

## Cargèse – mars 2009

### Ecole « techniques de base du détecteur »

Pascal Vincent

Université Pierre et Marie Curie

LPNHE, Paris

Introduction

Les particules et leurs interactions

Détection des particules chargées

La détection des neutres

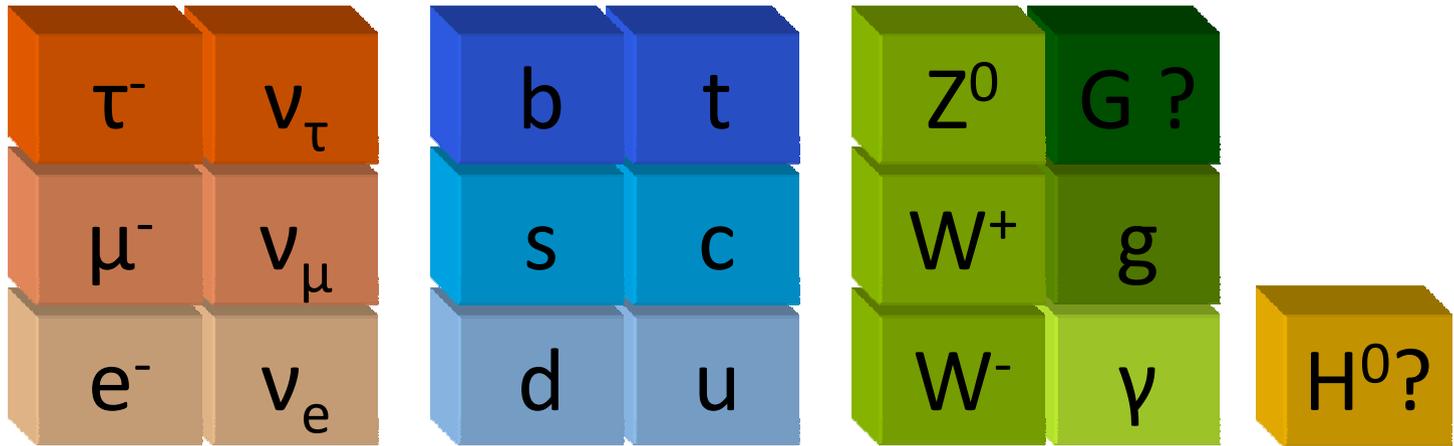
Les systèmes de détection

**Visite d'une expérience**

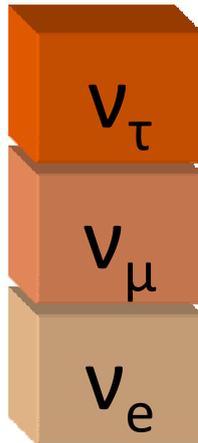


v

# Rappel



# Les neutrinos

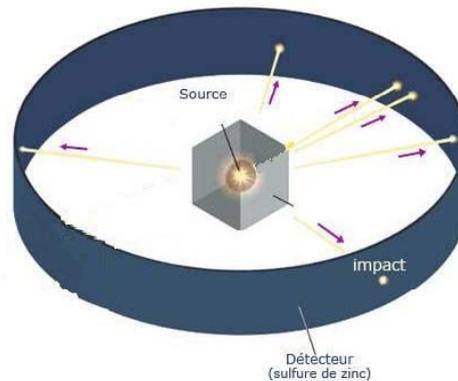


# **NAISSANCE DU PROBLEME**

# Radioactivité $\beta^-$

**1899** : Ernest Rutherford montre qu'il existe deux sortes de rayonnement qu'il appelle  $\alpha$  (alpha) et  $\beta$  (beta).

**1902** : Pierre et Marie Curie montrent que le rayonnement  $\beta$  n'est autre que des électrons.

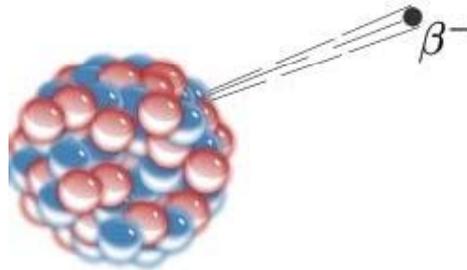


# Radioactivité $\beta^-$

Equation de la réaction :



ou



# Radioactivité $\beta^-$



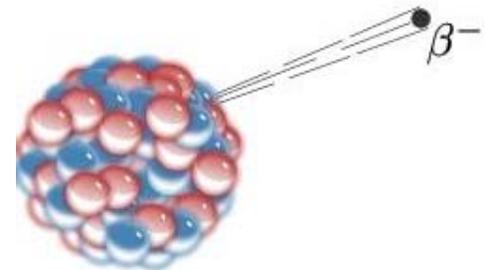
**Lois de conservation :**

❖ Nombre de charge :

$$Q_X = Q_Y + Q_e$$
$$27 = 28 - 1$$

❖ Nombre de masse :  $A = A + 0$

$$A_X = A_Y + A_e$$
$$60 = 60 + 0$$



# Radioactivité $\beta^-$

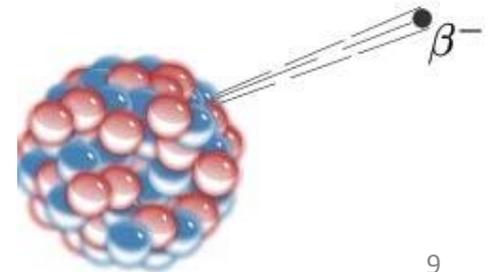
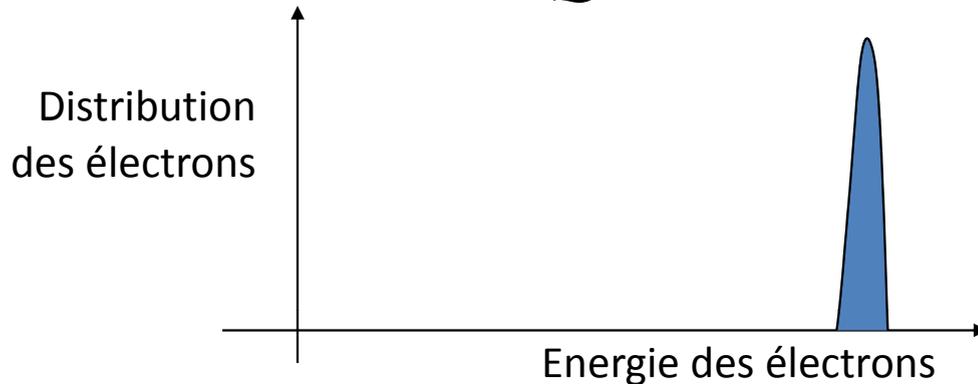


Conservation de la **quantité de mouvement** et de l'**énergie** ?

$$\vec{0} = \vec{P}_{Ni} + \vec{P}_e \Rightarrow P_{Ni} = P_e$$

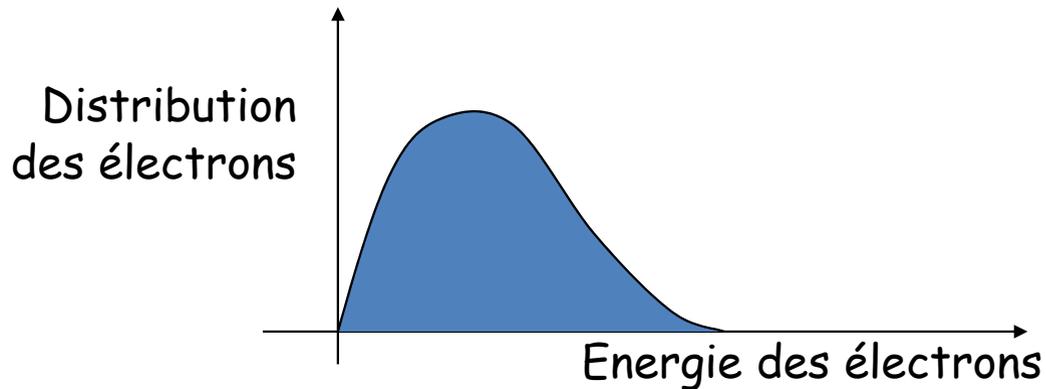
$$E_e = \frac{Q^2 + m_{Ni}^2 + m_e^2}{2Q}$$

$$Q = m_{Co} - m_{Ni} + m_e$$



# Résultats expérimentaux

On pourrait s'attendre, comme dans le cas de la radioactivité alpha, à obtenir un spectre mono-énergétique ou quantifié pour l'électron. Les mesures expérimentales montrent une distribution en énergie selon un spectre continu :



# Hypothèse

Doit on abandonner une loi de Conservation de la physique ?

Pauli (1933) postule l'existence d'une nouvelle particule :

## le neutron

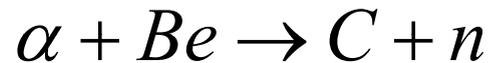
- ❖ Il doit posséder une masse faible.
- ❖ Il ne porte pas de charge électrique.



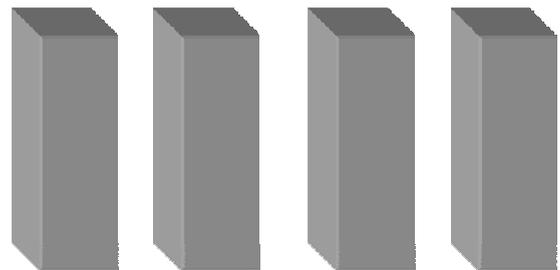
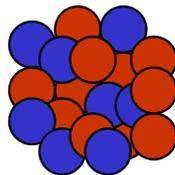
# Découverte du neutron

**1932** : découverte du neutron (James Chadwick).

En mesurant avec précision l'énergie des noyaux projetés en utilisant la réaction :



Chadwick peut affirmer que le rayonnement « ultra pénétrant » ne peut être un rayonnement gamma, d'énergie très élevée, mais doit être composé de particules de masse 1 et de charge électrique 0.



Trop lourd pour la particule de Pauli

# L'interaction faible

Enrico Fermi propose d' appeler la particule de Pauli :

**le neutrino**

*le petit neutre.*

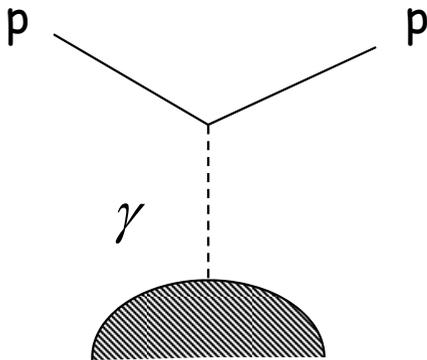
Il développe une théorie de l'interaction interaction faible basée sur l'électromagnétisme.



# L'interaction faible

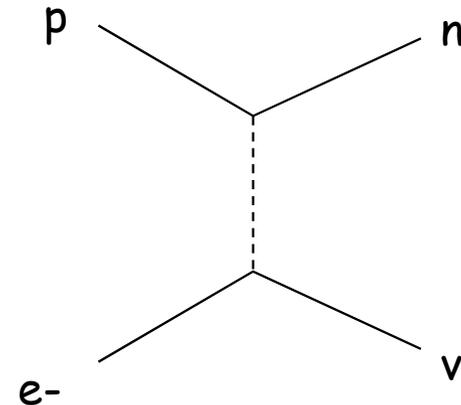
## Analogie entre les interactions electromagnetiques et faibles

$$H_{EM} = eJ^\mu A_\mu$$
$$= e(\bar{\psi}_p \gamma^\mu \psi_p) A_\mu$$



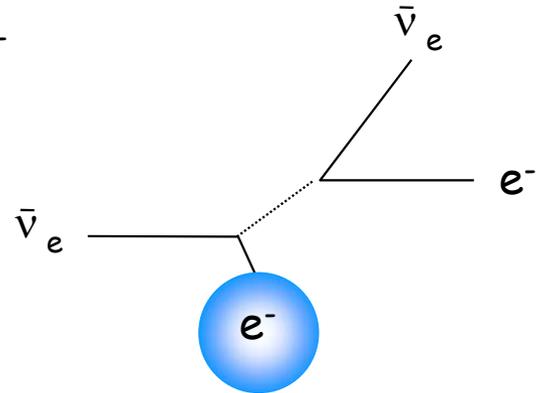
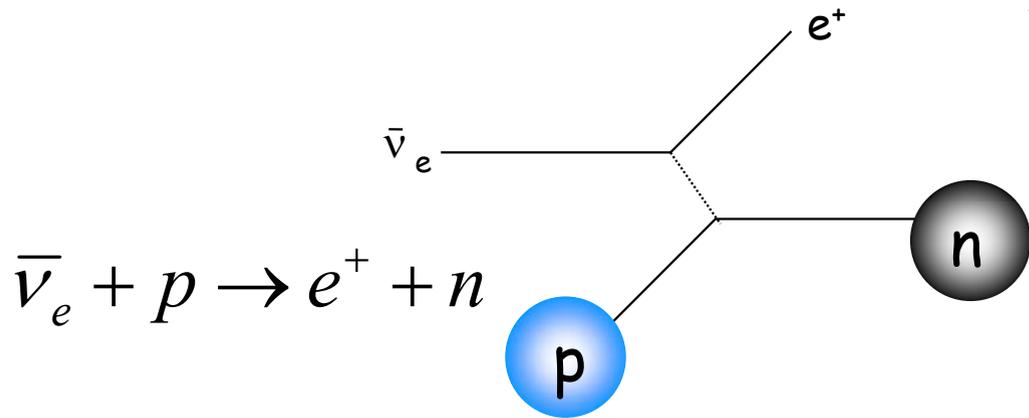
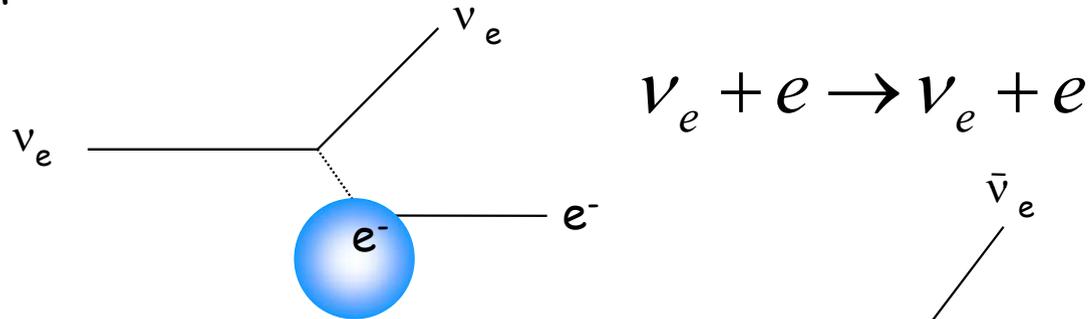
$$H_{Faible} = G(\bar{\psi}_p \gamma^\mu \psi_n)(\bar{\psi}_e \gamma_\mu \psi_\nu)$$

Constante De couplage    courant    potentiel



# L'interaction faible

Interaction faible :



Pour expérimenter l'hypothèse de Pauli il faut une source potentielle de cette particule

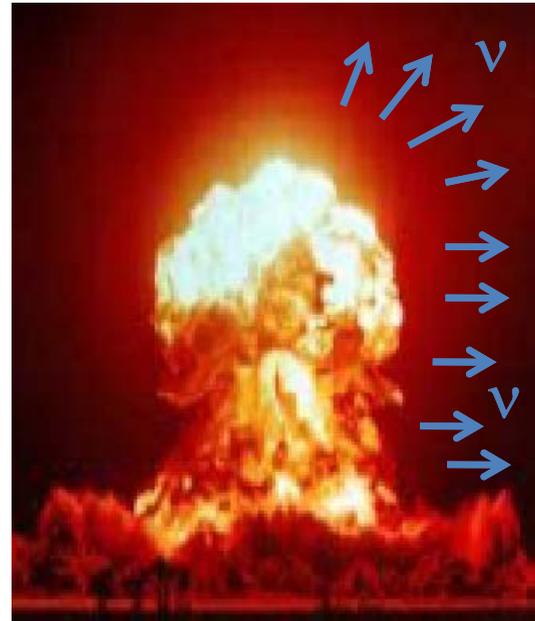
# **RECHERCHE D'UNE SOURCE DE NEUTRINO**

# Sources de neutrinos

Les sources naturellement radioactives n'ont pas une activité suffisante pour permettre la détection de cette particule

Il faut une source qui produise une quantité colossale de neutrinos

Une explosion nucléaire ? (nous sommes dans les années 50 ...)

