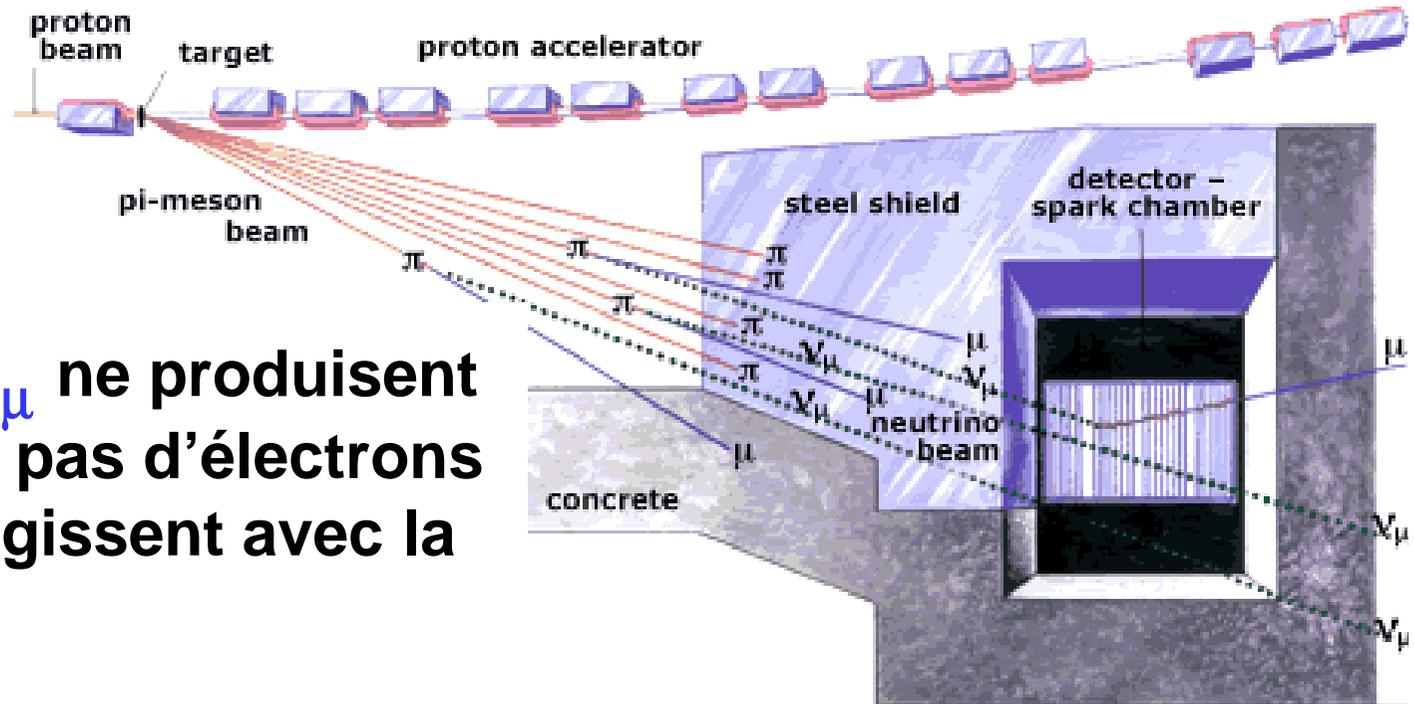


Steinberger

Premier faisceau
de neutrinos
artificiels



Ces neutrinos ν_μ ne produisent
que des muons, pas d'électrons
quand ils interagissent avec la
matière



- 1973 Découverte d'un nouveau « électron » super lourd : le tau



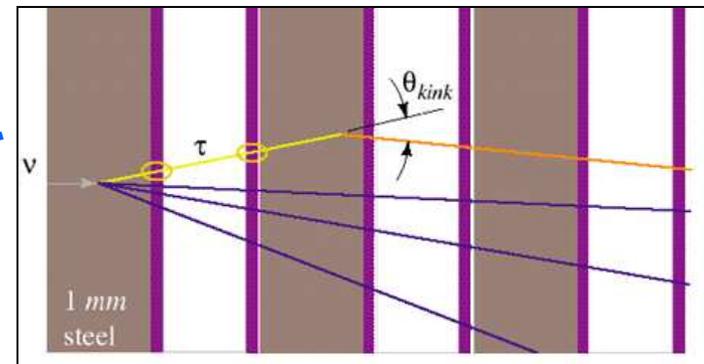
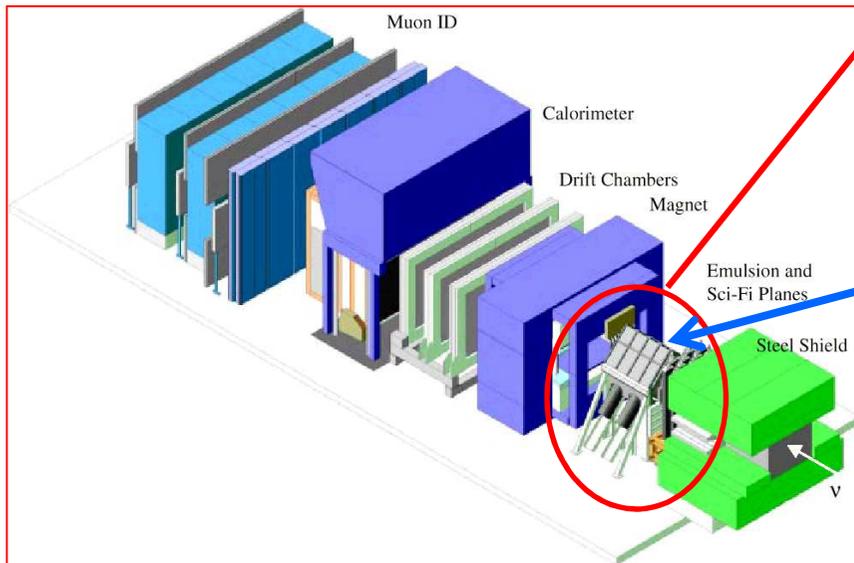
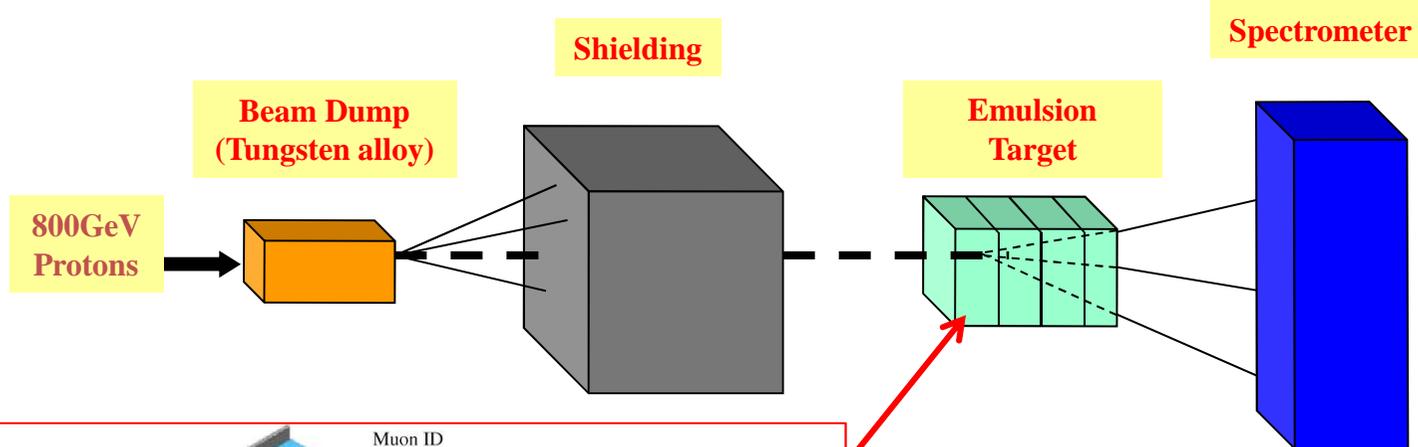
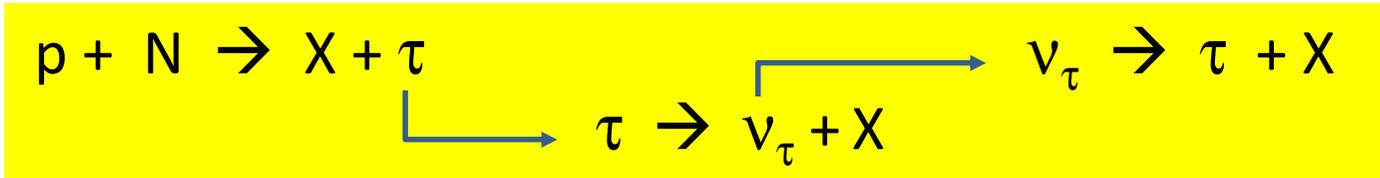
SPEAR @ SLAC

$$e^{+} + e^{-} \rightarrow \tau^{+} + \tau^{-}$$

Trois Neutrinos

DONUT @ FERMILAB

- 2001 découverte du neutrino de tau



Emulsion photo

Modelé Standard

12 particules élémentaires

4 forces fondamentales

Particules
de
Matière

Particules
de
Interaction

FERMIONS

1^{ère} Génération
(matière ordinaire)