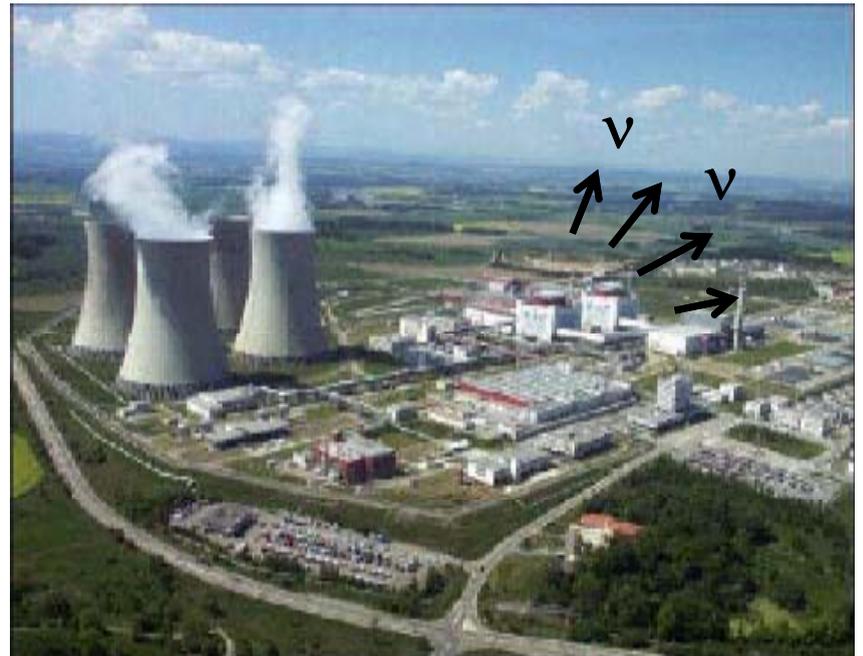


# La recherche du neutrino

**Une source plus pacifique : un réacteur nucléaire.**

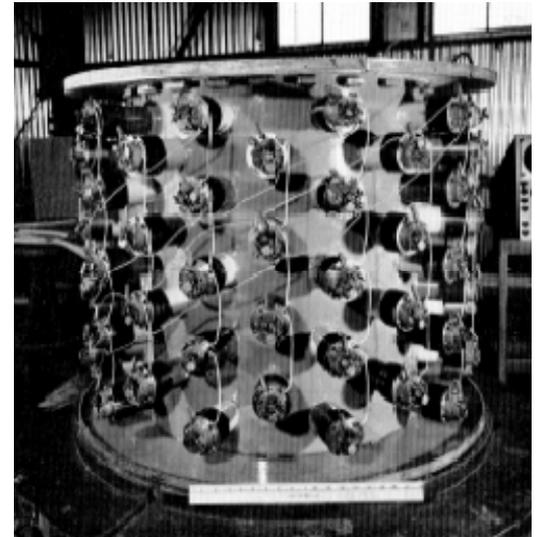
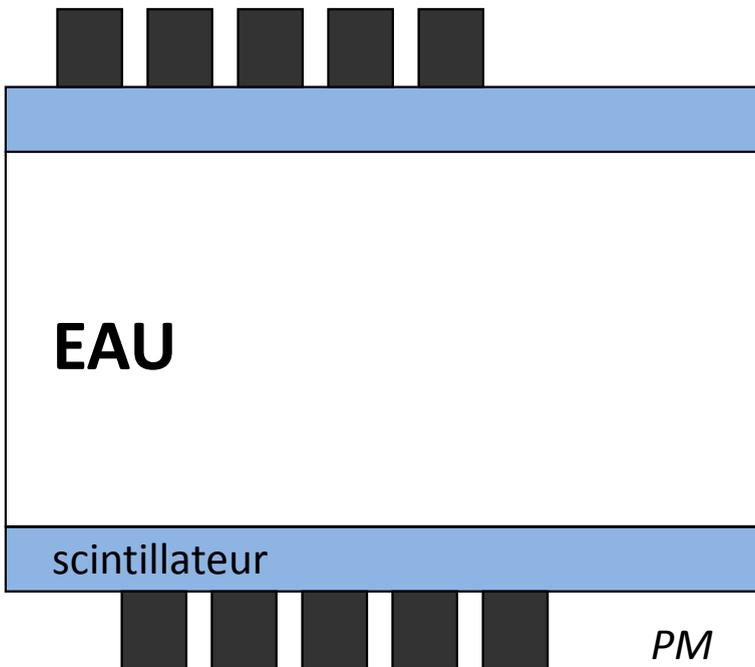
un réacteur nucléaire produit un flux de neutrinos de  $5 \times 10^{13}$  particules par seconde et par centimètre carré,

=> bien plus intense que tout flux disponible produit par d'autres sources radioactives



# L'expérience de Reines et Cowan

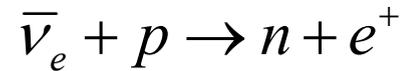
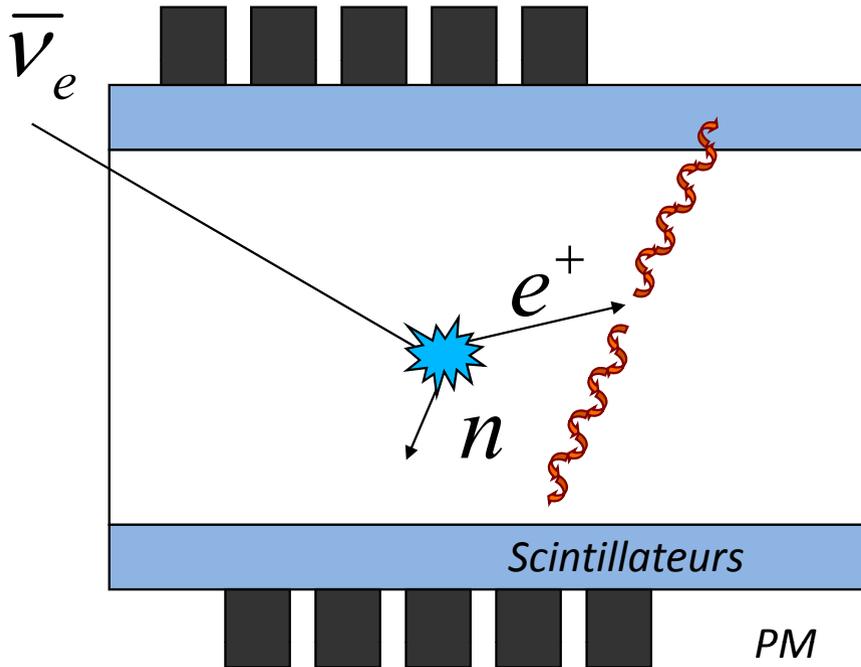
1953 : Il faut un détecteur de grande taille



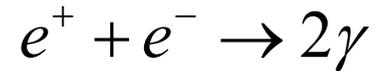
Capture d'un neutrino dans une cuve d'eau.

# Reines et Cowan premier essai

1953 : Capture d'un neutrino dans une cuve d'eau.



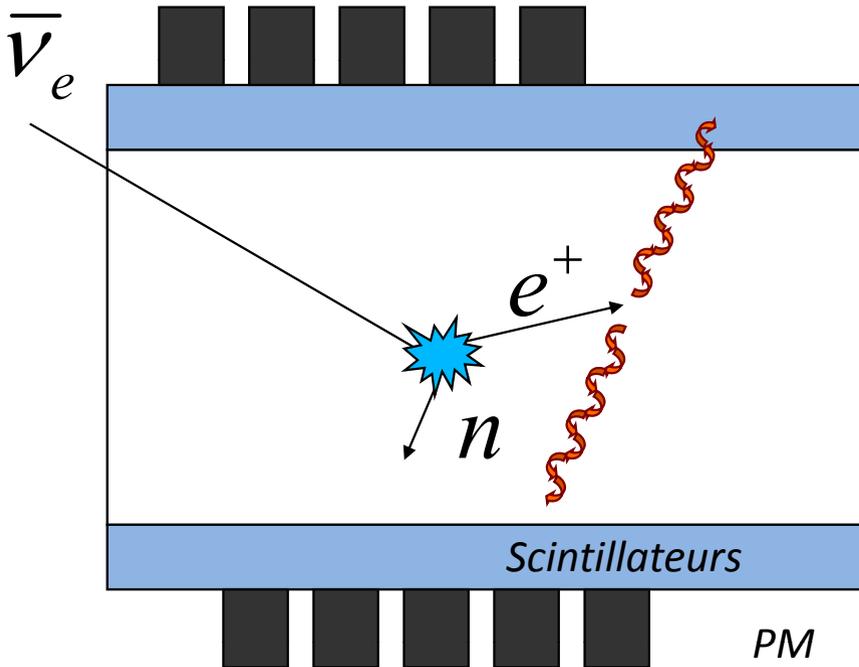
Annihilation des positons dans le milieu.



Cible : 400 l d'eau

# Reines et Cowan premier essai

Expérience peu concluante.



Trop peu d'événements.

Il peut y avoir une contamination par un isotope émetteur beta+.



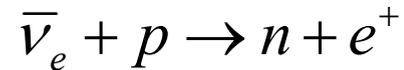
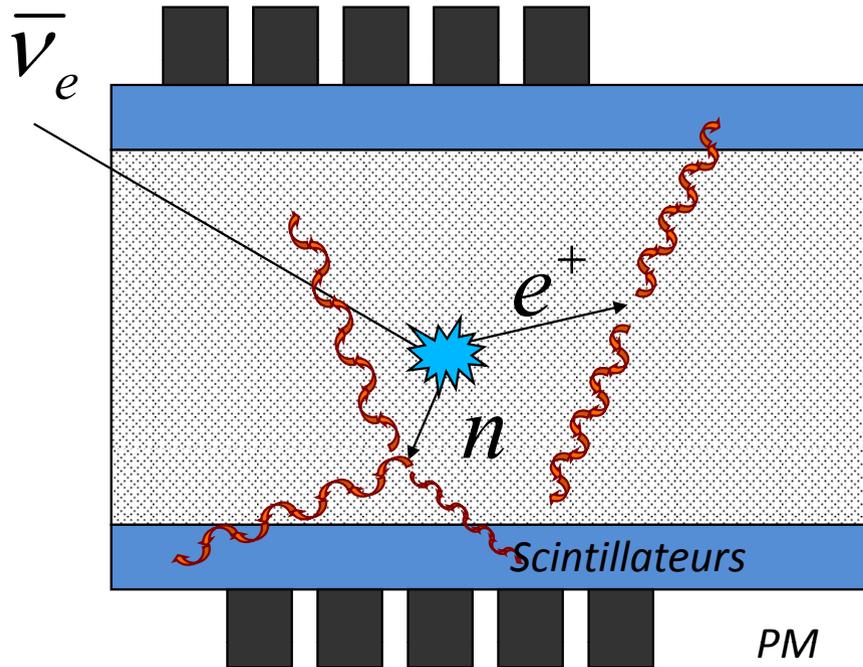
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+$$

Solution :

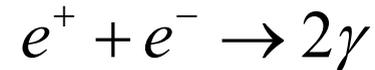
# DÉTECTER LE NEUTRON

# Reines et Cowan second essai

1956 : Mélange d'eau et de chlorure de cadmium



Annihilation des positons dans le milieu.



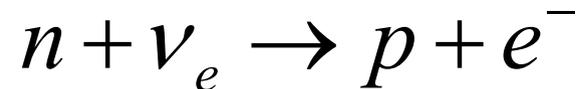
Le neutron est absorbée par le Cd



formant un isotope instable  
d'un durée de vie de 15  $\mu$ s.  
(émission retardée des  $\gamma$  de  $\sim 15 \mu$ s).

# Détecteurs au chlorure de carbone

Alvarez ou Ray Davis, avaient déjà tenté sans succès de détecter les neutrinos avec une solution de chlorure de carbone qui aurait dû se transformer en argon radioactif par interaction avec un neutrino.

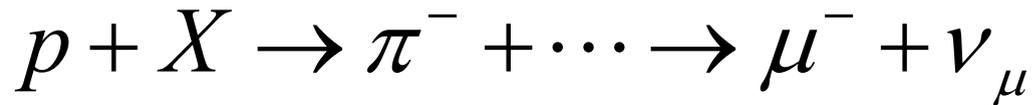


Malheureusement pour eux, un réacteur nucléaire ne donne que des antineutrinos! ce qui rend la réaction impossible.

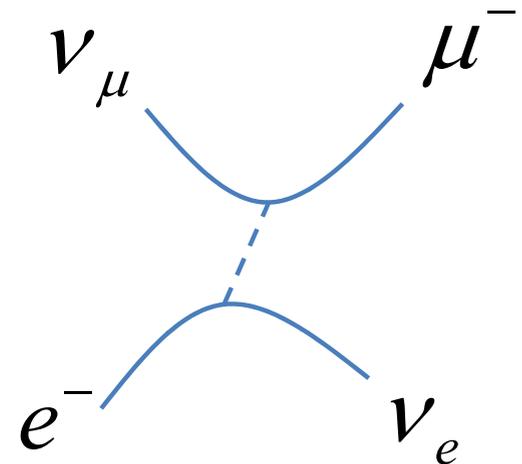
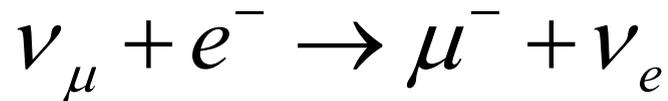
# Le neutrino mu

Le neutrino  $\mu$  ne peut pas être produit naturellement. Il faut le créer avec un accélérateur puis signer sa présence :

Production du neutrino mu :

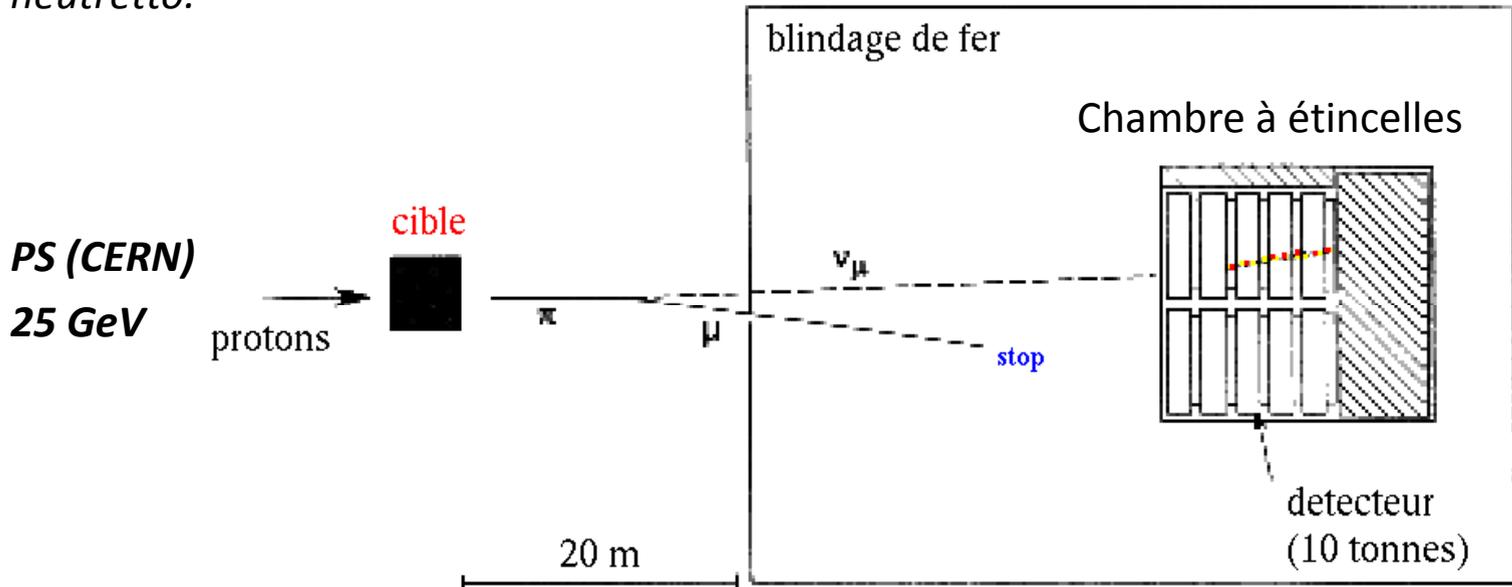


Signature de sa présence :



# Le neutrino mu

**1962** : Leon Lenderman, Melvin Schwartz et Jack Steinberger découvrent qu'il existe d'autres types de neutrino. Découverte du neutrino mu déjà prédit sous le nom de *neutretto*.

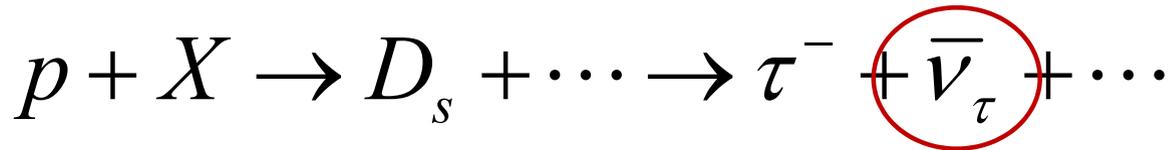


Dans 6 cas sur 40 la particule provenant de l'interaction du neutrino est reconnue comme étant un électron, ce qui était le bruit de fond attendu. Dans 34 cas sur 40, c'est un muon.

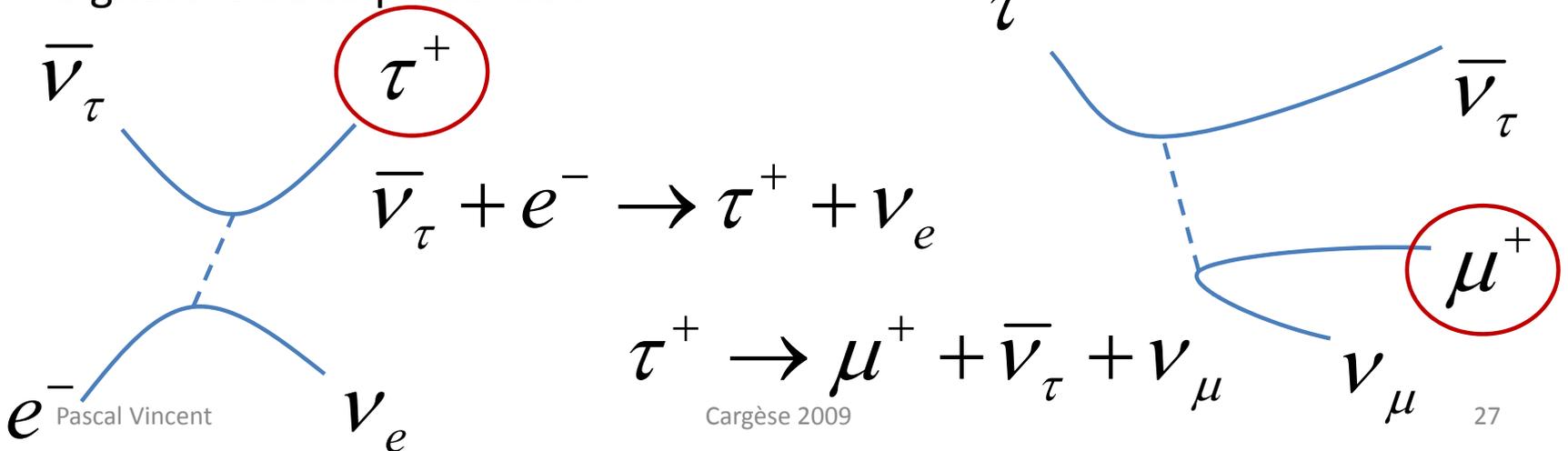
# Le neutrino tau

Pour produire un neutrino tau la désintégration des pions ne marche pas il faut produire des particules de plus hautes masse.