2^{ème} Génération

3^{ème} Génération

LEPTONS

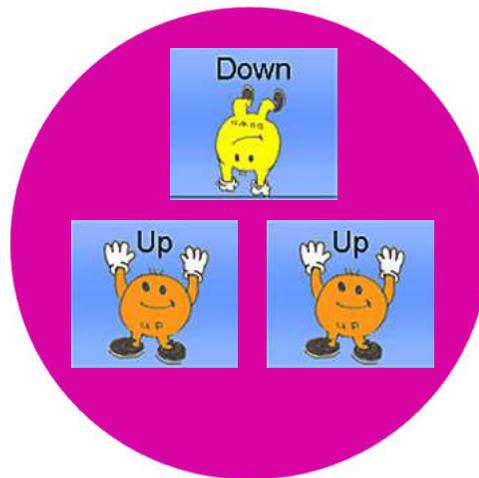
QUARKS

Electron 	Neutrino  Electronique	Up 	Down 
Muon 	Neutrino  Muonique	Strange 	Charmed 
Tau 	Neutrino  Tauonique	Bottom 	Top 
Photon (électromagnétisme) 	8 Gluons (force forte) 	$W^+ W^- Z^0$ (force faible) 	Graviton ?? (gravitation) 

Modelé Standard

12 particules élémentaires

Agrégats

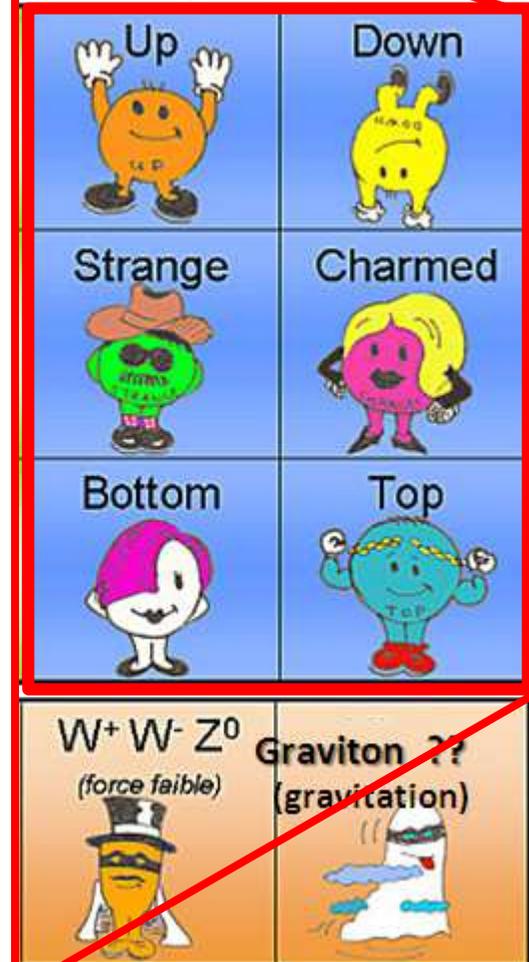


proton

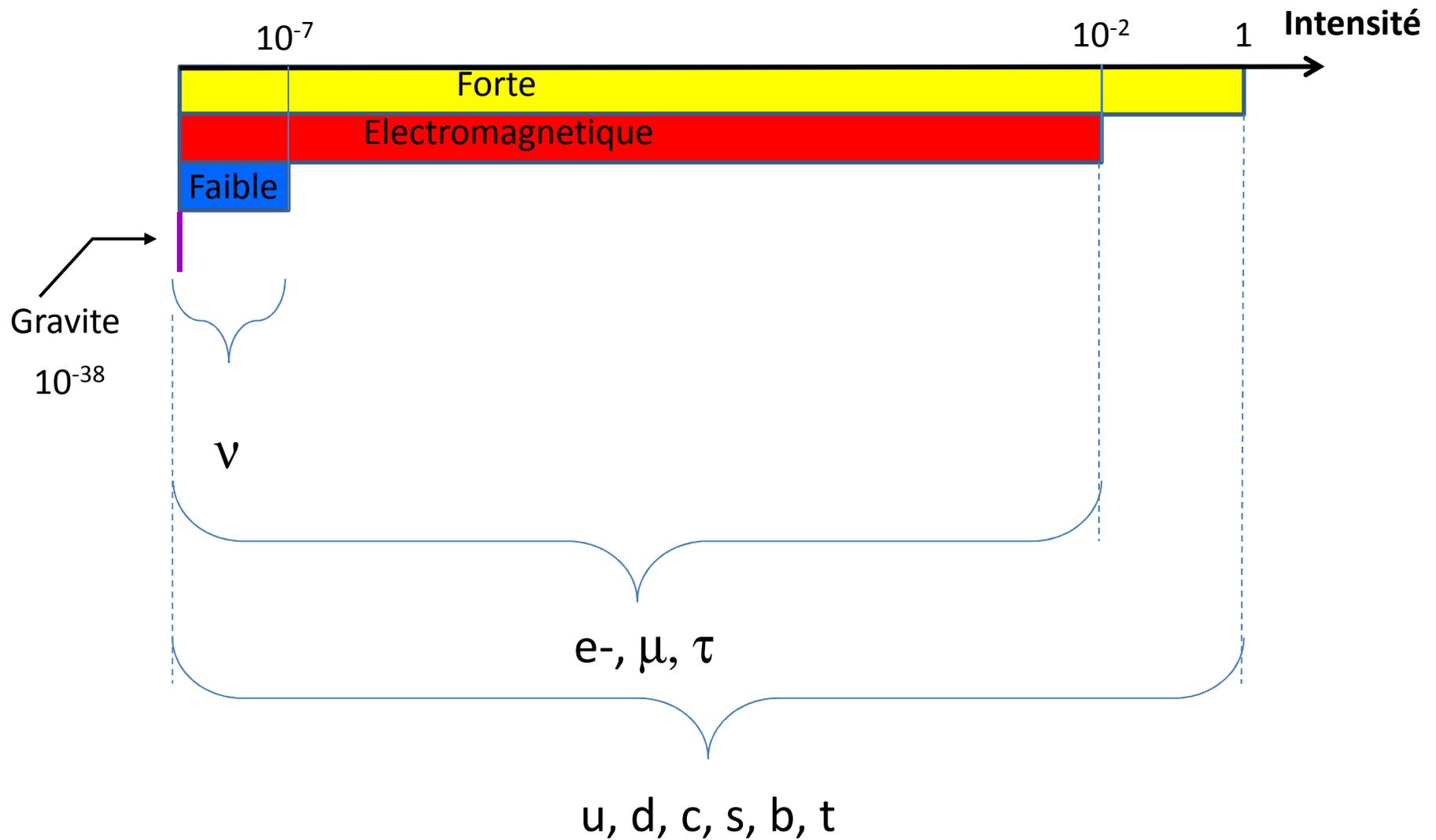
Mais aussi :

n , π , K , Δ , Λ , Σ , Ξ , Ω ...

QUARKS



Un mot sur l'interaction entre particules



Le neutrino : petit par la taille mais
grand par le nombre

$$\sim 1000 \gamma / \text{cm}^3$$

$$\sim 330 \nu / \text{cm}^3$$

$$\sim 10^{-7} \text{p} / \text{cm}^3$$

Physique imprécise

➤ Masse $\left\{ \begin{array}{l} m_e < 2 \text{ eV} \\ m_\mu < 190 \text{ keV} \\ m_\tau < 18.2 \text{ MeV} \end{array} \right. \rightarrow \neq 0$

➤ Charge $< 3.7 \cdot 10^{-12} Q_e$

➤ Vie moyenne $> 7 \cdot 10^9 \text{ s/eV}$

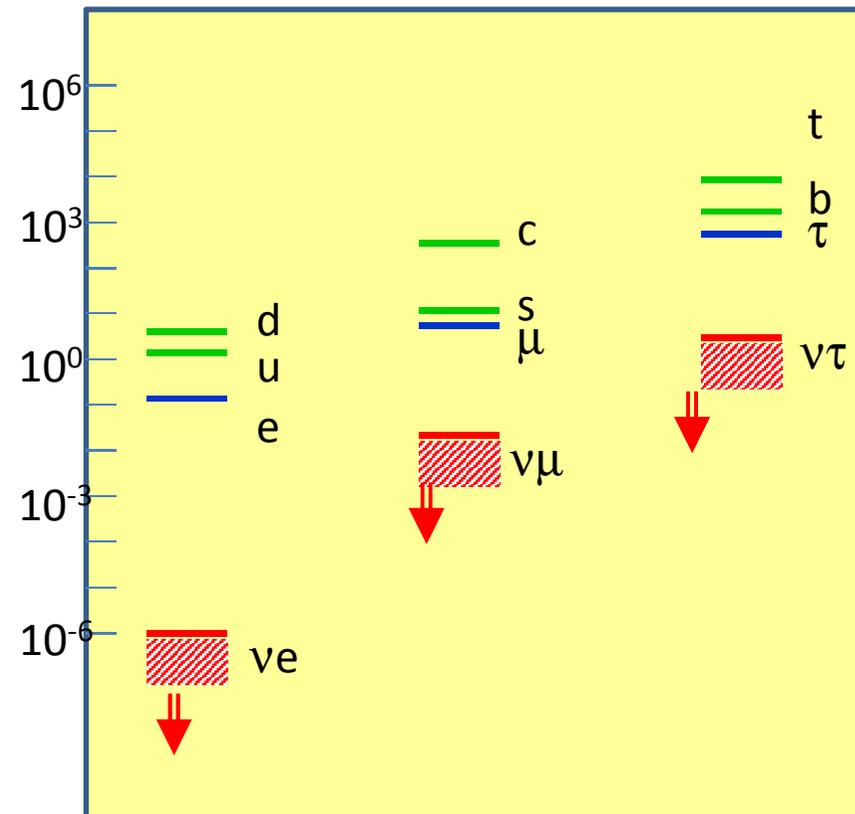
➤ Moment magnétique $< 9 \cdot 10^{-11} \mu_B \rightarrow \neq 0$

Particule particulière

Charge électrique

Electron  Electronique	Neutrino  Electronique	Up  Up	Down  Down
Muon  Muonique	Neutrino  Muonique	Strange  Strange	Charmed  Charmed
Tau  Tauonique	Neutrino  Tauonique	Bottom  Bottom	Top  Top
≠0	=0	≠0	≠0

Masse
(MeV)



Particule ou AntiParticule ?

Particules

Electron 	Neutrino Electronique 	Up 	Down 
Muon 	Neutrino Muonique 	Strange 	Charmed 
Tau 	Neutrino Tauonique 	Bottom 	Top 

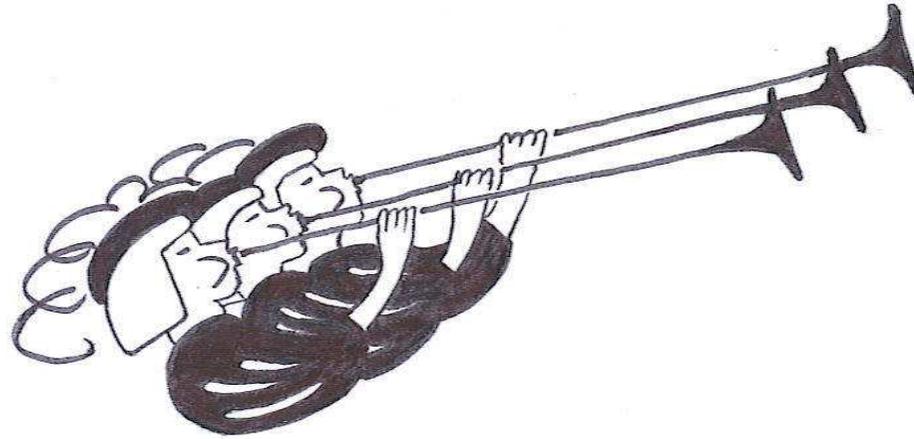
Anti-Particules

Down 	Up 	Neutrino Electronique 	Electron 
Charmed 	Strange 	Neutrino Muonique 	Muon 
Top 	Bottom 	Neutrino Tauonique 	Tau 



Facile pour les particules chargées

Pour le neutrino ?



Décret

Oyez, oyez

Les leptons ont un nombre « Leptonique » = +1

Les antilepton ont un nombre « Leptonique » = -1

Les autres ont un nombre « Leptonique » = 0

Les barions (3 quarks) ont un nombre « Barionique » = +1

Les antibarions ont un nombre « Barionique » = -1

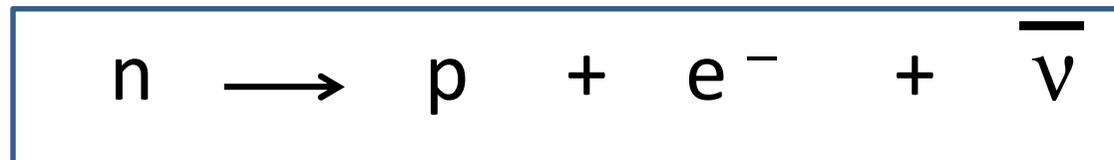
Les autres ont un nombre « Barionique » = 0

Le nombre Leptonique et le Nombre Barionique se conservent.

Exemple

	n	\longrightarrow	p	$+$	e^{-}	$+$	ν
Nombre Lepton. :	0		0		1		-1
Nombre Barion. :	1		1		0		0
Charge :	0		+1		-1		0

C'est donc un antineutrino



et ça marche toujours (jusqu'à présent)

MAIS PAS DE SYMETRIE PROFONDE ASSOCIEE

LE NEUTRINO EST UN FERMION

Equation de Dirac $(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$

Décomposition chirale du champ fermionique $\psi = \psi_L + \psi_R$

$m \neq 0$

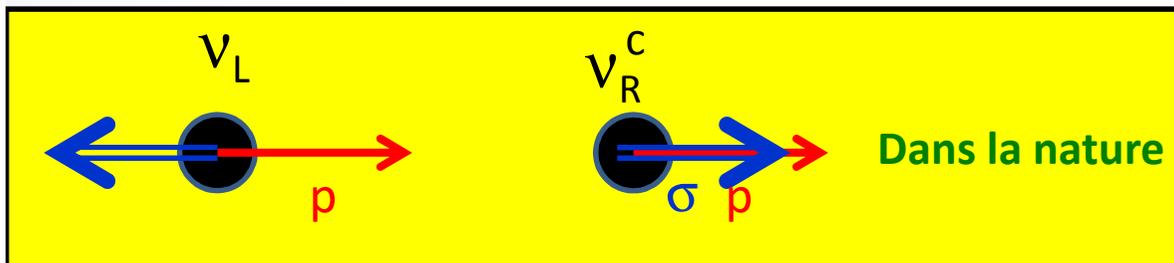
$$\begin{aligned}i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_L &= m\psi_R \\i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_R &= m\psi_L\end{aligned}$$