Production du neutrino tau :

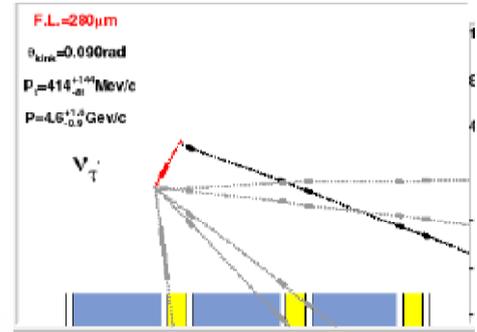


Signature de sa présence :



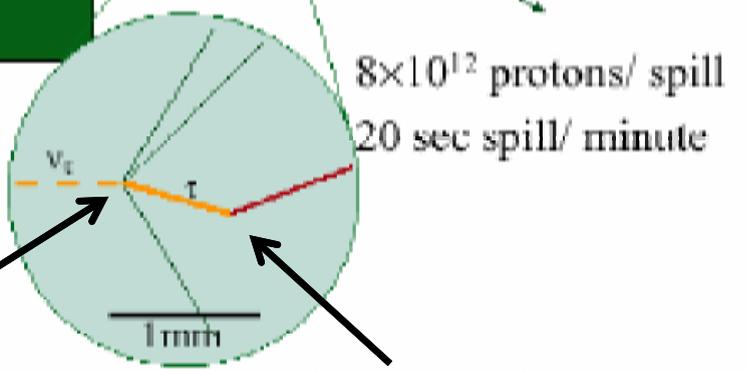
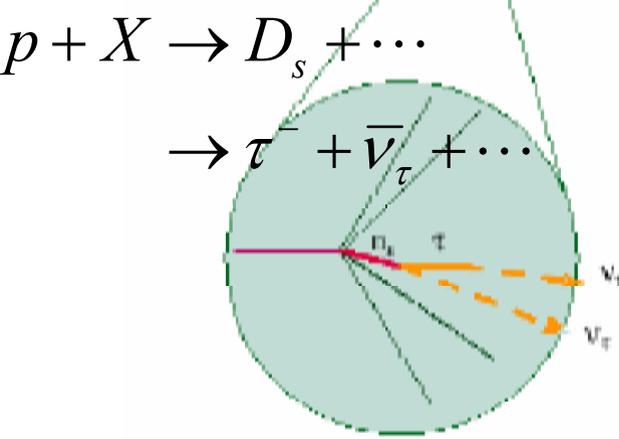
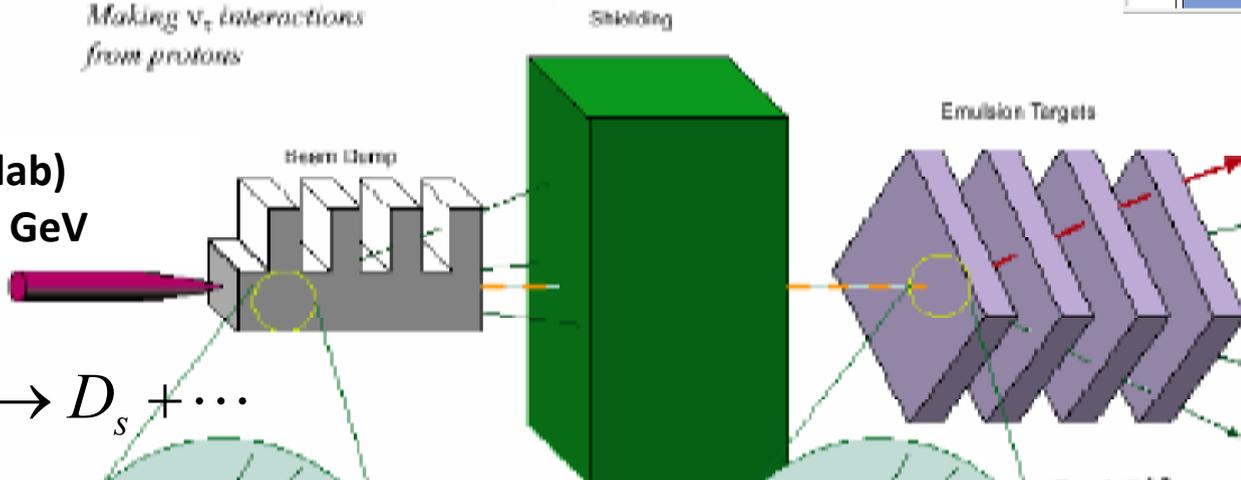
# Le neutrino tau

Août 2000 : expérience DONUT (Fermilab)



Making  $\nu_\tau$  interactions from protons

(Fermilab)  
p : 850 GeV



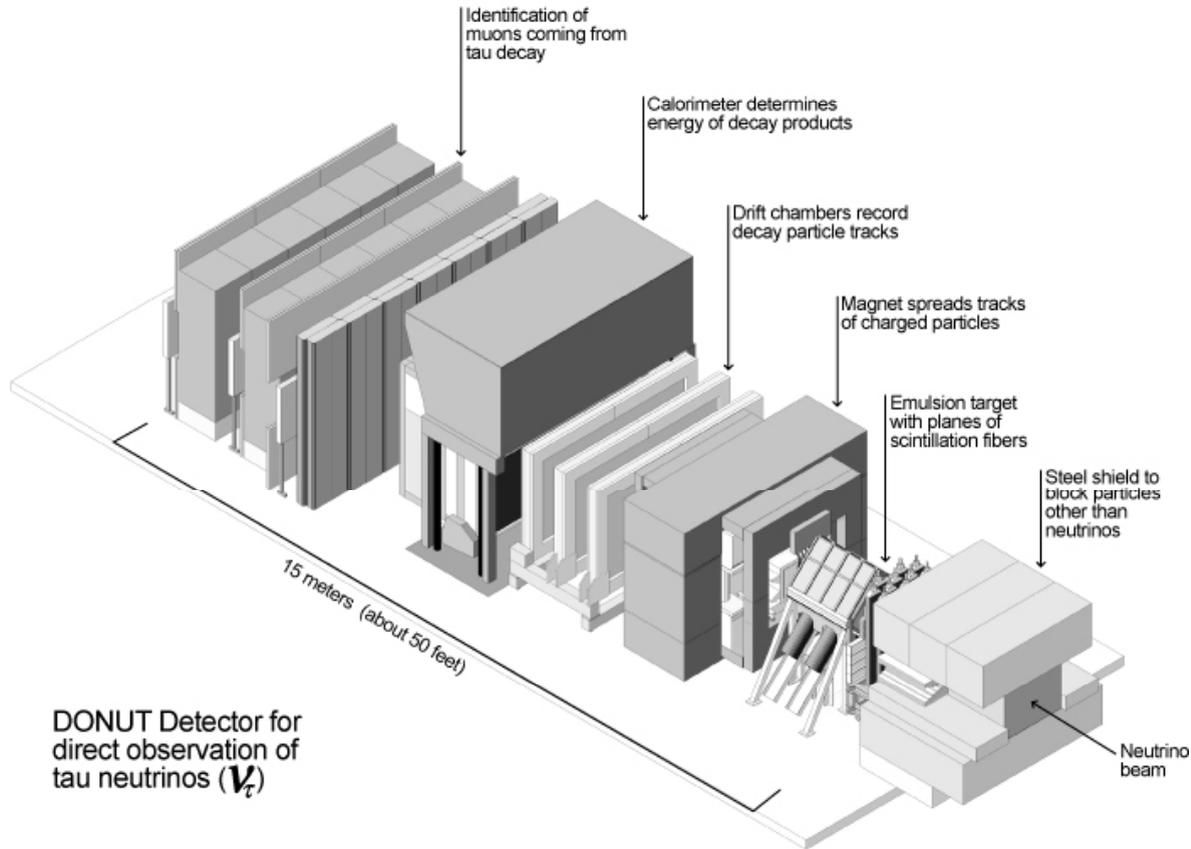
$8 \times 10^{12}$  protons/ spill  
20 sec spill/ minute

Pascal Vincent  $\bar{\nu}_\tau + e^- \rightarrow \tau^+ + \nu_e$  Cargèse 2009

$$\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \bar{\nu}_\tau + \nu_\mu$$

# Le neutrino tau

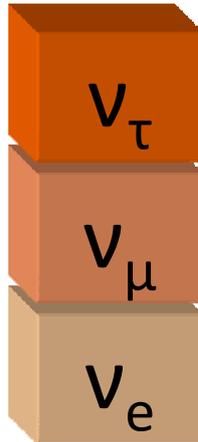
## DONUT Detector



4 événements  $\nu_\tau$  sur 203  $\nu$  observés

# Les neutrinos

Le neutrino est une particule sans charge électrique et qui interagit très peu avec la matière



A t'il une masse ?



$$\nu_\tau : m < 20 \text{ eV}$$

$$\nu_\mu : m < 02 \text{ eV}$$

$$\nu_e : m < 2 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$$

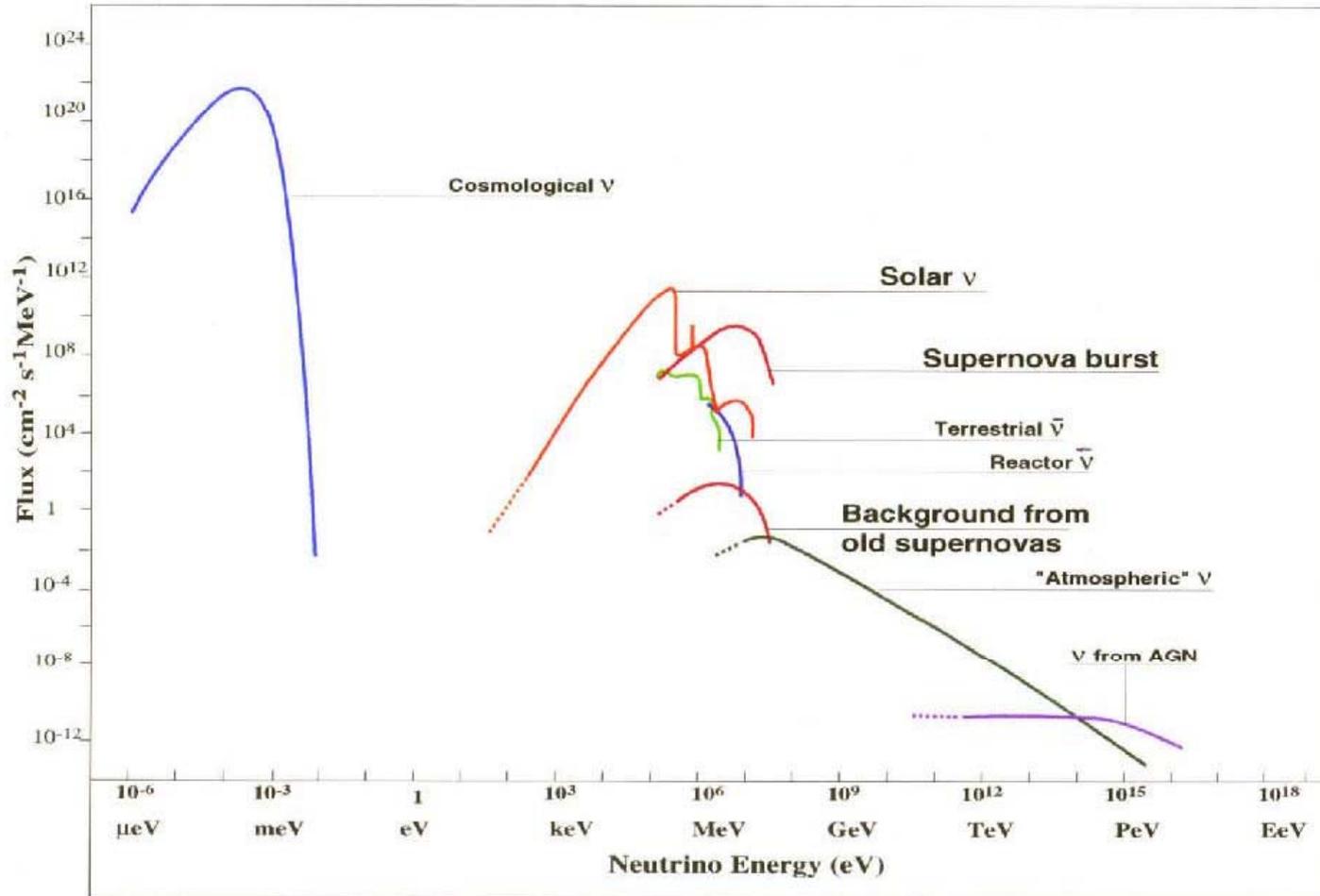
# D'où proviennent les neutrinos ?

$\sim 10^{-3}$  eV : produits  $10^{-2}$  secondes après le big-bang (reste  $\sim 100/\text{cm}^3$ ).  
jamais vus car pas assez d'énergie pour :  $\nu + p \rightarrow n + e^+$

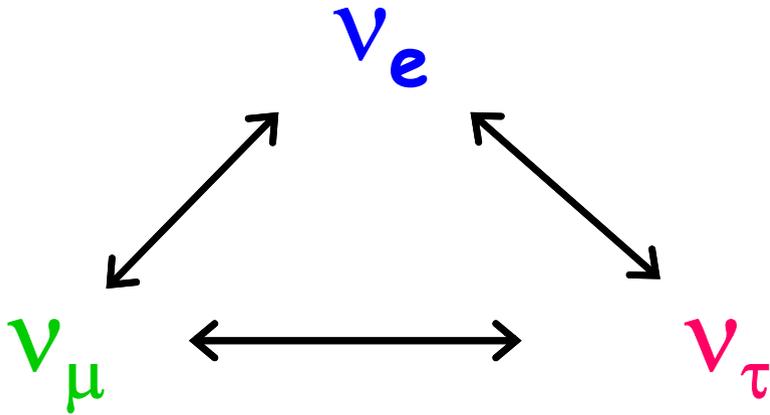
keV  $\rightarrow$  MeV : domaine de la physique nucléaire.  
réactions dans le soleil ( $< 20$  MeV)  
désintégration de noyau (centrales)  
 $\sim 4$  MeV

$> \text{GeV}$  : désintégrations de particules de hautes énergie  
(pions)  
Accélérateurs ( $< 30$  GeV)  
rayons cosmiques.

# D'où proviennent les neutrinos ?

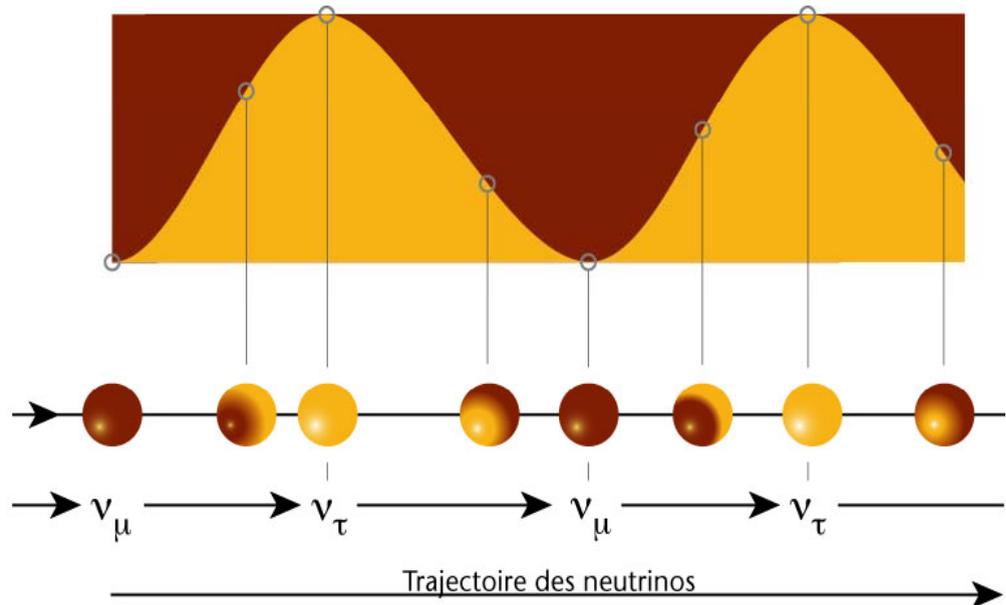


# Les neutrinos

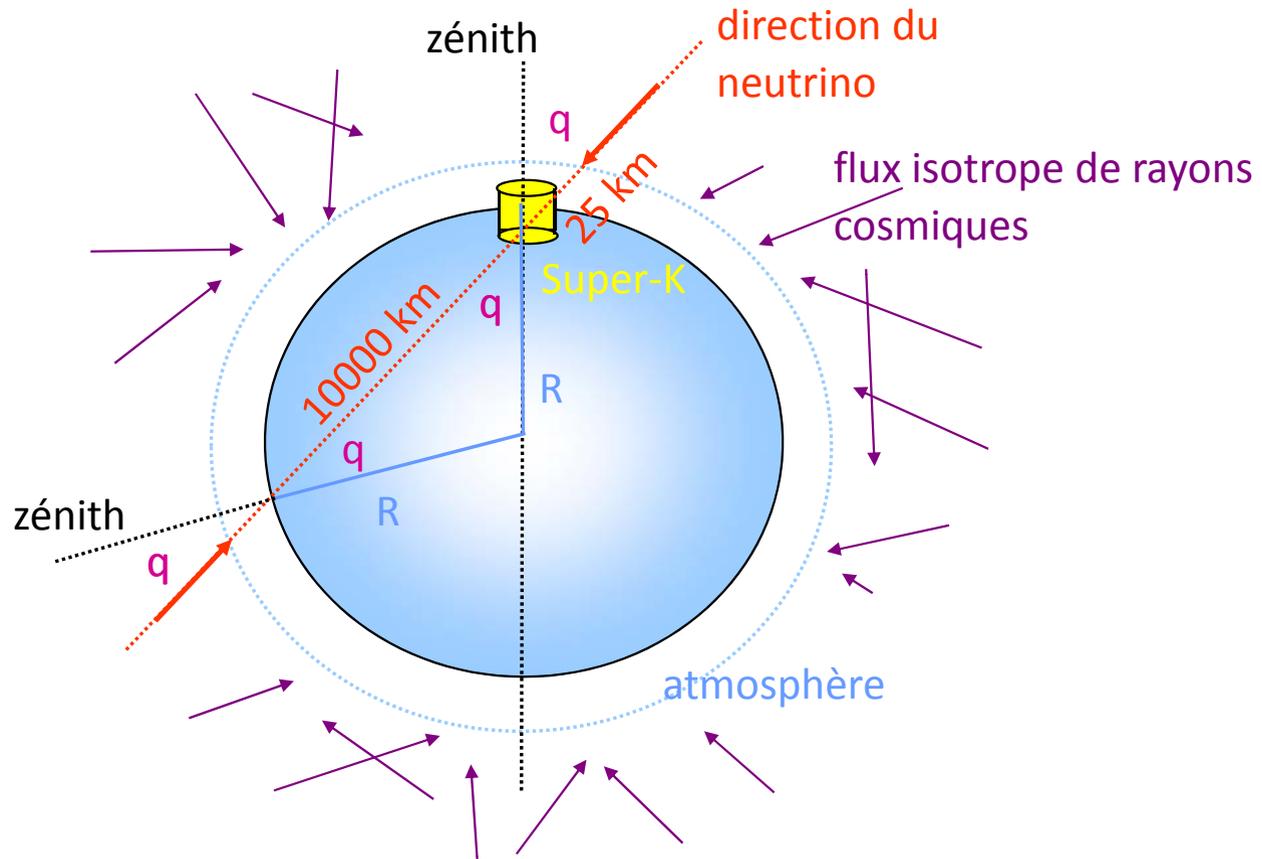


Si les neutrinos ont une masse, ils oscillent.