$\Rightarrow V_L, V_R, V_L^C, V_R^C$

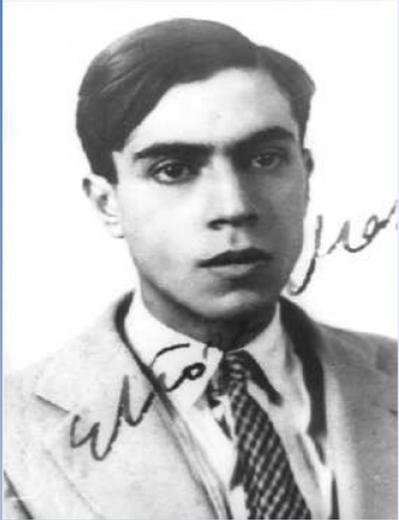
$m = 0$

$$\begin{aligned}i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_L &= 0 \\i\gamma^\mu \partial_\mu \psi_R &= 0\end{aligned}$$

$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} V_L, V_R^C \\ \text{ou} \\ V_L^C, V_R \end{array} \right.$



NATURE DU NEUTRINO



« *Théorie symétrique de l'électrons et du positron* »

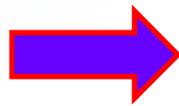
Dans la théorie de Dirac, les champs $\psi(x)$ sont complexes.

$$(i\gamma^\alpha \partial_\alpha - m)\psi(x) = 0$$

En 1937 Majorana propose des champs réels comme solution de l'équation de Dirac.

$$\psi(x) = \frac{1}{\sqrt{2}}\chi_1 + i\frac{1}{\sqrt{2}}\chi_2$$

$$(i\gamma^\alpha \partial_\alpha - m)\chi_{1,2}(x) = 0$$



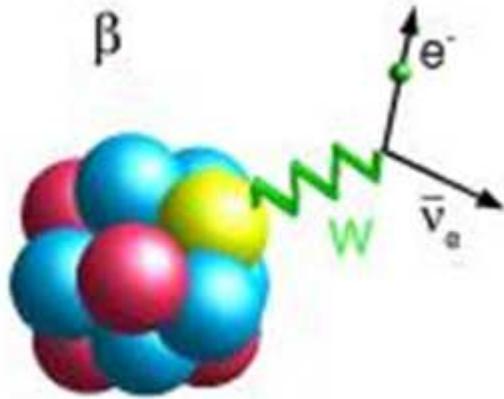
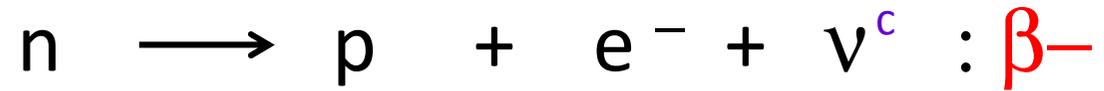
$$\chi_{1,2}^c(x) = \chi_{1,2}(x)$$

Particule \equiv Antiparticule

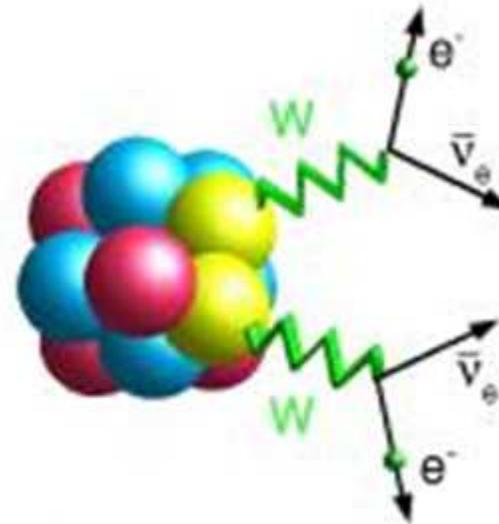
$$\hookrightarrow Q = 0$$

(seulement possible pour le neutrino)

Comment savoir si $\nu = \bar{\nu}^c$



Single β decay



Double β decay

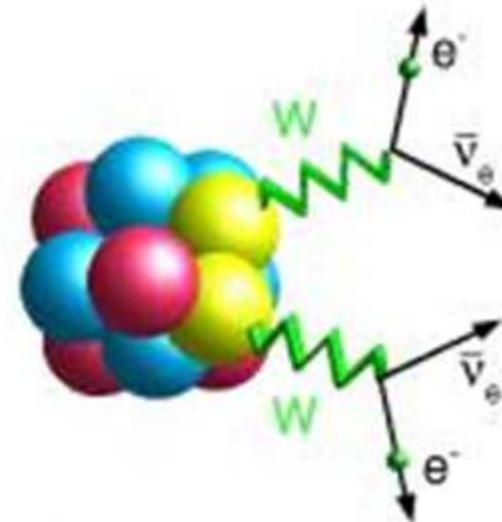
Comment savoir si $\nu = \bar{\nu}^c$



Processus radioactif le plus rare jamais observe

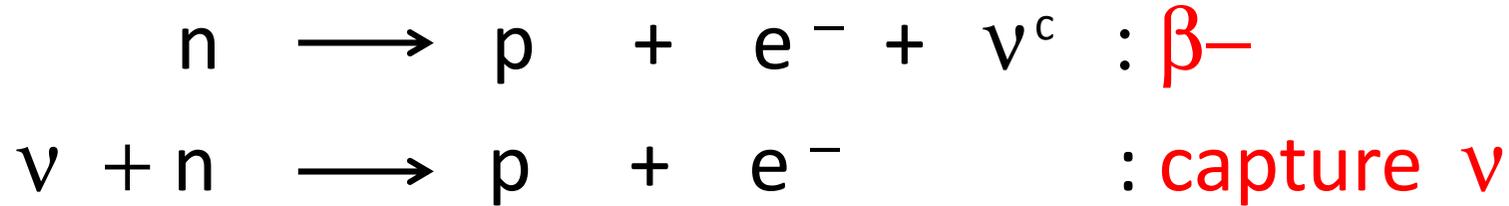
$T_{1/2} \sim 10^{24}$ années

Un million de milliards plus long que l'âge de l'Univers

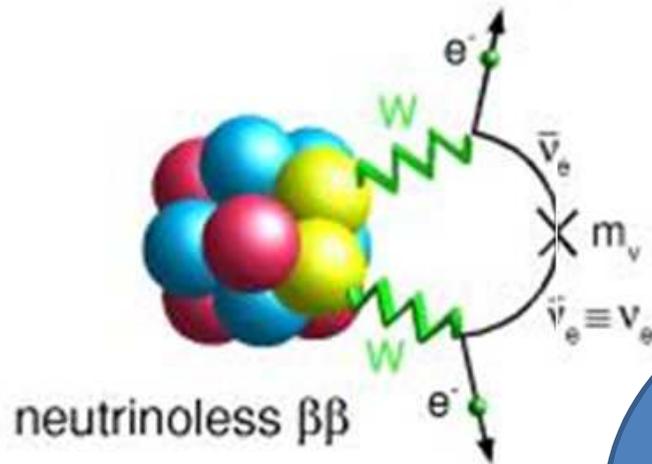


Double β decay

Comment savoir si $\nu = \nu^c$



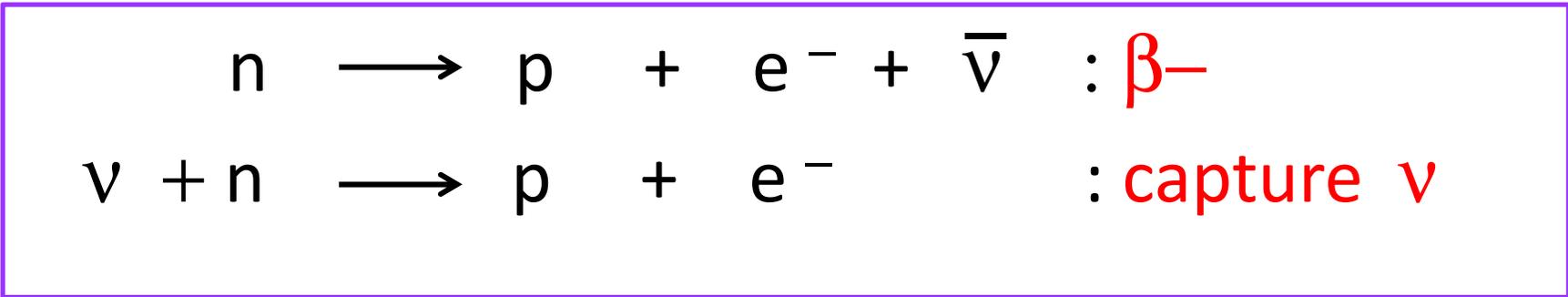
OK si $\nu = \nu^c = \nu_{\text{Majorana}}$



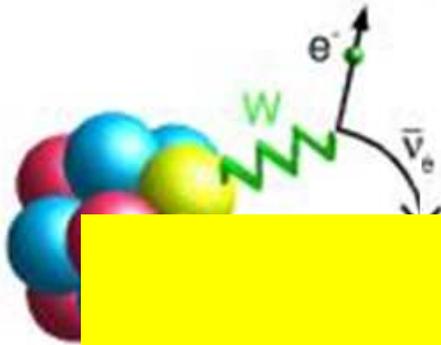
Impossible dans le Modelé Standard car le nombre leptonique n'est pas conserve



Comment savoir si $\nu = \bar{\nu}$



OK si $\nu = \nu^c = \nu_{\text{Majorana}}$



neutrinole

**Tant mieux !
=> recherche de nouvelle physique**

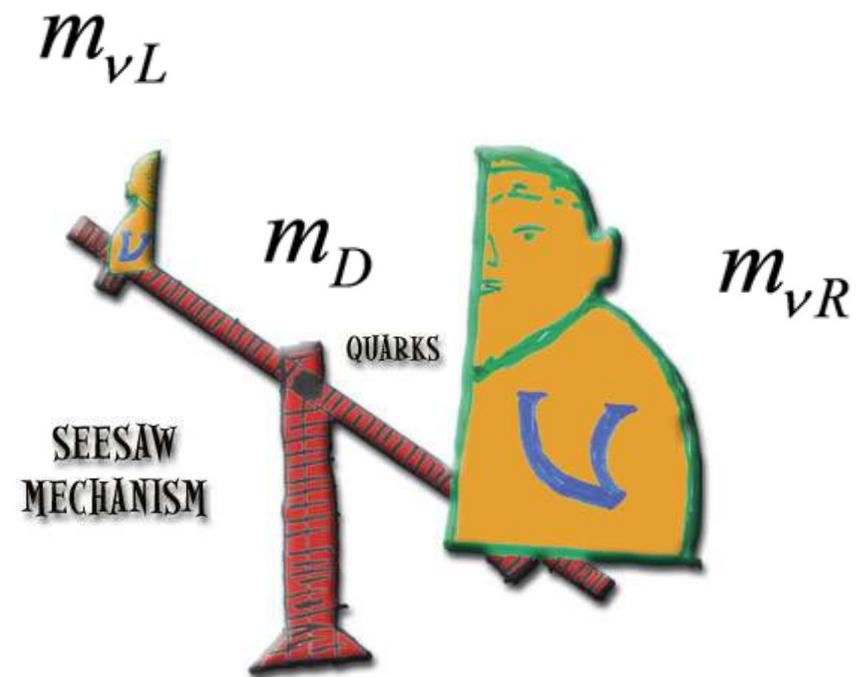
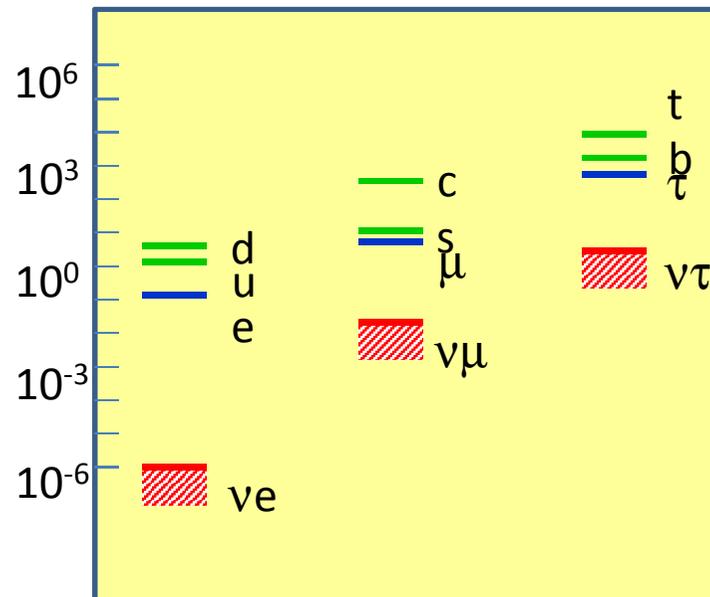
car le nombre
leptonique n'est
pas conserve



Le caractère Majorana du neutrino peut expliquer la petitesse de sa masse

General Neutrino mass matrix

$$\begin{pmatrix} m_{\nu L} & m_D \\ m_D & m_{\nu R} \end{pmatrix}$$



Physique d'extrême propreté

Energie disponible ~ 1 a 3 MeV

=> bruit de fond dominant : radioactivite naturelle



1 noyau d'uranium sur 10^{13} de cuivre

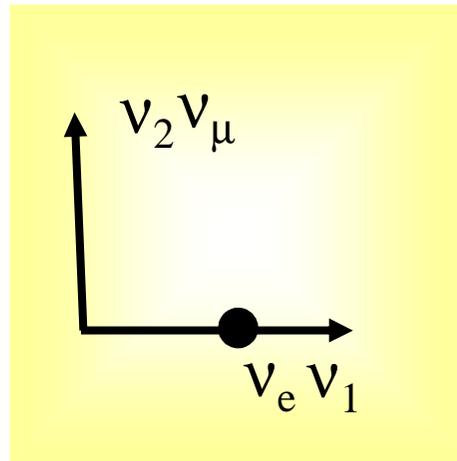
1 noyau de radon sur 10^{23} de gaz



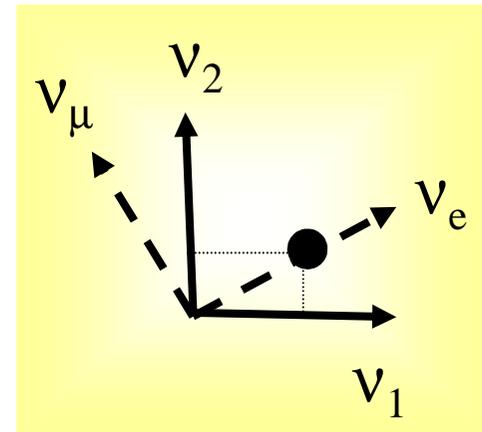
Pontecorvo
1957

Mélange de saveurs (2 neutrinos)

Etats propres de saveur et masse ne sont pas confondus

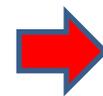


Etats propres de masse
et saveur confondus



Etats propres de masse
et saveur NON confondus

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



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

Matrice de mélange

Après quelques approximations, un peu d'algèbre simple et des bases en Mécanique Quantique on obtient :

Probabilité pour qu'un neutrino d'énergie E au départ électronique devienne à la distance L muonique

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \cong \sin^2(2\theta) \sin^2\left[\frac{\Delta m^2}{4} \frac{L}{E}\right]$$

avec $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$

Après quelques approximations, un peu d'algèbre simple et des bases en Mécanique Quantique on obtient :

Probabilité pour qu'un neutrino d'énergie E au départ électronique devienne à la distance L muonique

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \cong \sin^2(2\theta) \sin^2\left[\frac{\Delta m^2}{4} \frac{L}{E}\right]$$

avec $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$

Impossible dans le
Modèle Standard
car le neutrino est
SANS masse



Après quelques approximations, un peu d'algèbre simple et des bases en Mécanique Quantique on obtient :

Probabilité pour qu'un neutrino d'énergie E au départ électronique devienne à la distance L muonique