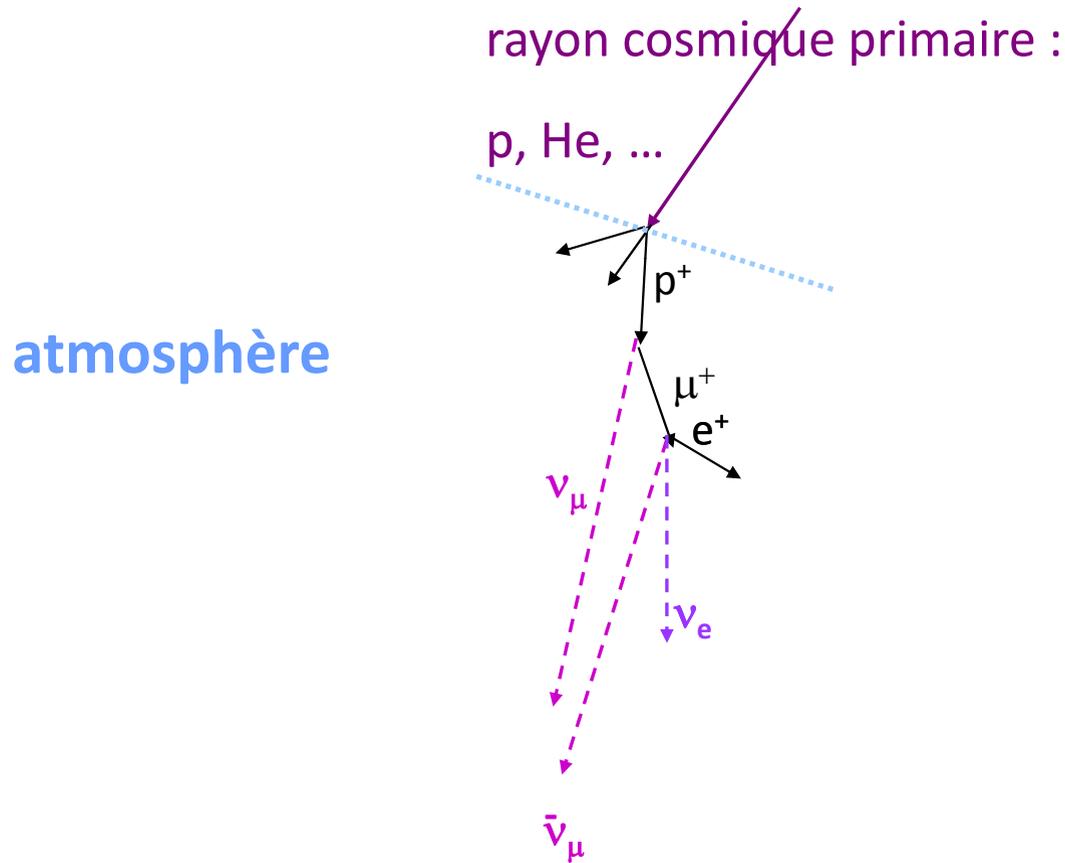
il est possible de les détecter lorsqu'ils se transforment d'une famille à une autre famille.



# Muons atmosphériques

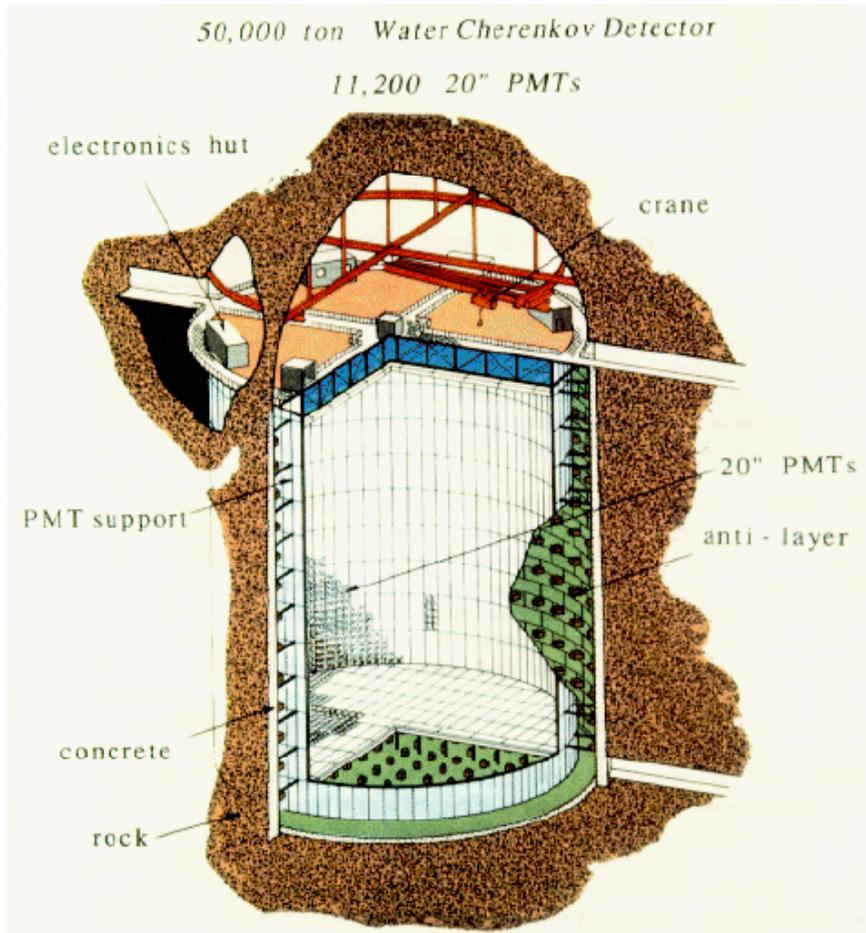


# Muons atmosphériques



taux  $n_m/n_e \approx 2$  pour  $E_m < 100$  GeV

# Super-Kamiokande



50 000 tonnes d'eau.

39.3 m  $\Phi$  – 41.4m de hauteur

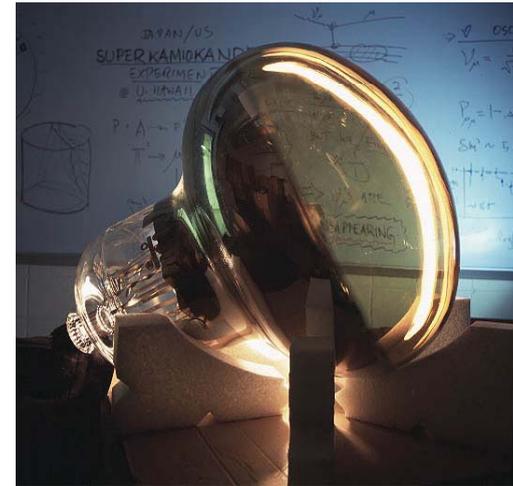
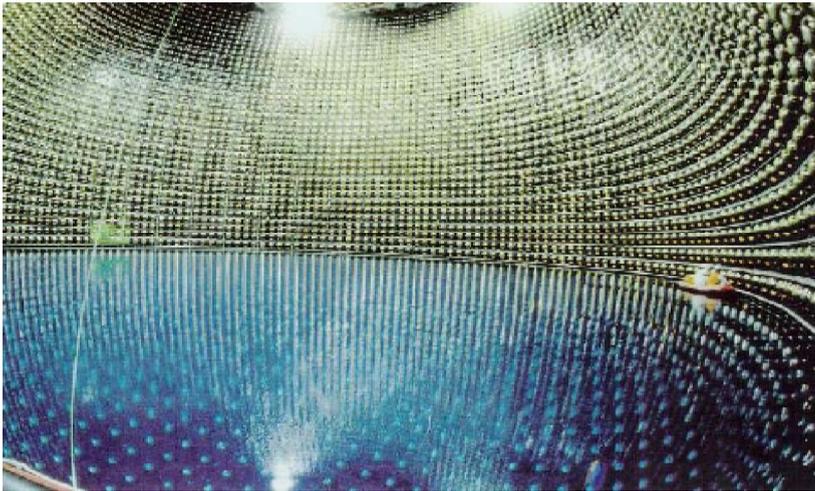
11 146 PM

1km sous terre : réduction du  
nombre de rayons cosmique  $1/10^5$   
→ 1.88 Hz

eau = cible+détecteur.

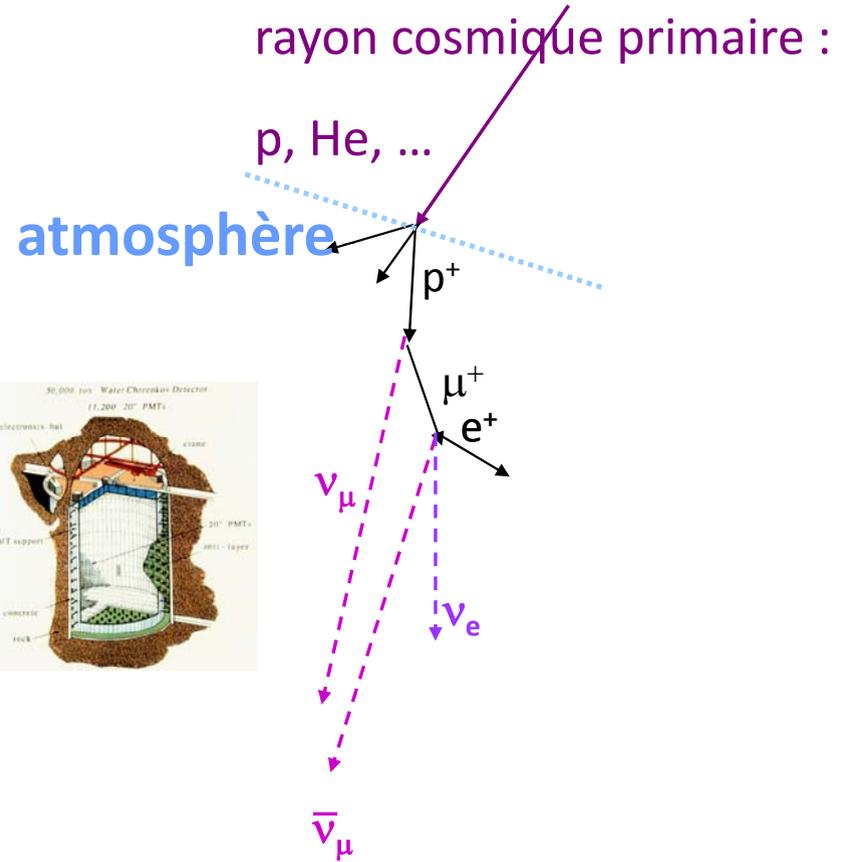
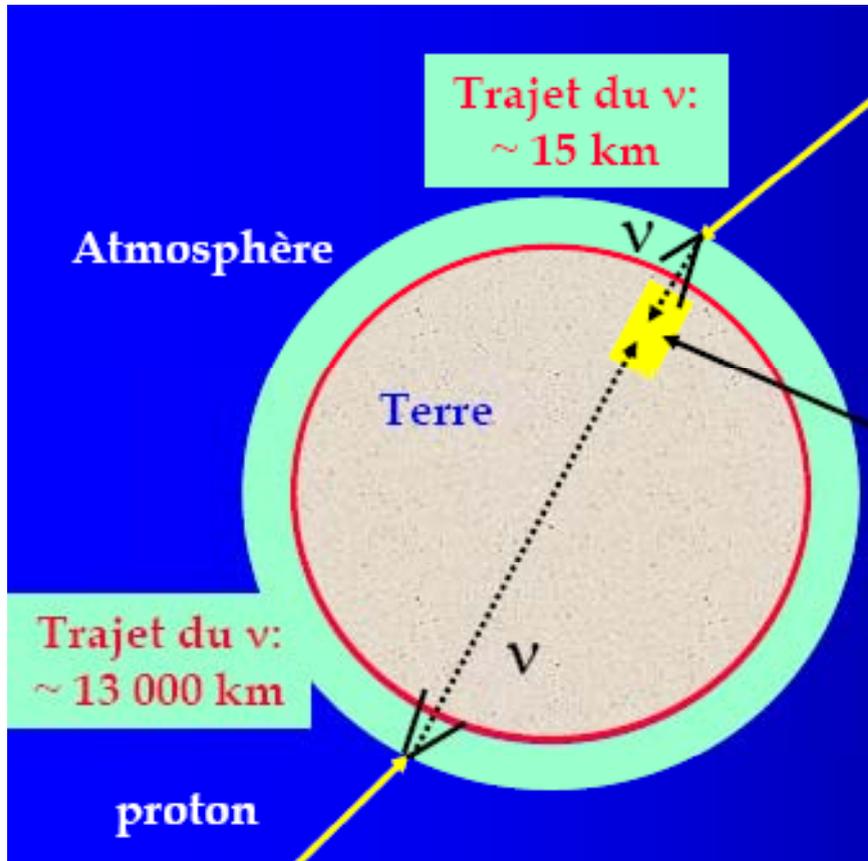
# Super-Kamiokande

Les photomultiplicateurs ont été spécialement conçus par la compagnie Hamamatsu pour les besoins de cette expérience.



**100 000 neutrinos atmosphériques par seconde**  
**30 interactions par jour**

# Principe de la mesure

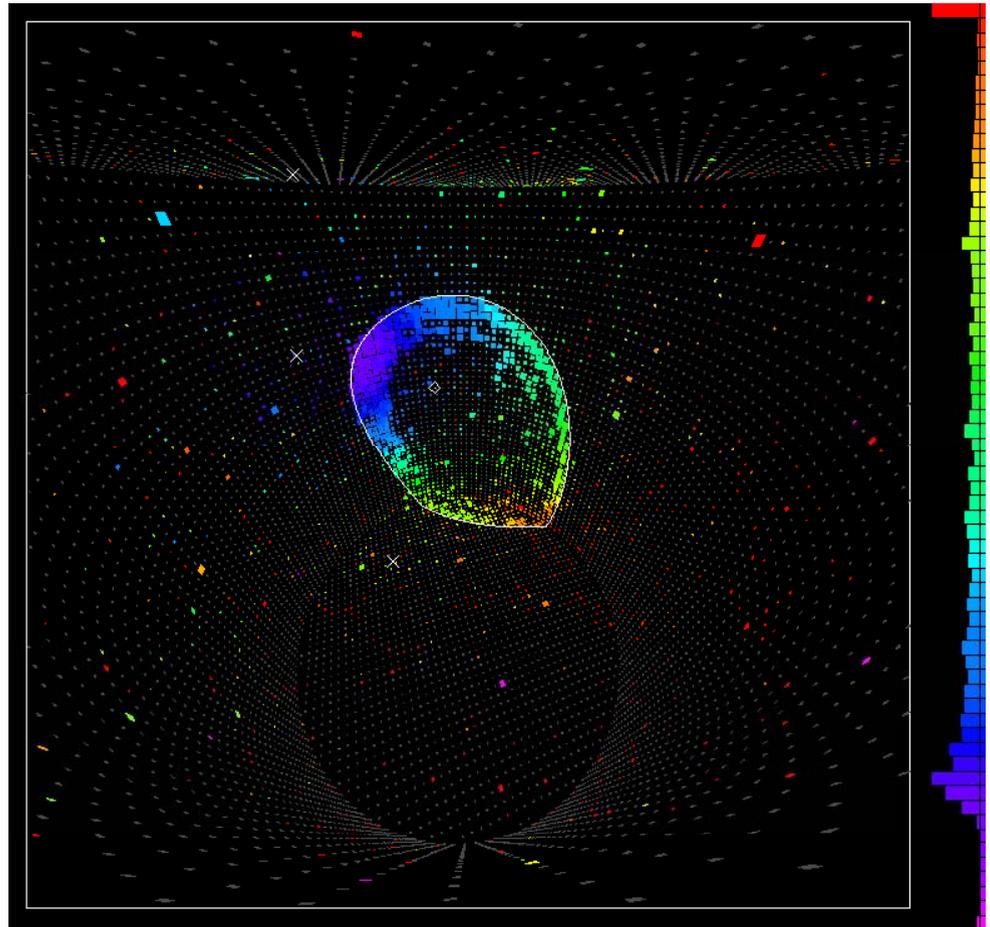


# Super-Kamiokande

1063 MeV neutrino  
interagissant avec un proton  
de la cible. Production d'un  
muon de 1032 MeV muon.

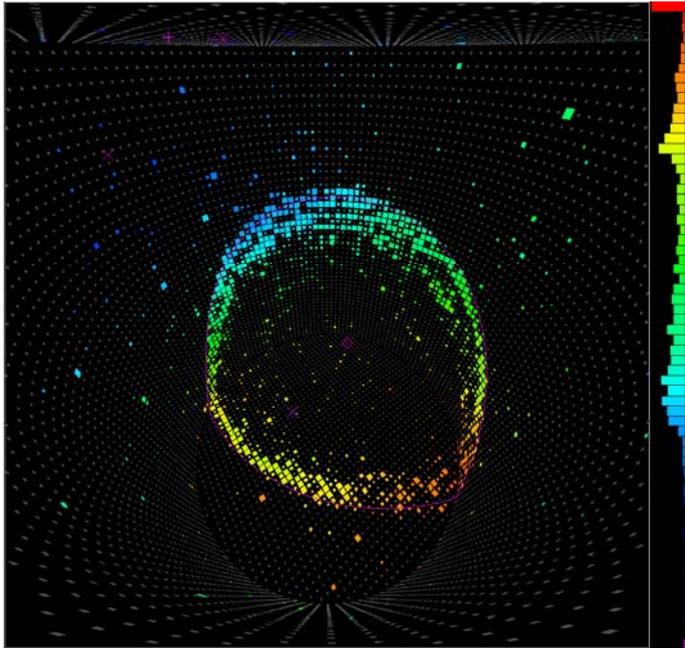
L'échelle de couleur donne le  
temps d'enregistrement des  
signaux dans les PM entre  
987 et 1080 ns.