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \cong \sin^2(2\theta) \sin^2\left[\frac{\Delta m^2}{4} \frac{L}{E}\right]$$

avec $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$

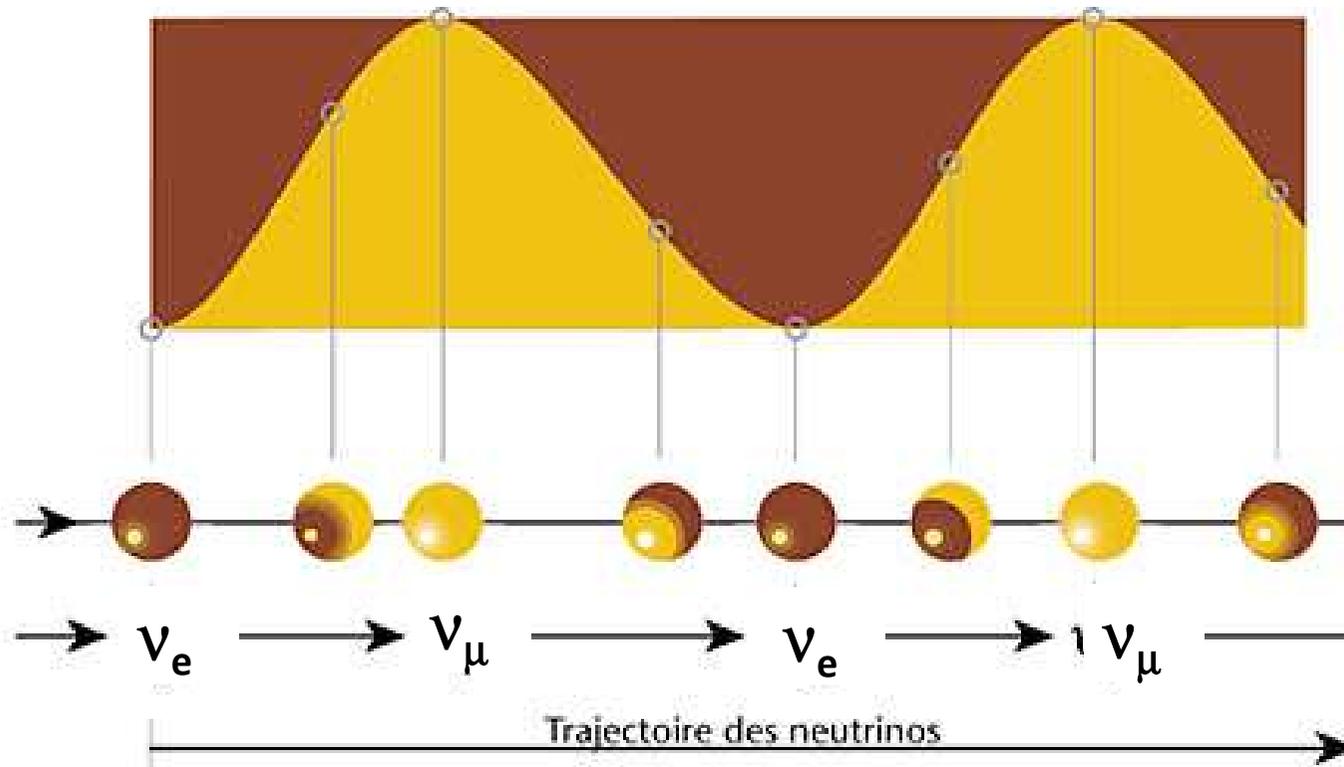
Impo
Mod
car le
SANS

**Tant mieux !
=> Physique au-delà du SM**

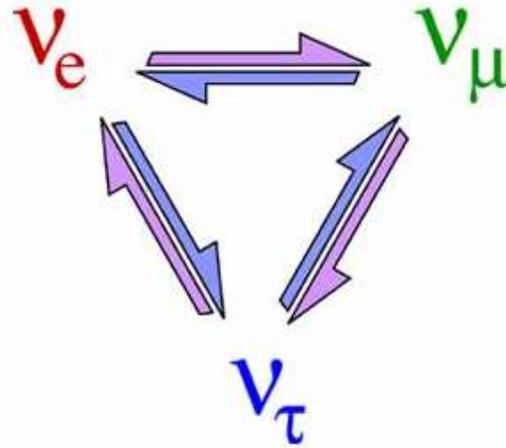


Oscillations de neutrinos

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \cong \underbrace{\sin^2(2\theta)}_{\text{Amplitude}} \underbrace{\sin^2\left[\frac{\Delta m^2}{4} \frac{L}{E}\right]}_{\text{Oscillation}}$$



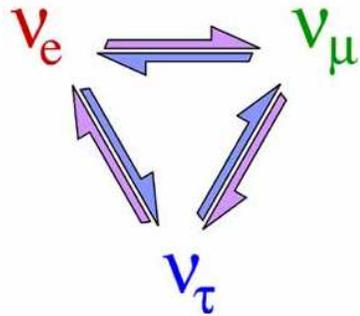
Oscillations à trois neutrinos



Ca se complique un peu !

Matrice de mélange Pontecorvo - Maki - Makagawa - Sakata

Oscillations des Neutrinos

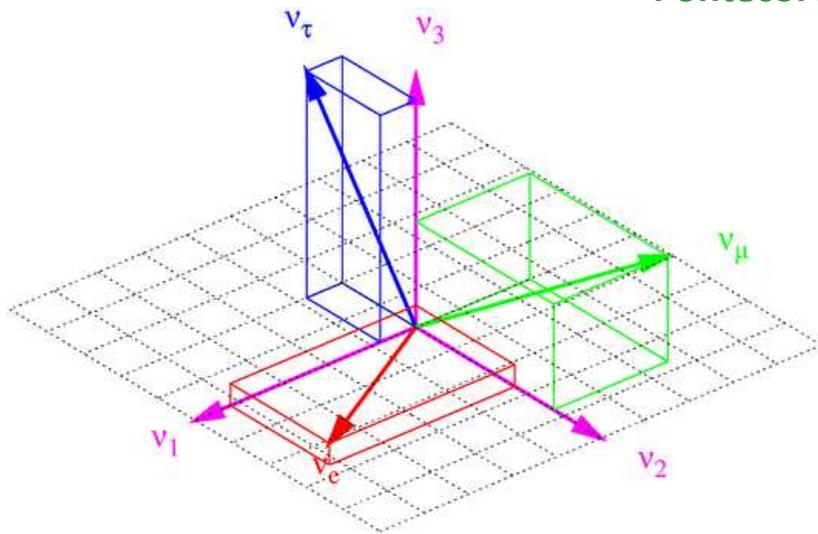


$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad \left. \begin{aligned} \nu_\ell &= \sum_{k=1,2,3} U_{\ell k} \nu_k \\ \sum_{k=1,2,3} |U_{\ell k}|^2 &= 1 \end{aligned} \right\} \ell = e, \mu, \tau$$