PMTs proches du vertex  
enregistre un signal avant les  
autres.

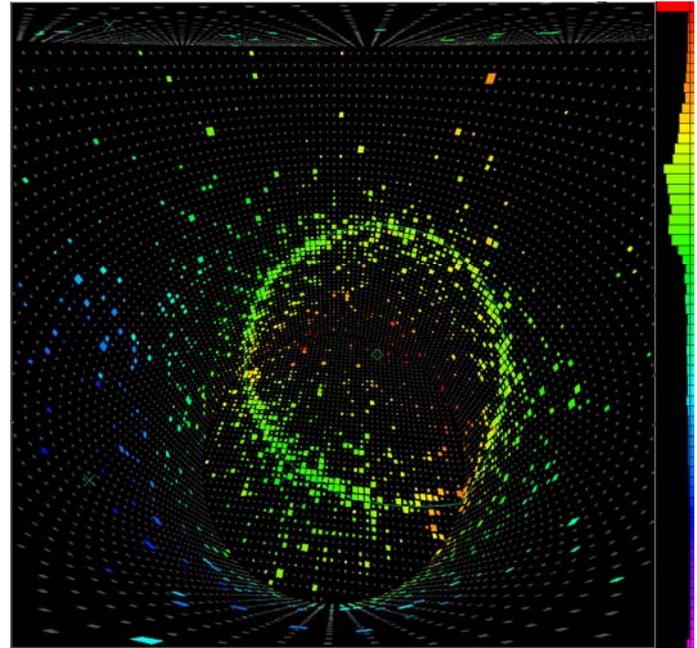


# Super-Kamiokande

Muon

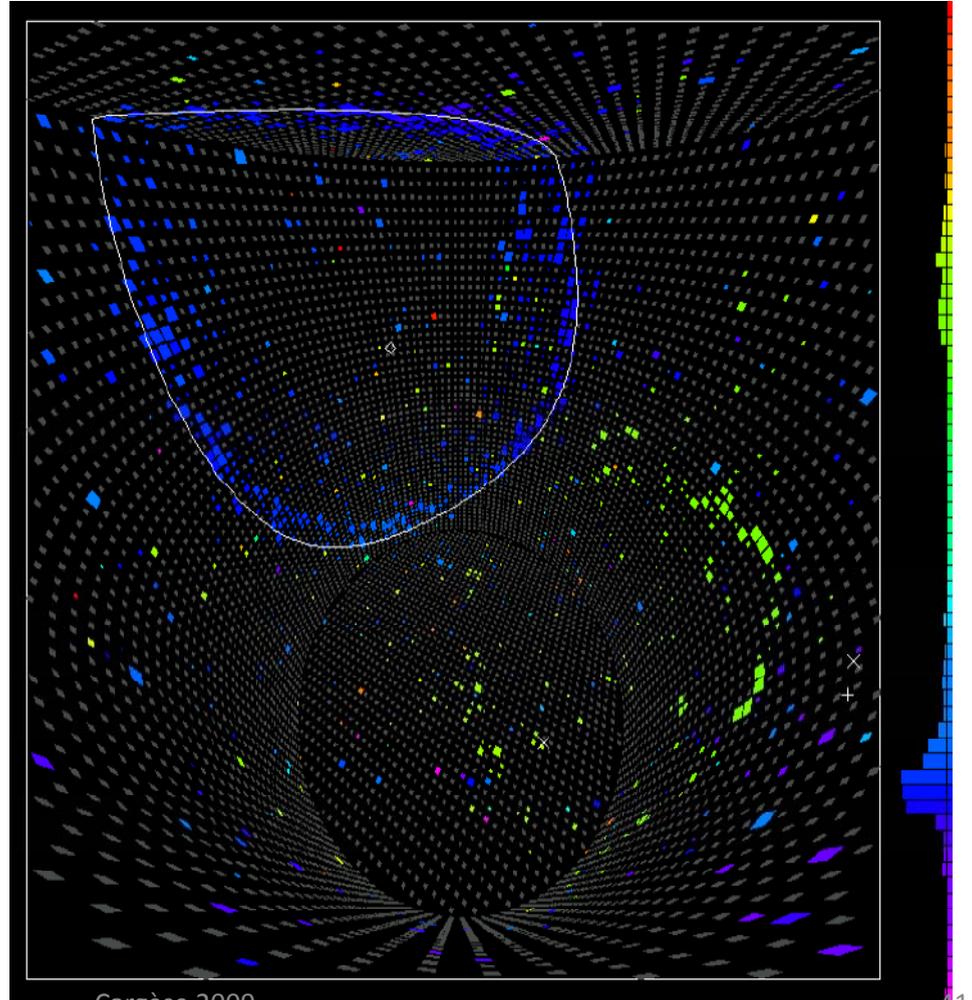


Electron

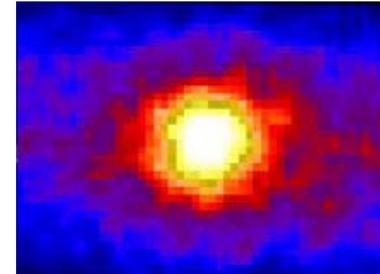
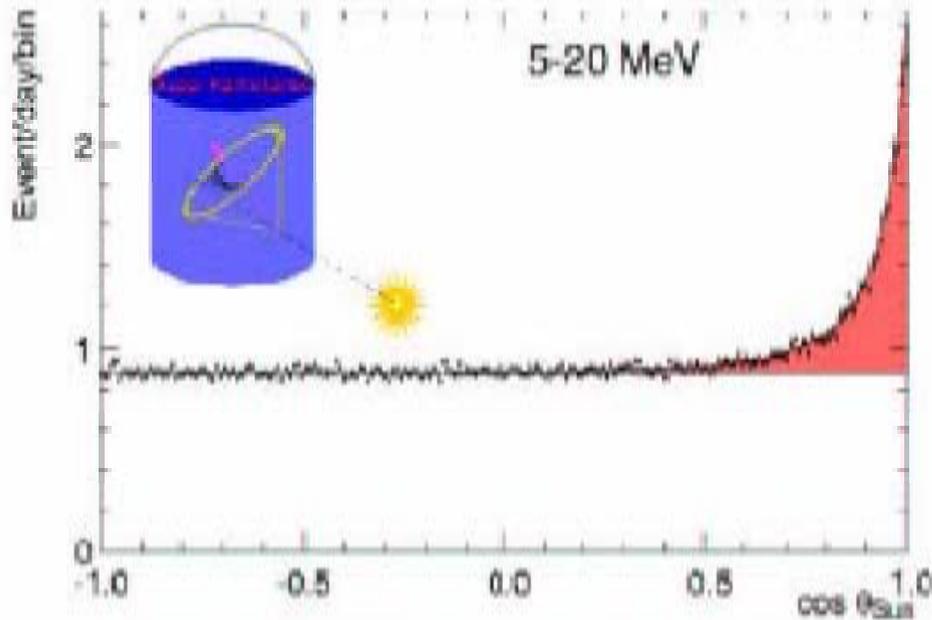


# Super-Kamiokande

Superposition d'un muon et  
d'un electron.



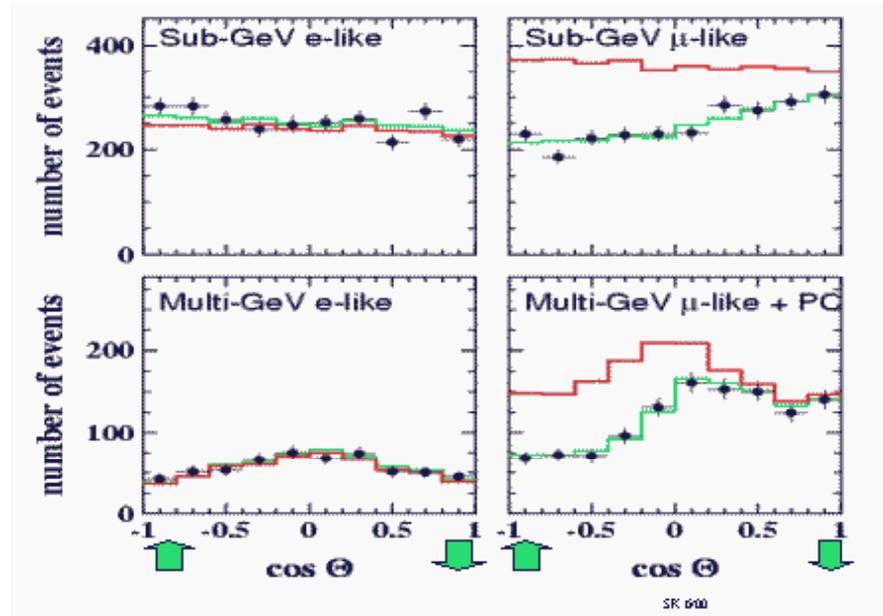
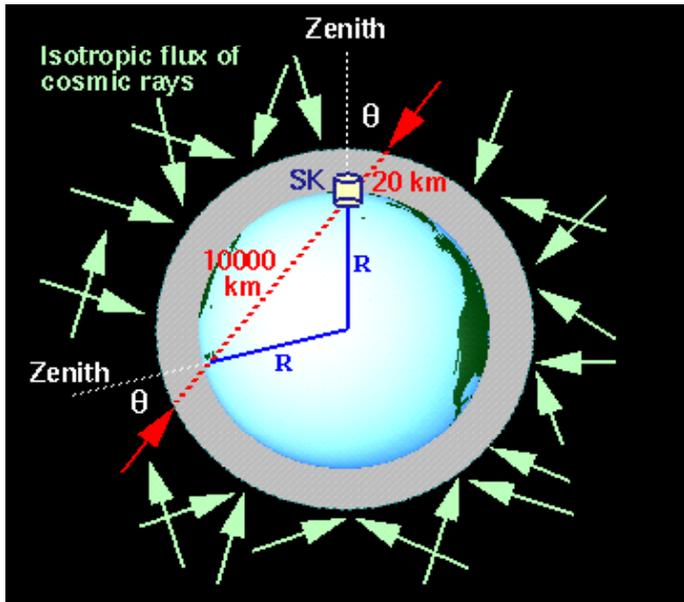
# Super-Kamiokande



Electrons produits par les neutrino solaires ( $\nu_e$ ).  
=> le soleil est bien un moteur de fusion nucléaire.

Le soleil vu par SuperK, 1000 m sous terre (1500 jours de pause !)

# Super-Kamiokande



$\nu_e$  O.K. !

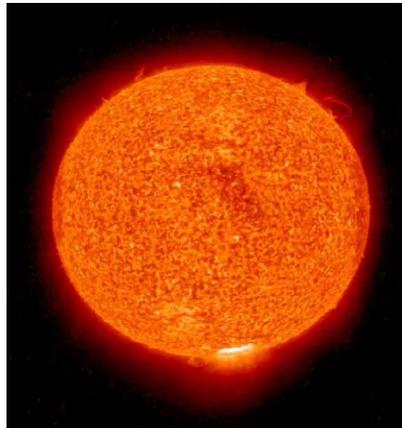
$\nu_\mu$  déficit !

$$\nu_\mu \longleftrightarrow \nu_\tau / \nu?$$

# **LE PROBLEME DES NEUTRINOS SOLAIRES**

# Les neutrinos solaires

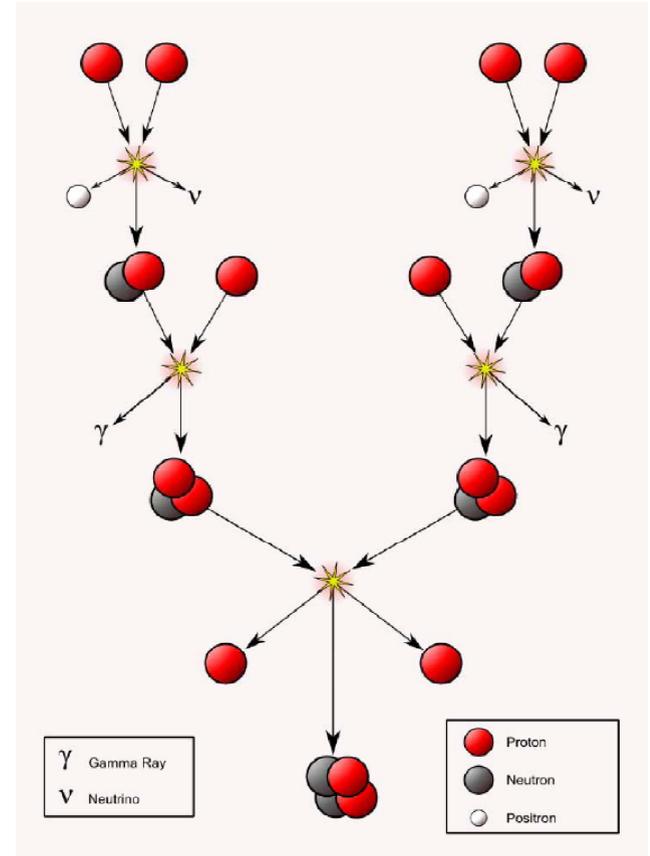
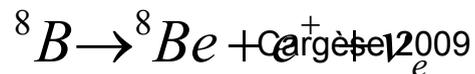
Le Soleil est un gigantesque réacteur à fusion nucléaire.



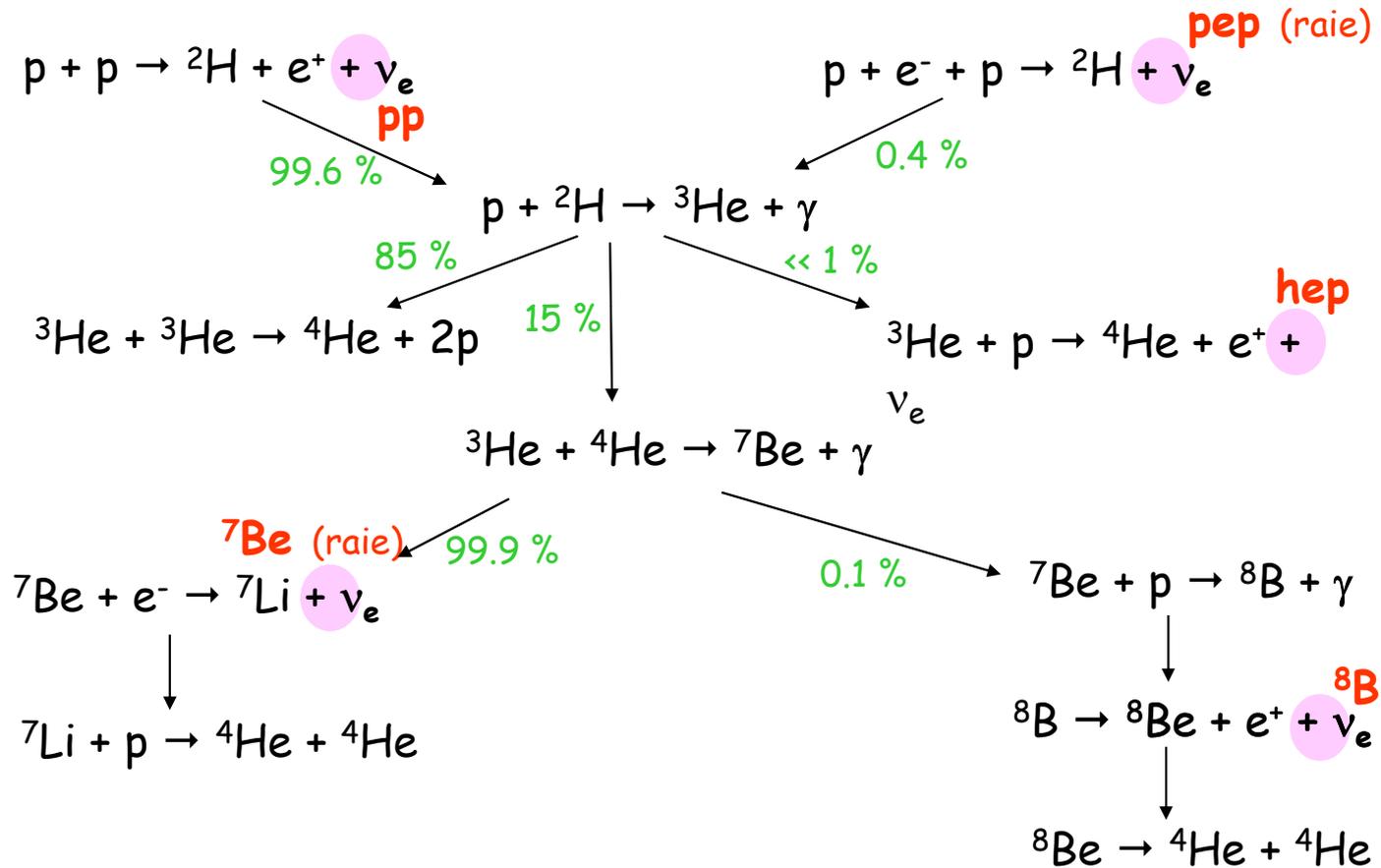
C'est une source intense de photons et de neutrinos électroniques

Des éléments plus lourds émettent aussi des neutrinos par désintégration bêta : Bore –

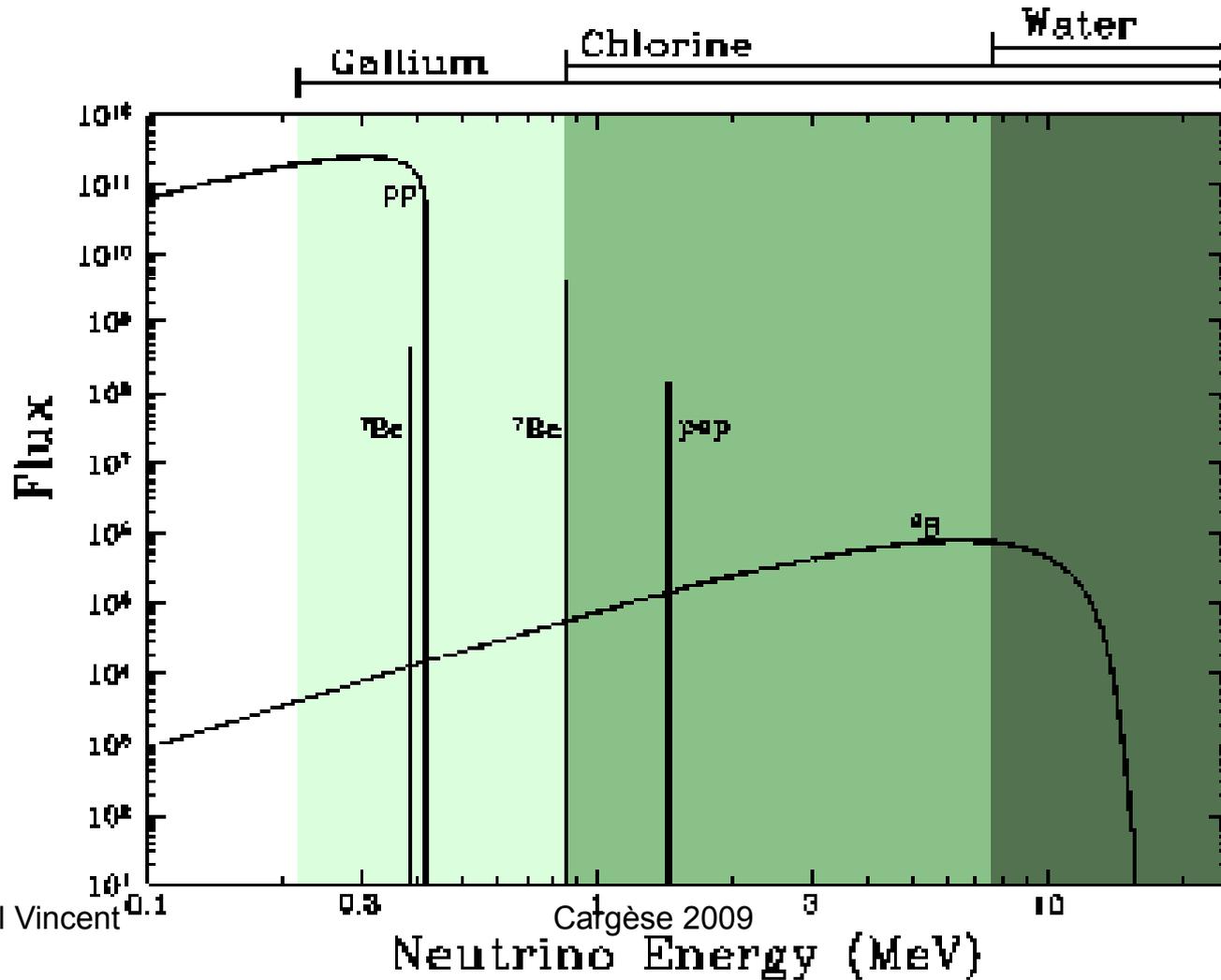
**Béryllium :**  
Pascal Vincent



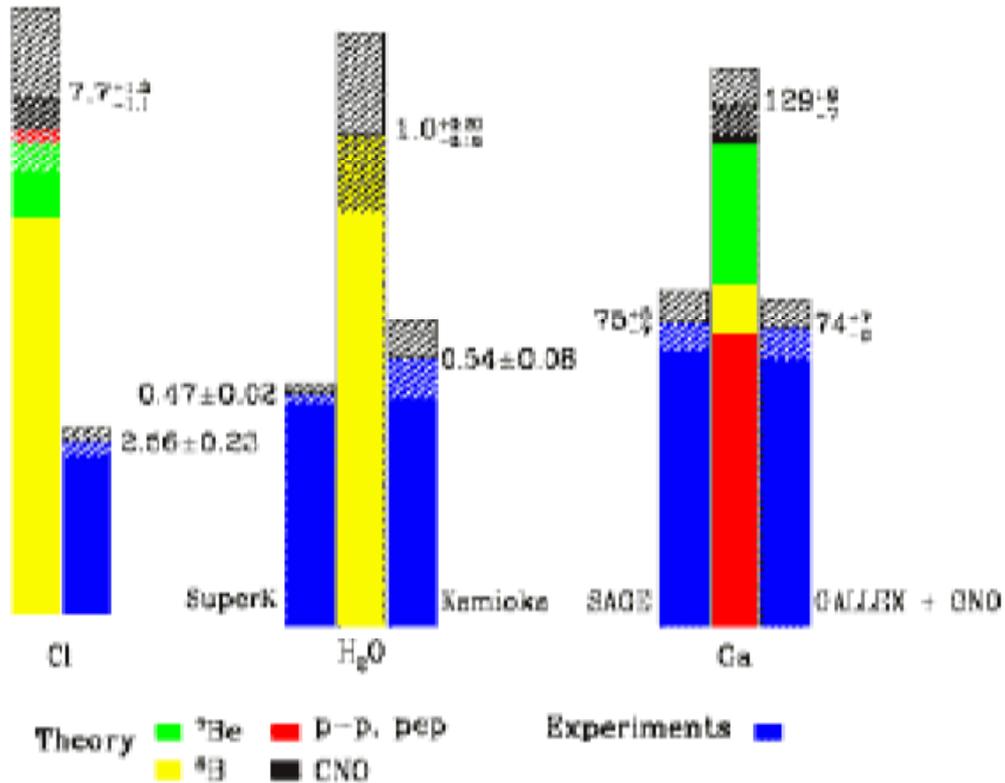
# Les neutrinos solaires



# Les neutrinos solaires



# Les neutrinos solaires



# L'expérience SNO

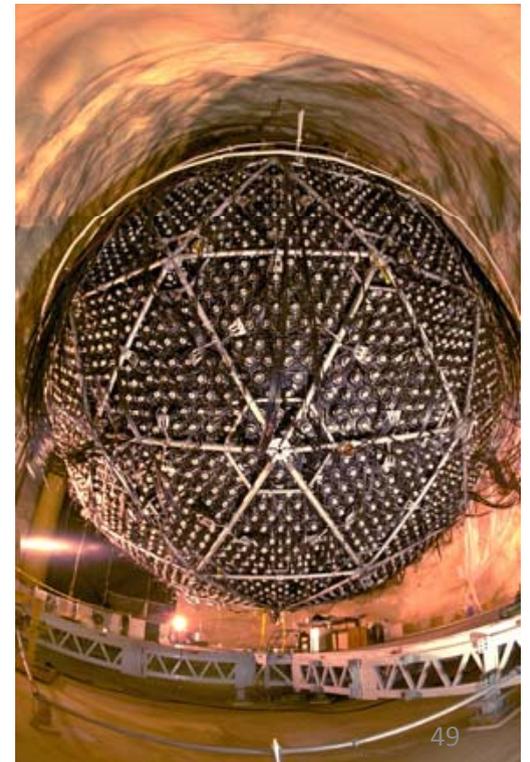
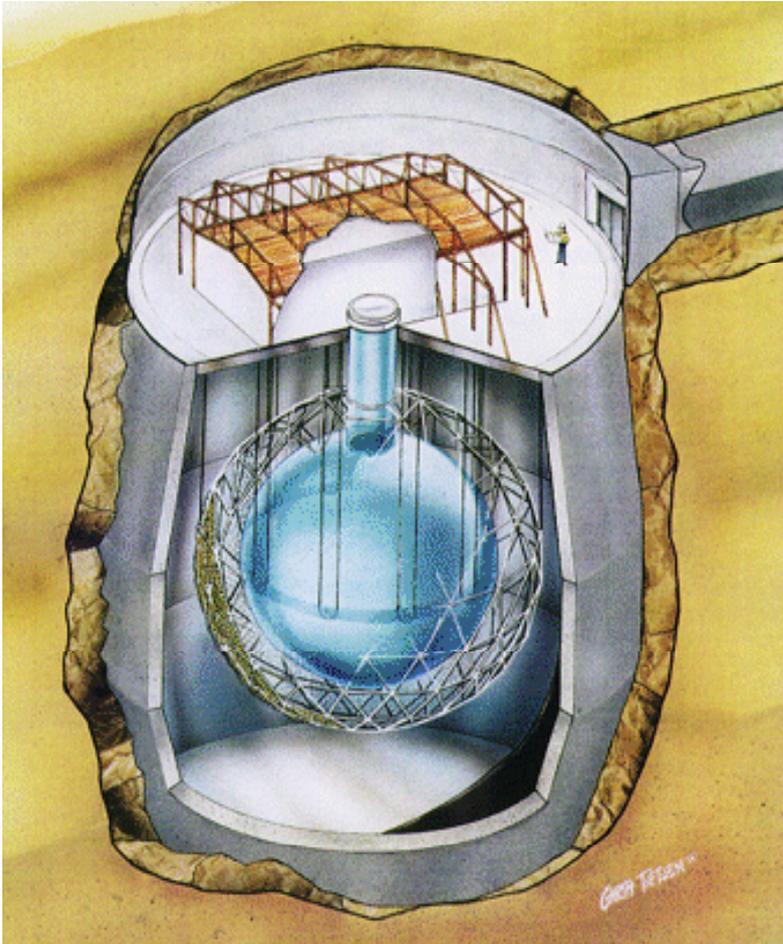
La plus grande cavité jamais construite :

1 ktonne eau lourde

2 km sous Terre

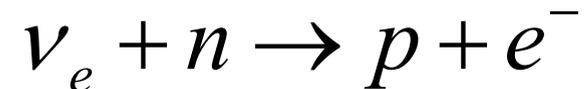
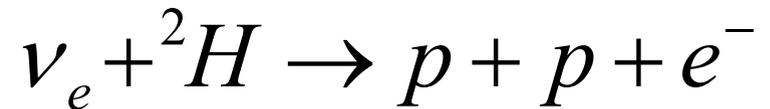
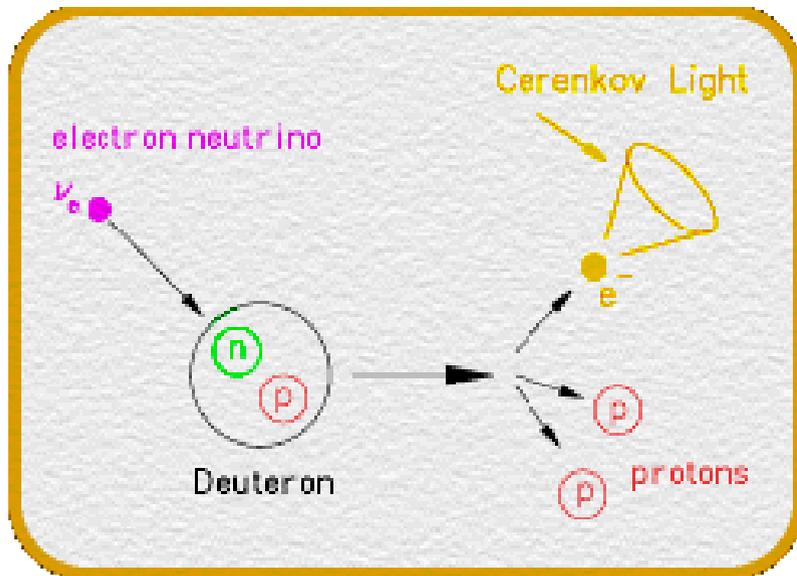
12 m diamètre

9600 PM



# Les résultats de SNO

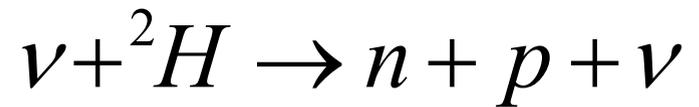
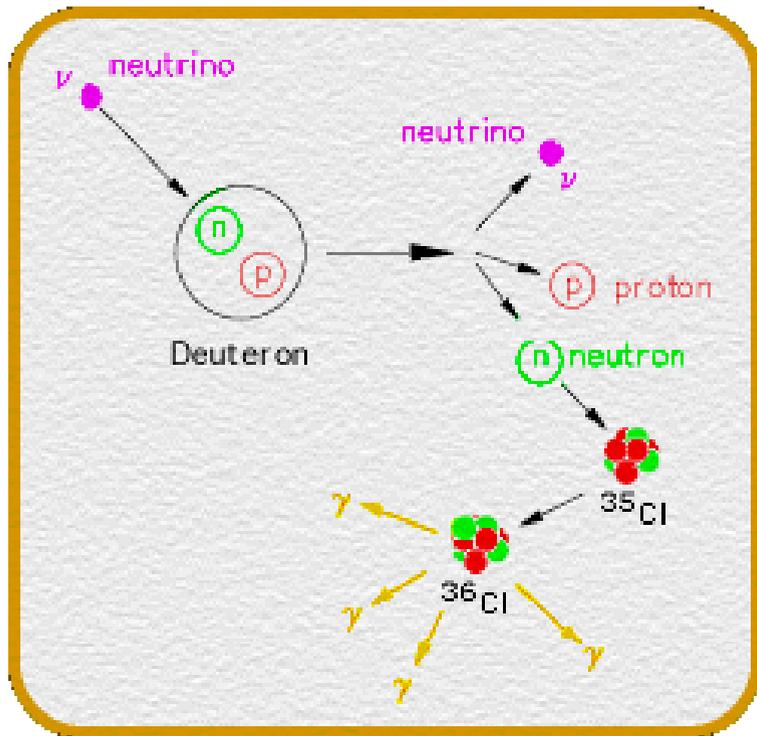
**Courant chargé :** L'interaction de courant chargé ne peut être réalisée que par le neutrino d'électron. Cela permet de tester le taux attendu.



**déficit observé**

# Les résultats de SNO

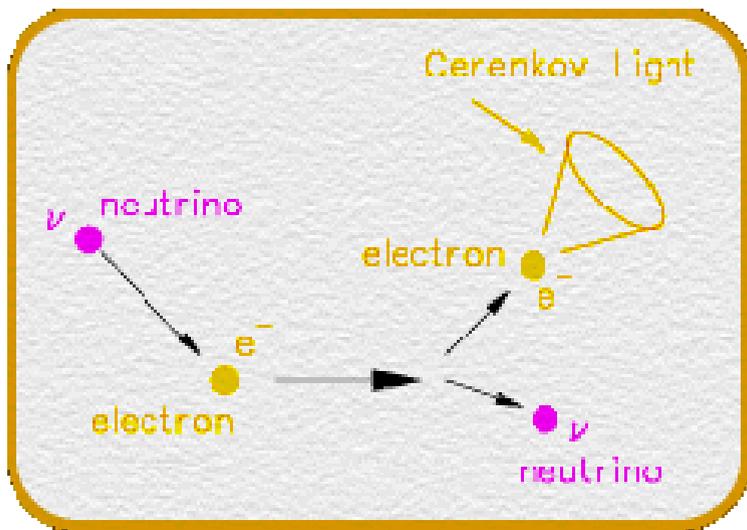
**Courant neutre** : Les trois saveurs de neutrino participent de façon équiprobable.



**confirme modèle solaire**

# Les résultats de SNO

**Diffusion élastique** : tous les neutrinos contribuent mais préférentiellement les neutrinos d'électrons.



**Il existe des neutrinos non électroniques sortant du soleil**

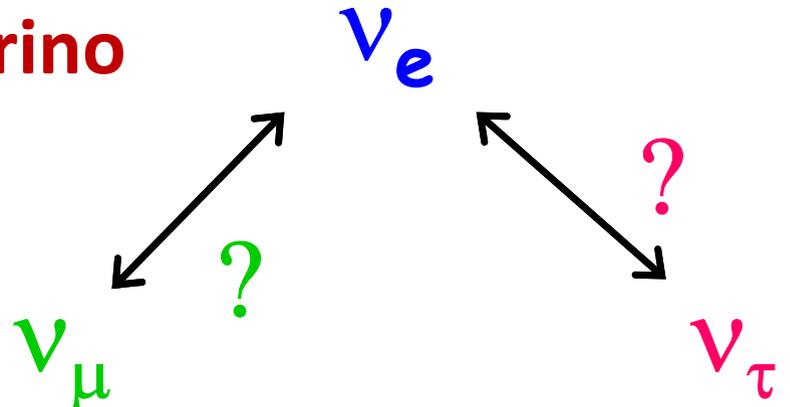
# Les résultats de SNO

On observe un déficit de neutrinos électrons.

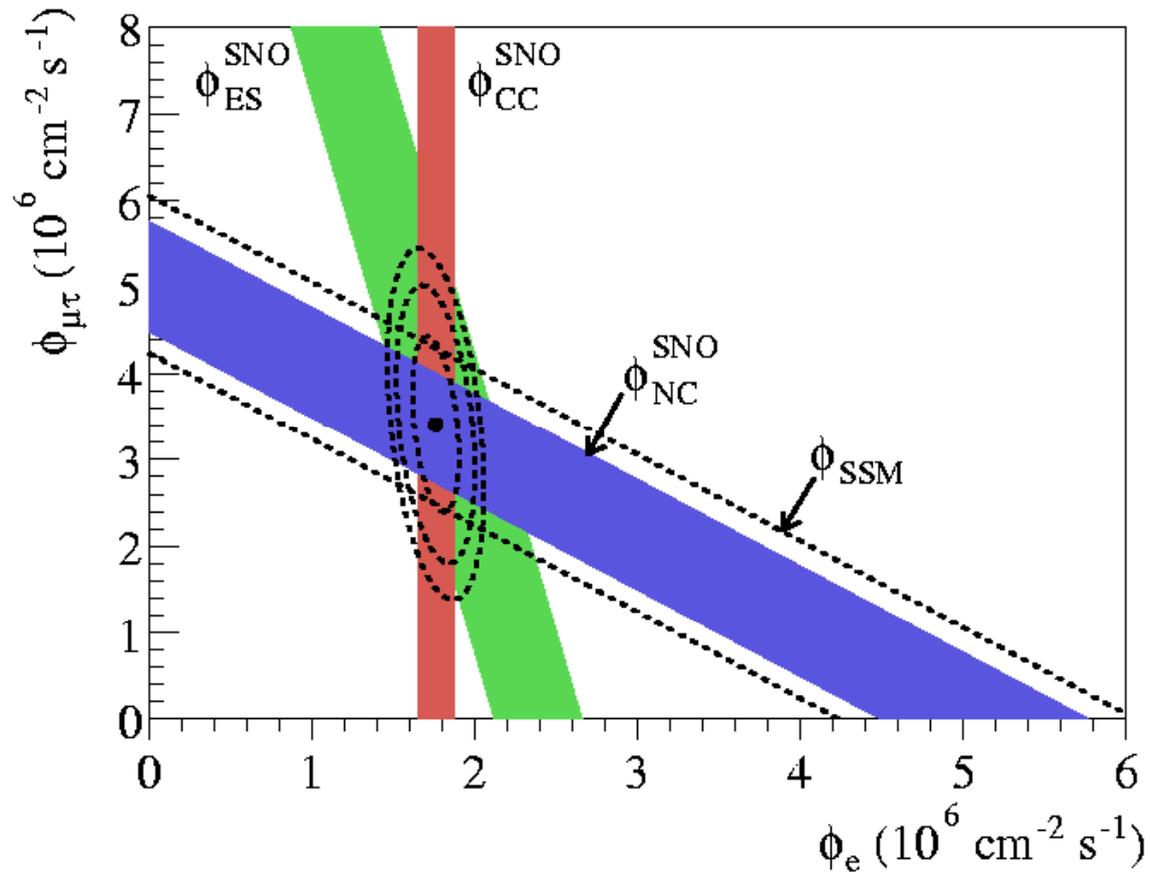
Le nombre total de neutrinos attendu est en accord.