Etats propres de saveur

Etats propres de masse

Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata

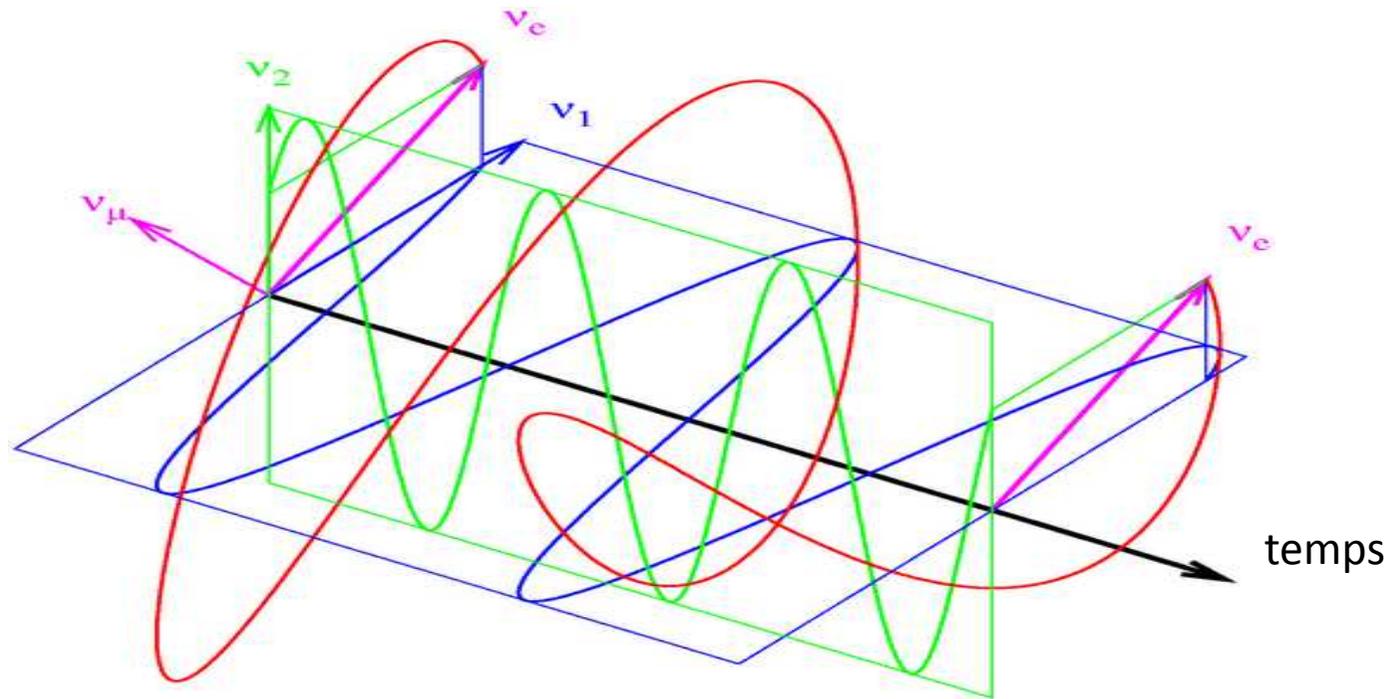


Probabilité d'oscillation (cas simple)

$$\begin{aligned} P(\nu_l \rightarrow \nu_{l' \neq l}) &= \sin^2 2\theta_{ll'} \sin^2(1.27 \Delta m^2 L / E) \\ P(\nu_l \rightarrow \nu_l) &= 1 - P(\nu_l \rightarrow \nu_{l' \neq l}) \\ \begin{pmatrix} \nu_l \\ \nu_{l'} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \cos \theta_{ll'} & \sin \theta_{ll'} \\ -\sin \theta_{ll'} & \cos \theta_{ll'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$



$$m_\nu \neq 0$$



CP

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{13}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{13}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\lambda_2} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\lambda_3} \end{pmatrix}$$

$\vartheta_{23} \simeq \vartheta_{\text{ATM}}$ $\vartheta_{13} \simeq \vartheta_{\text{CHOOZ}}$ $\vartheta_{12} \simeq \vartheta_{\text{SOL}}$ $\beta\beta_{0\nu}$

Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata

Propagation des neutrinos dans la matière => potentiel d'interaction

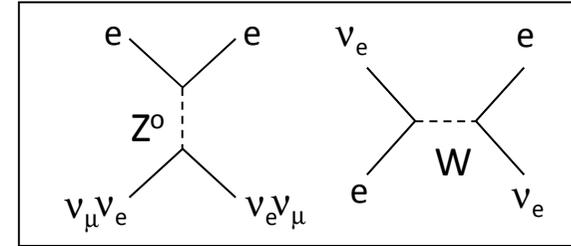
$$n = 1 + V/p$$

$$V_\mu = V_\tau = V_{NC} \text{ et } V_e = V_{NC} + V_{CC}$$

V : potentiel effectif d'interaction

n : indice de réfraction

$$H_m^\alpha = H^\alpha + \frac{1}{2p} \begin{pmatrix} A & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad A = 2\sqrt{2}G_F N_e p$$



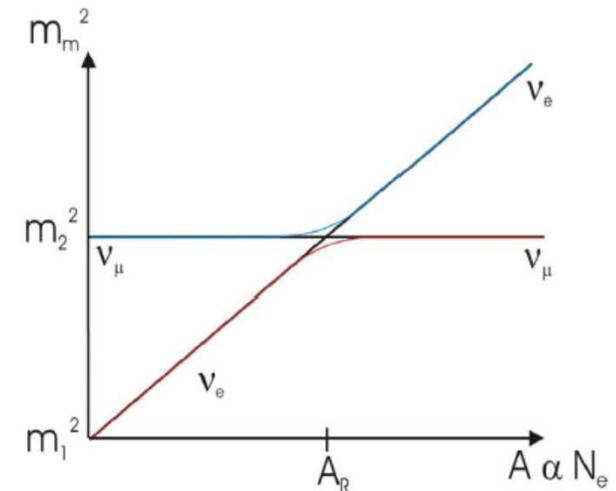
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_m & \sin\theta_m \\ -\sin\theta_m & \cos\theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{1m} \\ \nu_{2m} \end{pmatrix} \quad \sin^2 2\theta_m = \frac{\sin^2 2\theta}{\left(\frac{A}{\Delta m^2} - \cos 2\theta\right)^2 + \sin^2 2\theta}$$

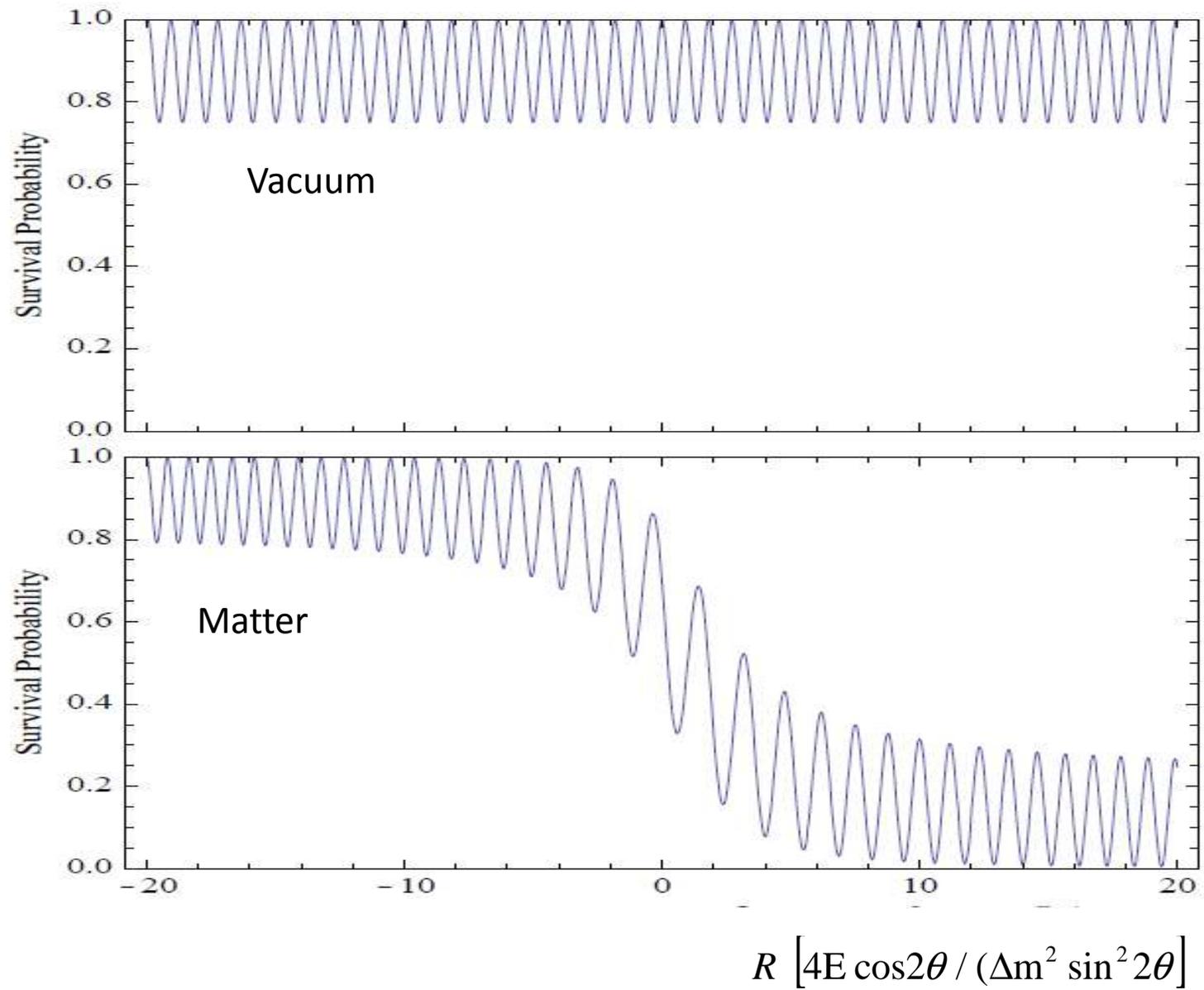
$$\longrightarrow P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) \propto \sin^2 2\theta_m$$