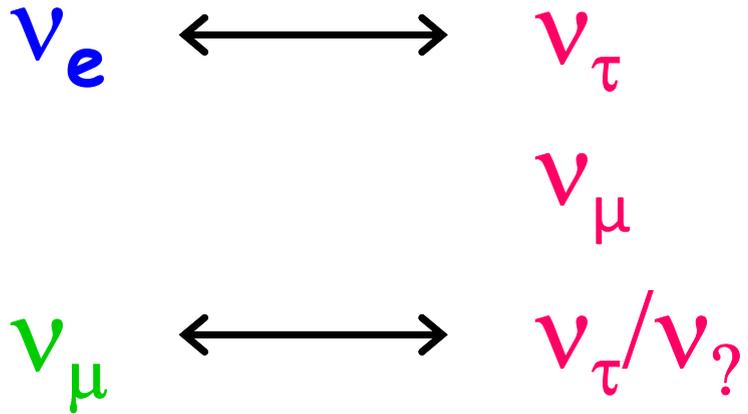
Des neutrinos autres que les neutrinos électroniques sortent du soleil et arrivent sur terre.

**=> Oscillation neutrino**



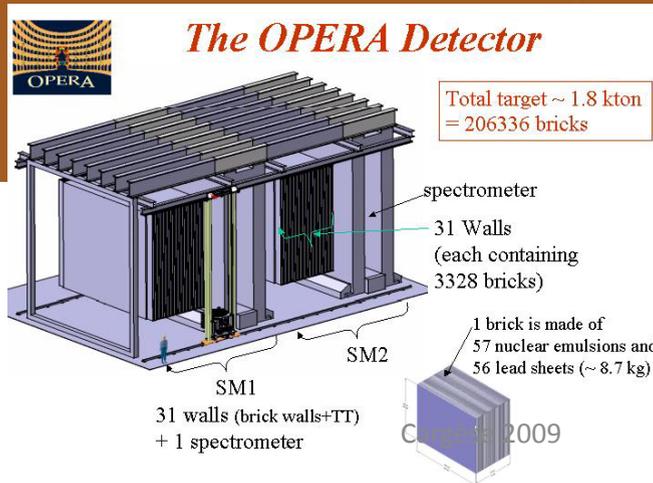
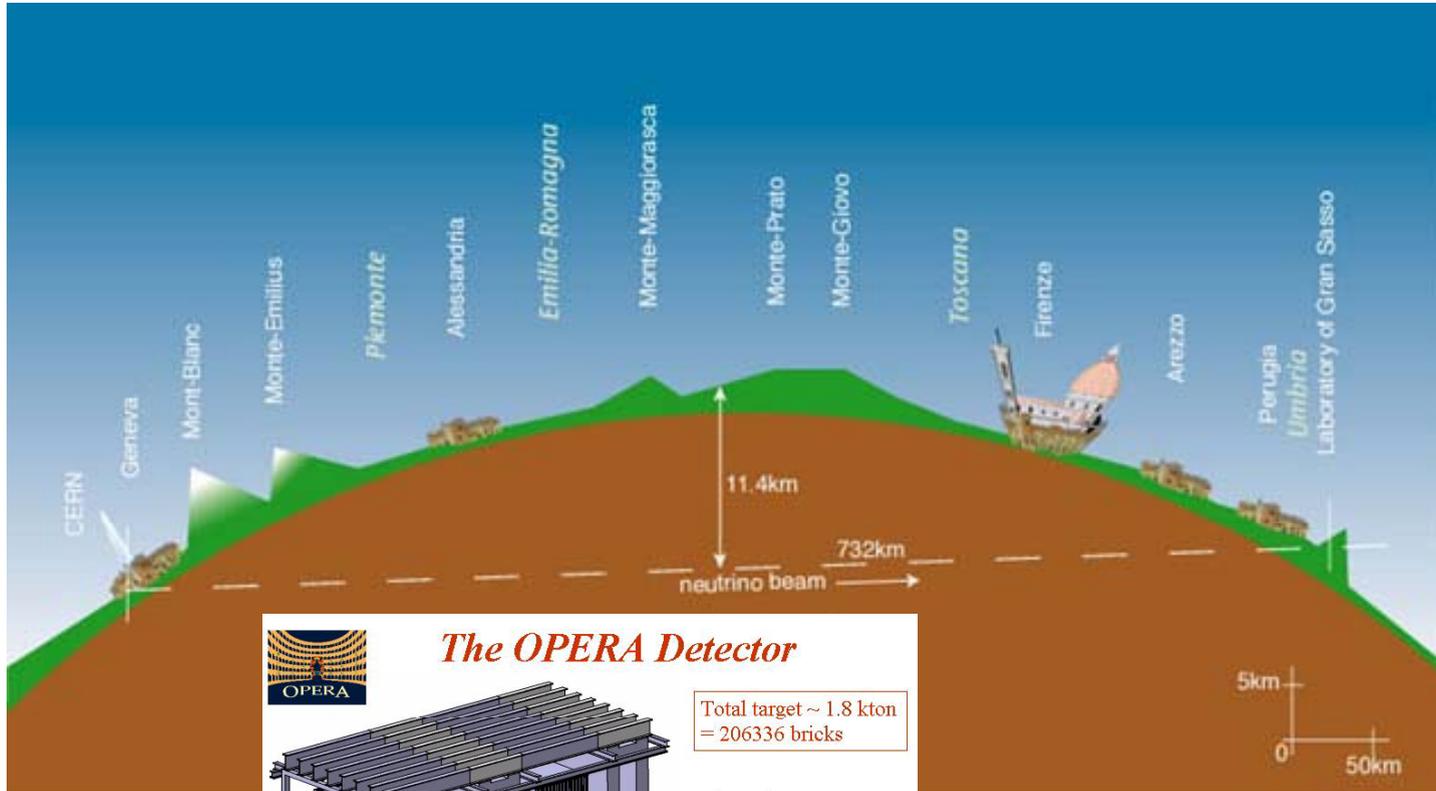
# Les résultats de SNO





# RETOUR AUPRES DES ACCELERATEURS

# Opera



$\nu_{\mu}$



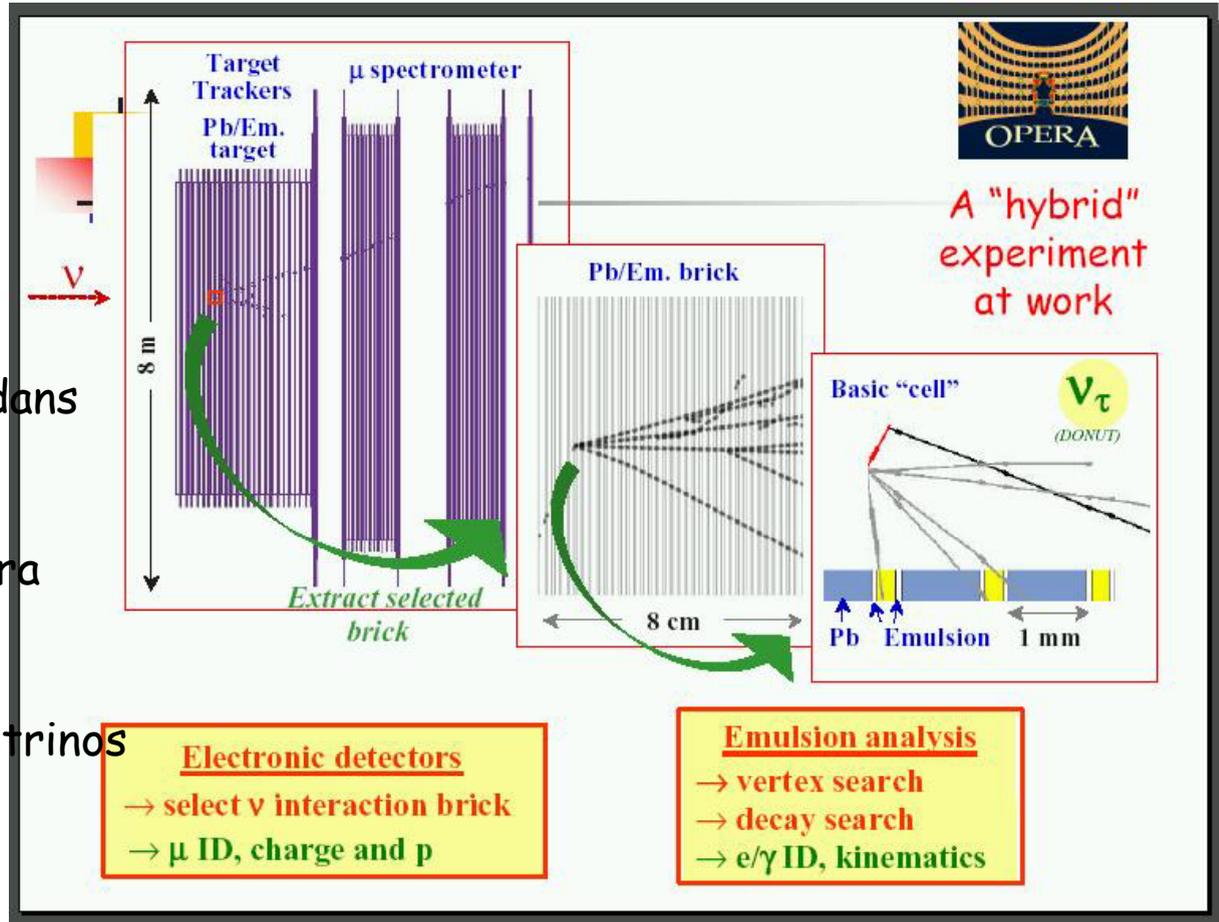
$\nu_{\tau}$

# OPERA

Le neutrino interagit dans le plomb (briques).

Un neutrino tau donnera naissance a un tau qui se désintégrera en formant un coude (neutrinos secondaires).

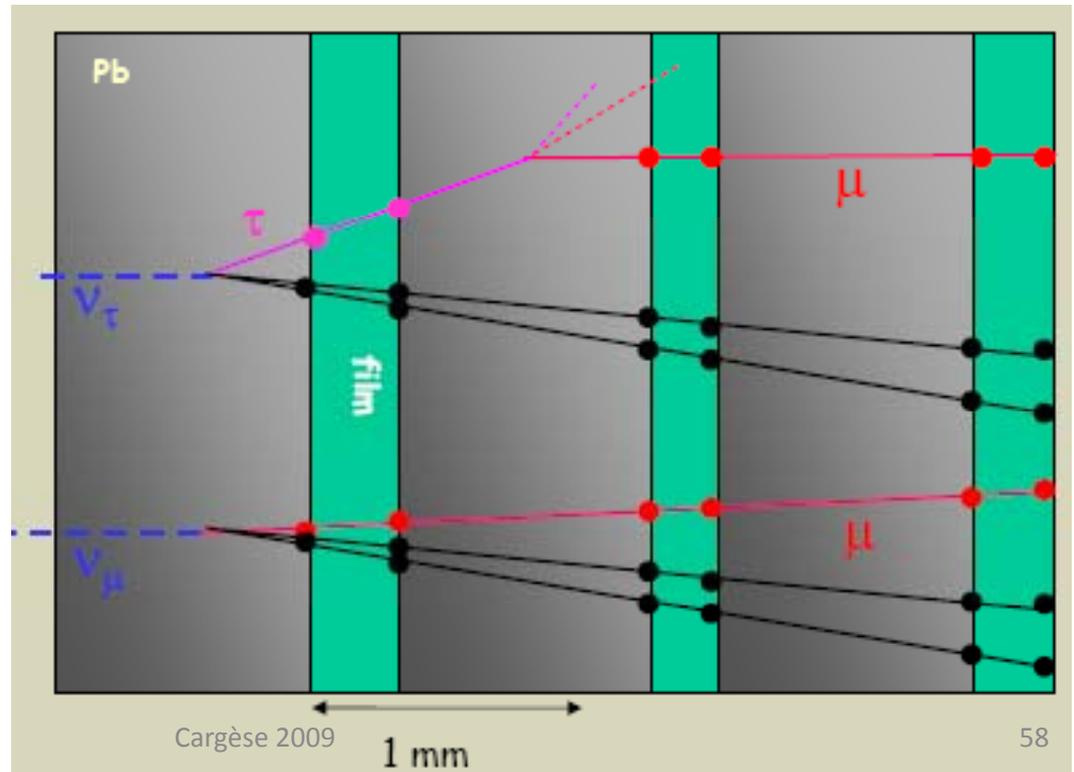
Reconstruction de ce coude dans les émulsions.



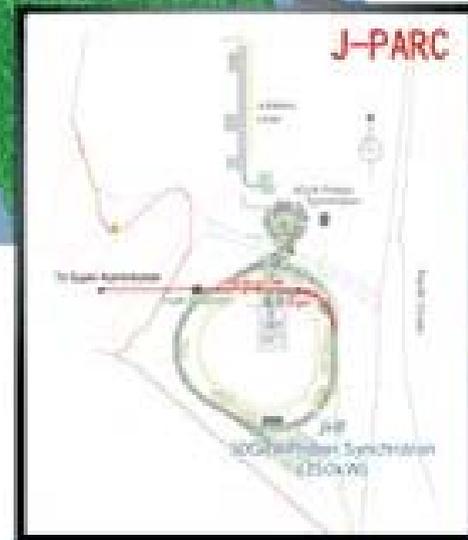
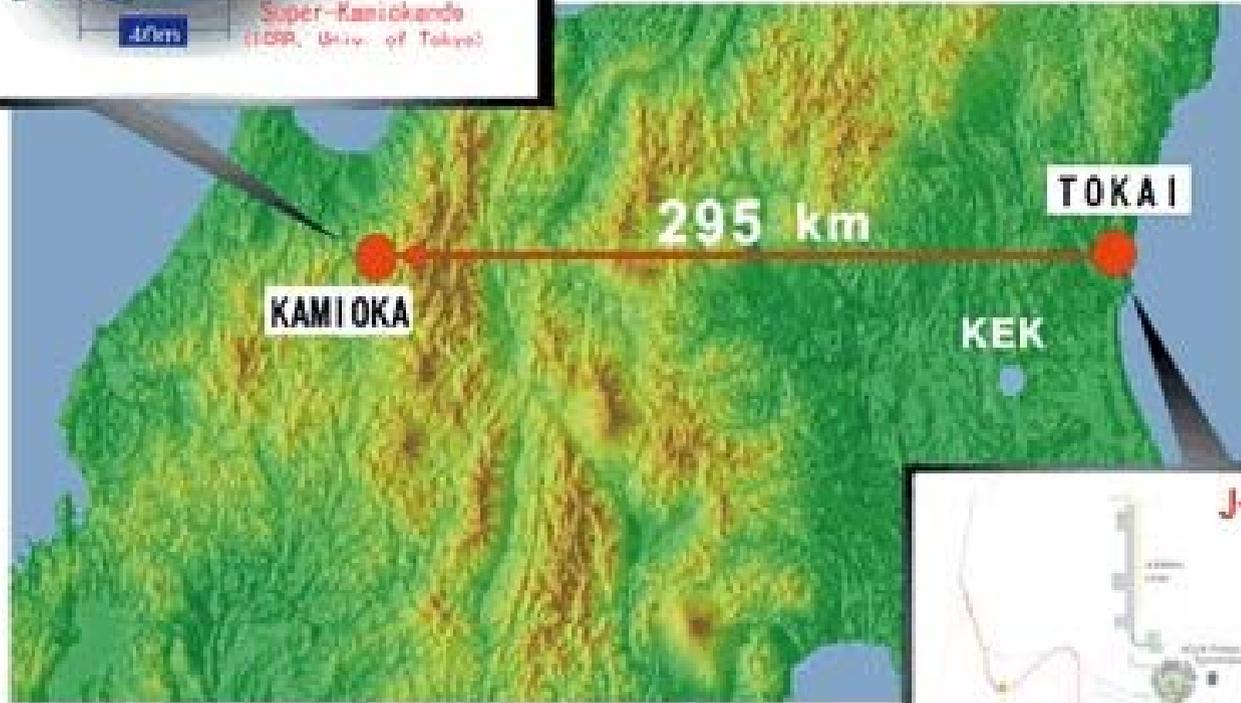
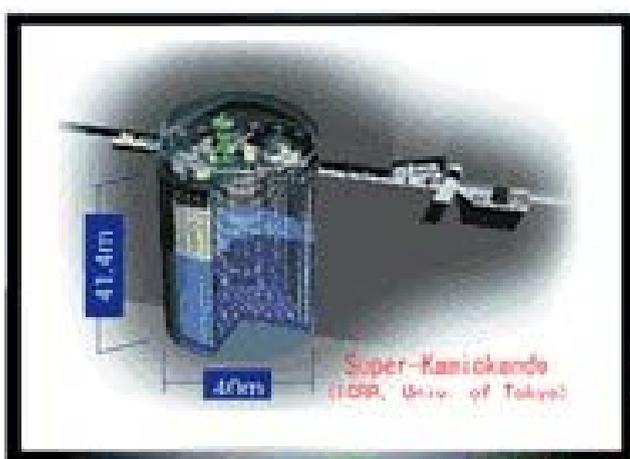
# OPERA

**Pourquoi du Plomb ?** Cible massive pour compenser la probabilité extrêmement faible d'interaction des neutrinos.

**Pourquoi du film photographique ?** Toute la différence entre une interaction de  $\nu_\mu$  et une interaction de  $\nu_\tau$  se passe sur 1 mm.