➤ $\frac{A}{\Delta m^2} \approx 0 \Rightarrow$ Oscillations dans le vide

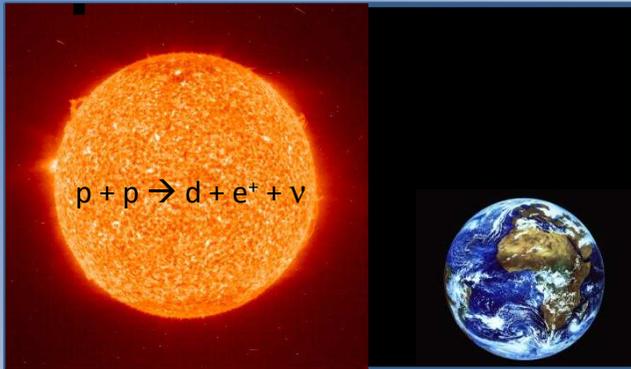
➤ $\frac{A}{\Delta m^2} \gg 1 \Rightarrow$ Pas d'oscillations

➤ $\frac{A}{\Delta m^2} \approx \cos\theta \Rightarrow P \sim 1$ (indépendant de θ)



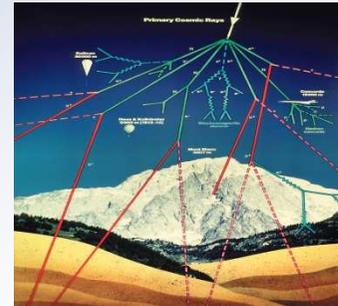


OSCILLATIONS DE NEUTRINOS



solaire

$E_\nu \sim 10 \text{ MeV}$
 $L \sim 10^8 \text{ Km}$
 ν_e



atmosphériques

$E_\nu \sim 10 \text{ GeV}$
 $L \sim 10 \text{ Km}$
 ν_e, ν_μ



accélérateur

$E_\nu \sim 1 \text{ GeV}$
 $L \sim 300 \text{ Km}$
 ν_μ



réacteur

$E_\nu \sim 1 \text{ MeV}$
 $L \sim 1 \text{ Km} - 100 \text{ Km}$
 ν_e

V_{PMNS}



$$\sin^2 \left[\frac{\Delta m^2 L}{4 E} \right]$$

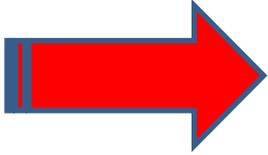
$$\Delta m_{21}^2 = 7.54 \times 10^{-5} \text{ eV}^2,$$

$$|\Delta m_{31(32)}^2| = 2.47 (2.46) \times 10^{-3} \text{ eV}^2,$$

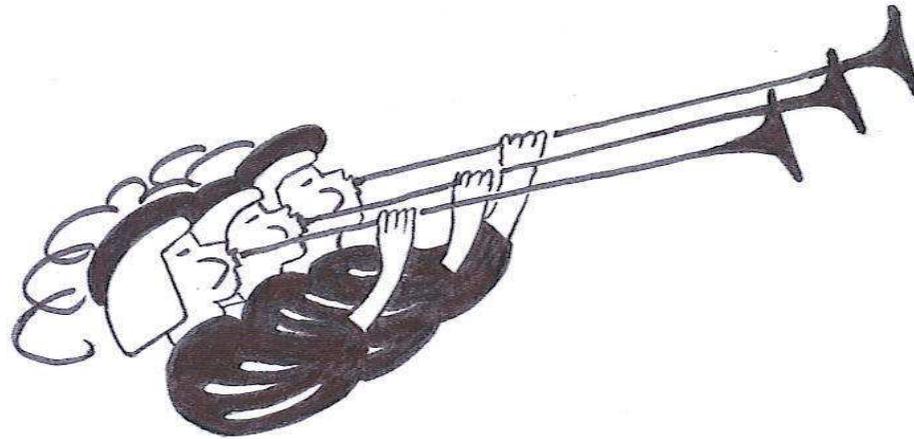
$$\sin^2 \theta_{12} = 0.307, \quad \sin^2 \theta_{23} = 0.39,$$

$$\sin^2 \theta_{13} = 0.0241 (0.0244),$$

Les neutrinos oscillent !

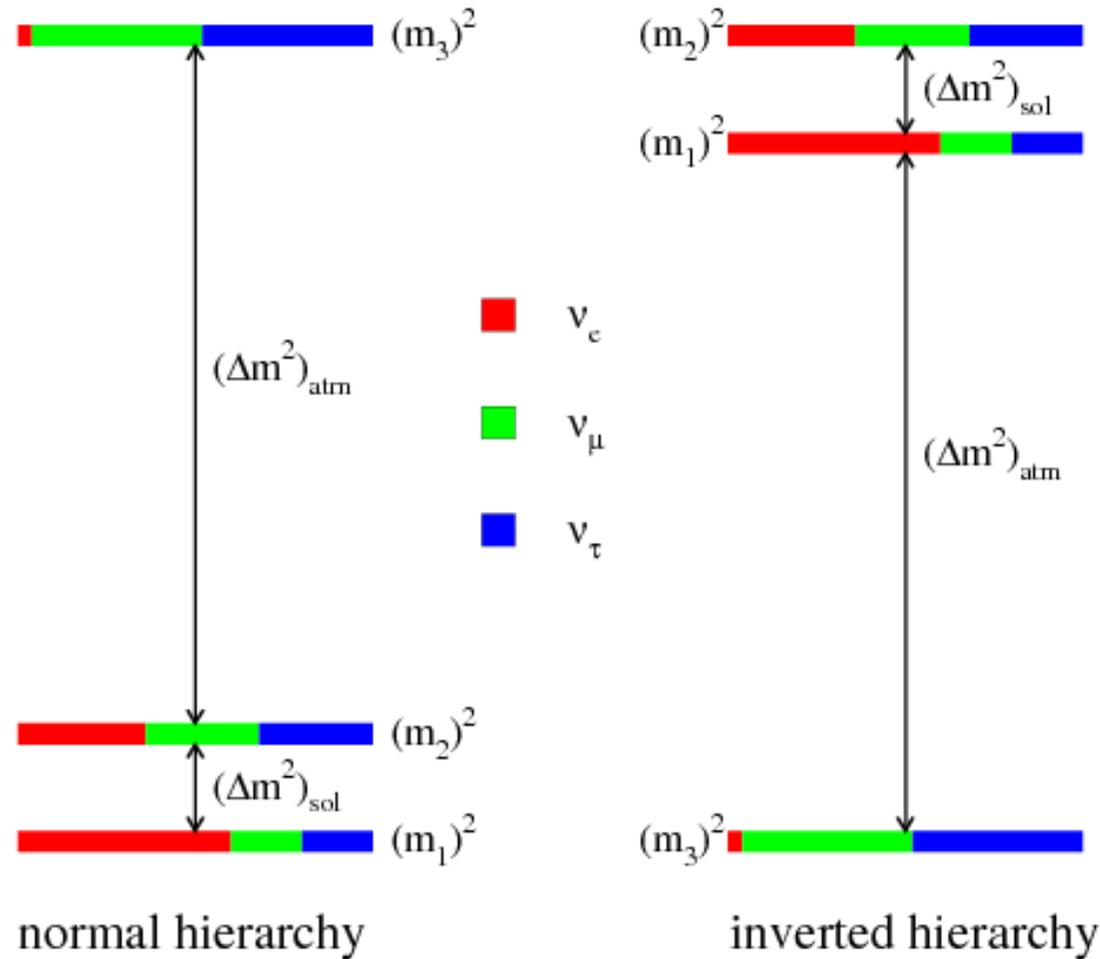


$$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2 \neq 0$$



Le Modèle Standard Minimal est « Faux »

Hiérarchie de masse





Le neutrino est la particule
la plus fantastique connue.