# T2K

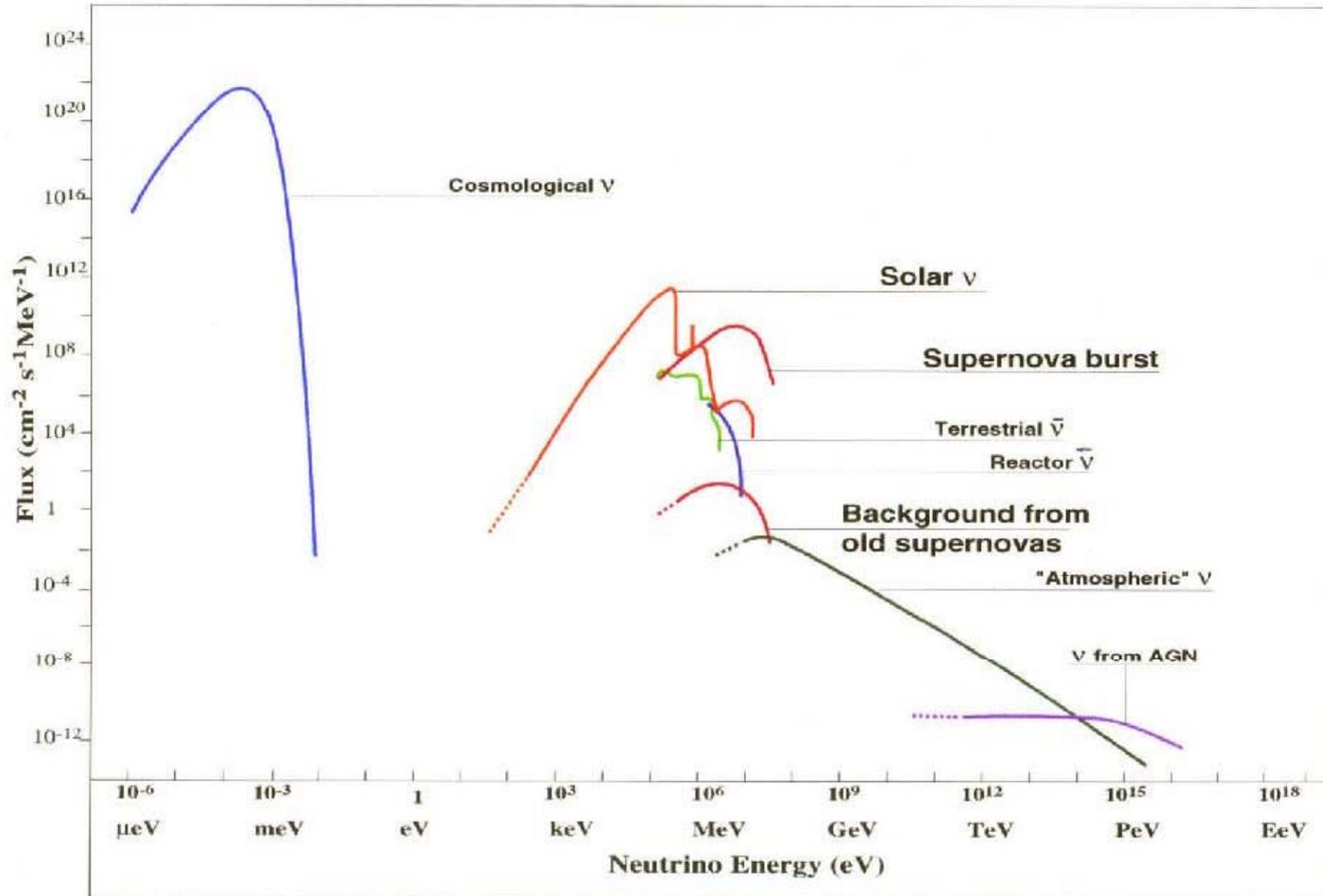


# DoubleChooz

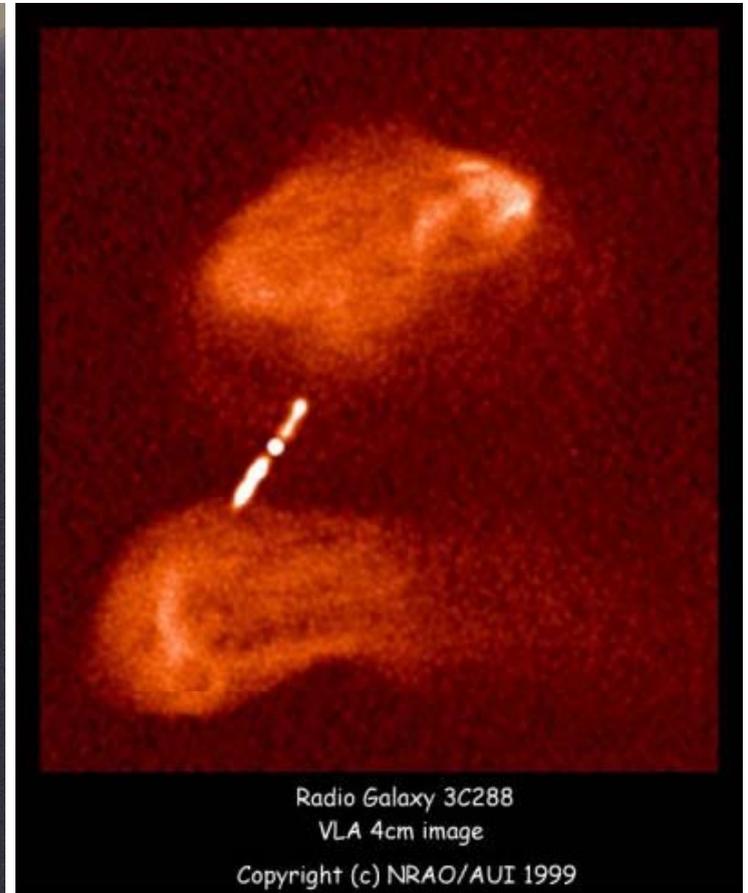
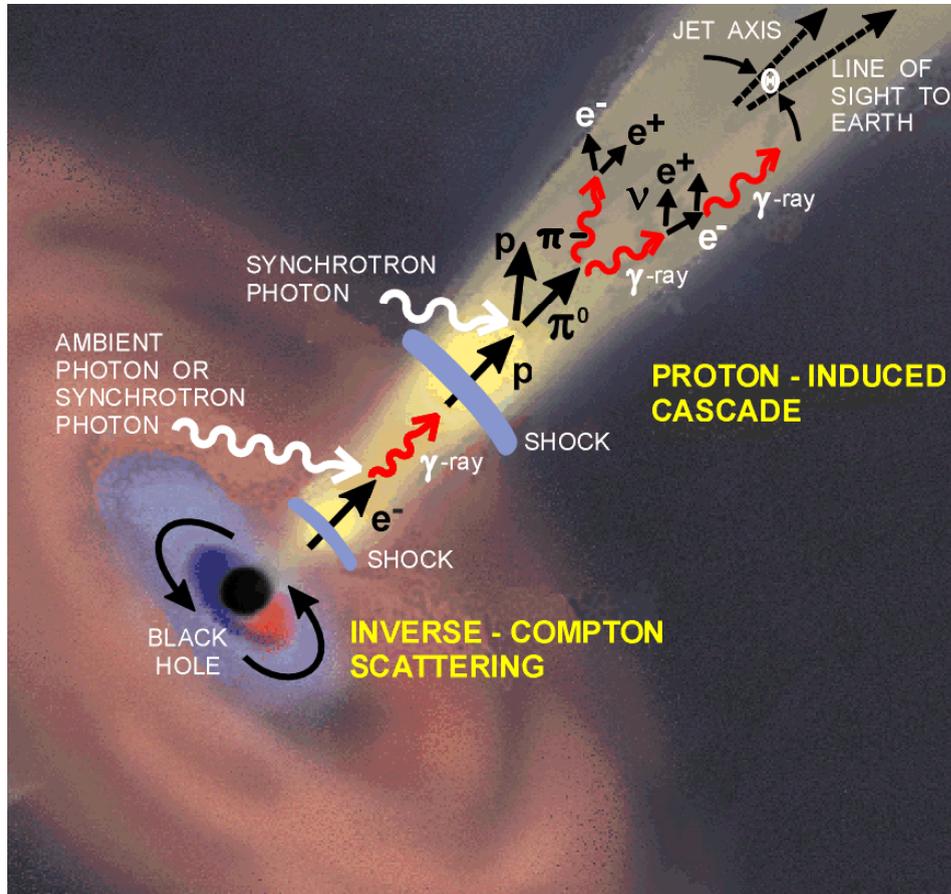


# NEUTRINOS ASTROPHYSIQUE

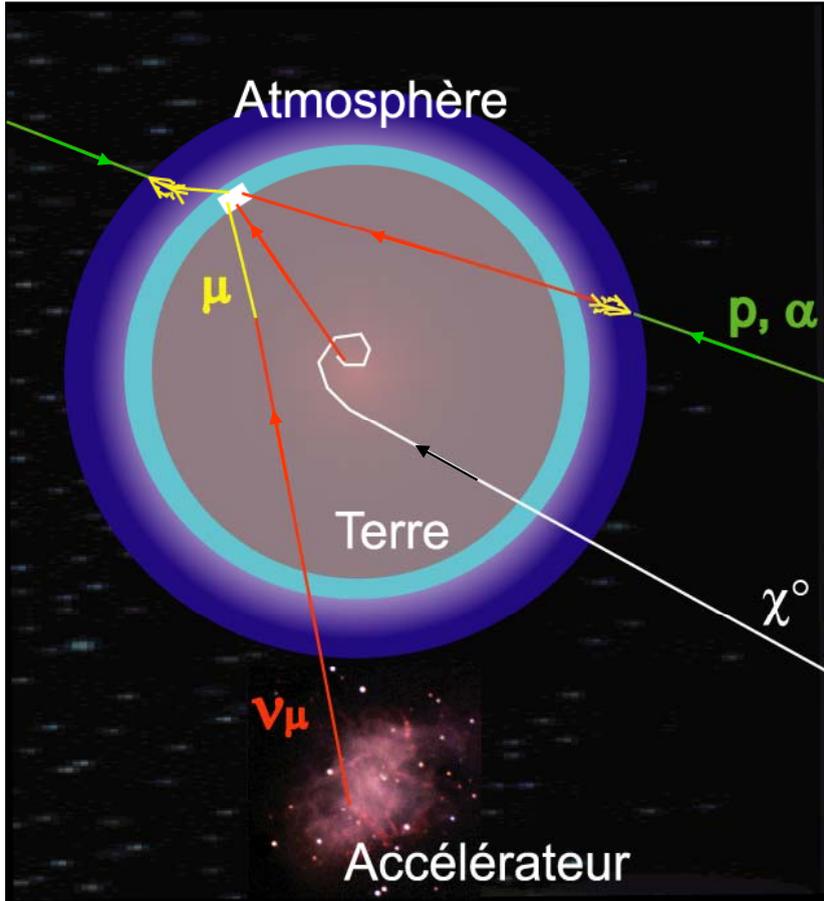
# NEUTRINOS ASTROPHYSIQUE



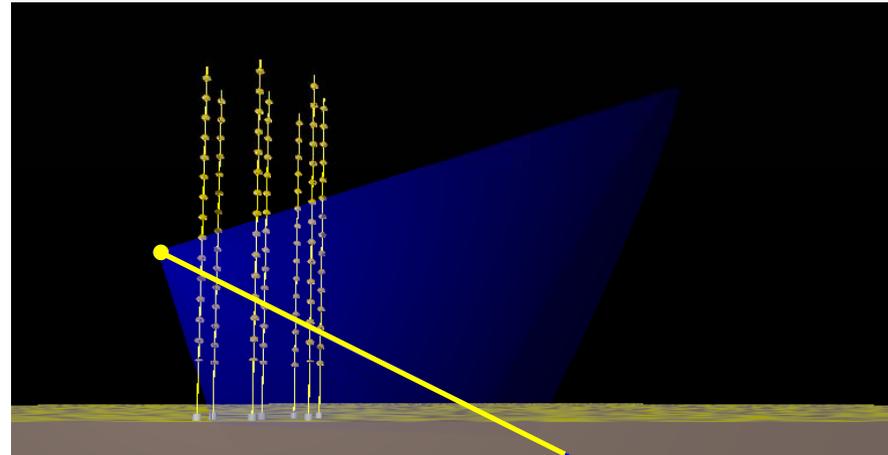
# Sources de neutrino



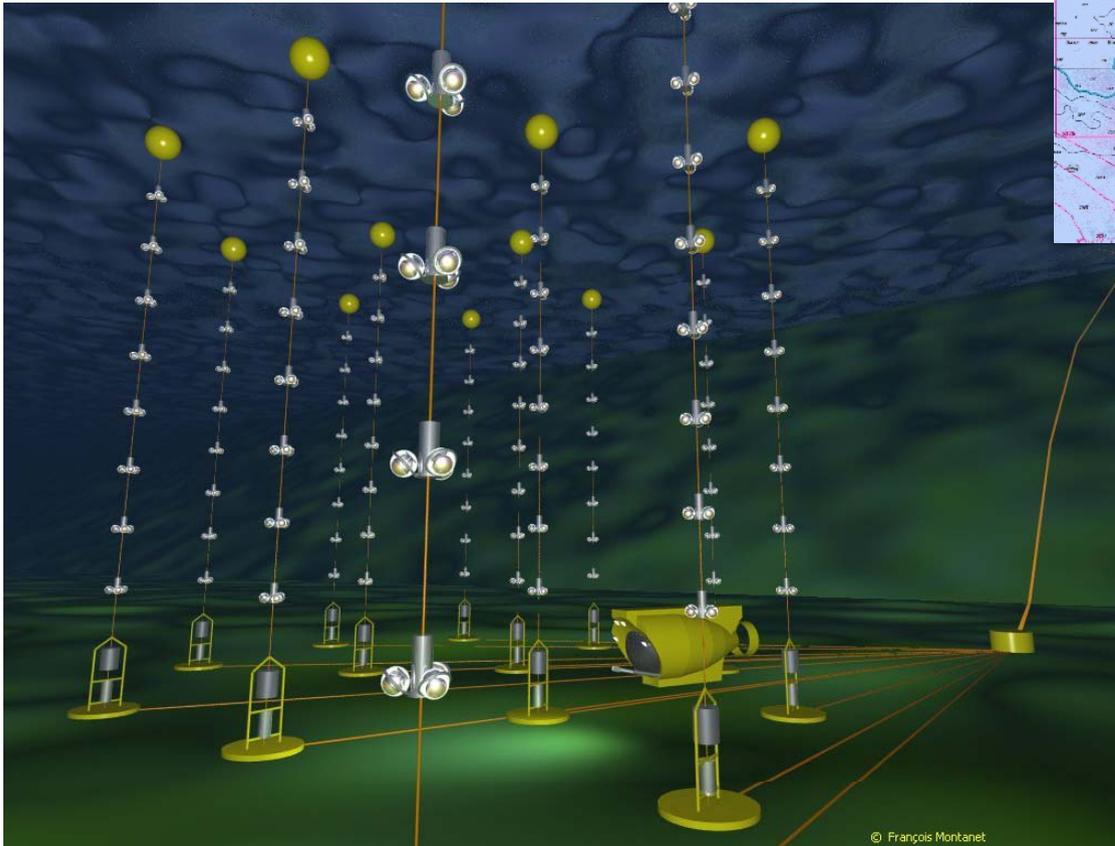
# ANTARES



10 lignes de 450 m  
~1 000 modules de 3 PM  
~0.1 km<sup>2</sup>



# ANTARES

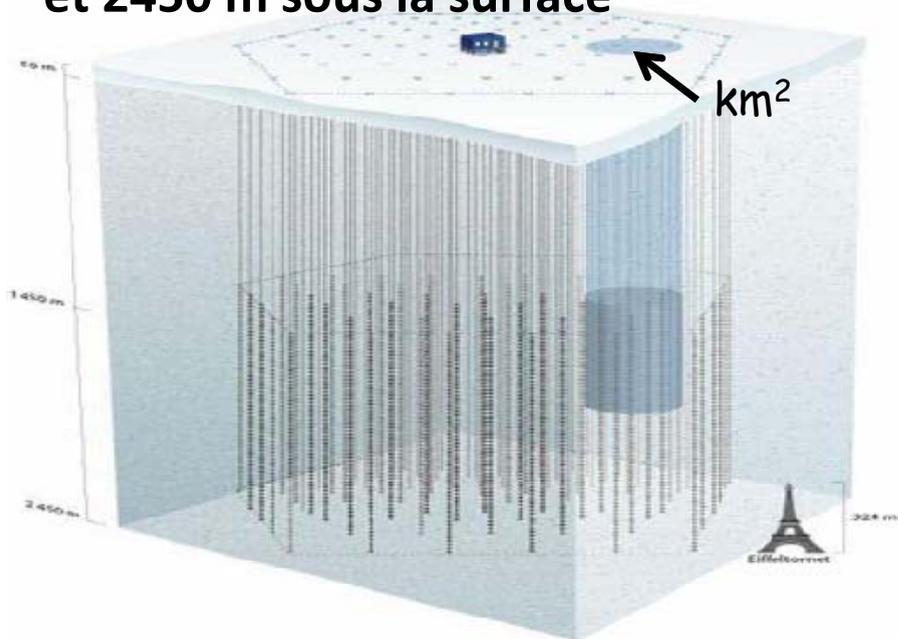


10 lignes de 450 m  
~1 000 modules de 3 PM  
~0.1 km<sup>2</sup>



# IceCube

En cours de déploiement  
Les détecteurs de lumière sont  
installés dans la glace entre 1450 m  
et 2450 m sous la surface



**THE END**

