

Ecole de Gif 2011

12 au 16 septembre APC PARIS

<http://gif2011.in2p3.fr>

PROGRAMME

- Origine de la masse des neutrinos
- Théorie des oscillations
- Neutrinos au-delà du Modèle Standard
- Neutrinos en cosmologie et en astrophysique
- Mesure des paramètres des oscillations
- Mesure de la masse du neutrino
- Astronomie avec les neutrinos
- Futures expériences

COMITE D'ORGANISATION

Francis Arlet (LAPP - Annecy)	Patricio Labrun (IPN - Lyon)
Bernard Andrieu (LPNHE - Paris)	Olivier Lerdy (CPPM - Marseille)
Auguste Besson (IPHC - Strasbourg)	Yann Mambrini (LPT Orsay)
Vincent Boudry (LLR - Palaiseau)	Thomas Patzak (APC - Paris)
Fabien Cavalier (LAL - Orsay)	Pascal Perret (LPC - Clermont)
Jérôme Charles (CPT - Marseille)	Helenka Przywiecniak (LAPP - Annecy)
Anne Isabelle Etienne (IRFU Saclay)	Urko Reinosa (CPHT - Palaiseau)
Pierre Fayet (LPTENS - Paris)	Pietro Slavich (LPHE Paris)
Cyril Hugonie (LPTA - Montpellier)	Benjamin Troadec (LPSO - Grenoble)
Jacob Lamblin (Subatech - Nantes)	Guillaume Unal (CERN - Genève)
Stéphane Lavignac (LPhT - Saclay)	

COMITE LOCAL

Vincent Durand	Aurelia Guet	Herve de Kerret
Antoine Kouchner	Thierry Lasserre	Thomas Patzak
Alessandra Tonazzo	Veronique Van Elewyck	Sarodia Vydlingum

FORMATION PERMANENTE

Catherine Clerc	Bertrand Di Cesare	Josiane Iboorra
-----------------	--------------------	-----------------

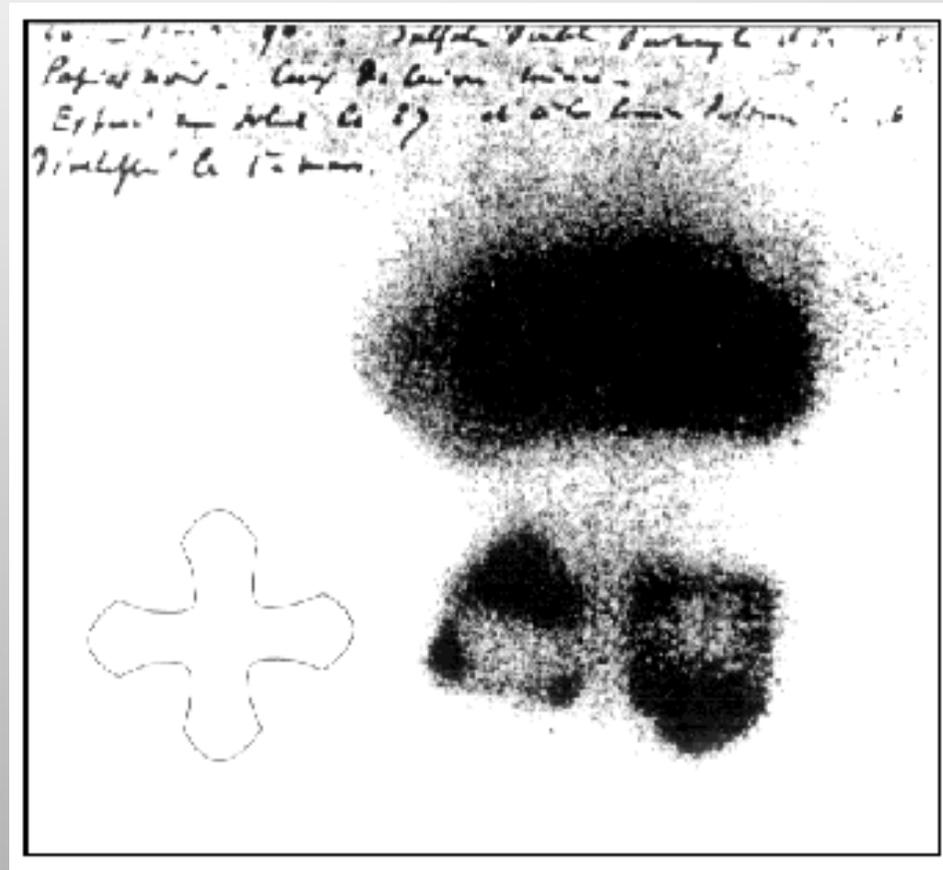
Histoire du Neutrino
Thomas Patzak
Université Paris Diderot

Inscriptions ouvertes du
15 mars au 15 mai 2011
gif2011@apc.univ-paris7.fr

1896: Henri Becquerel découvrait des rayonnements étranges

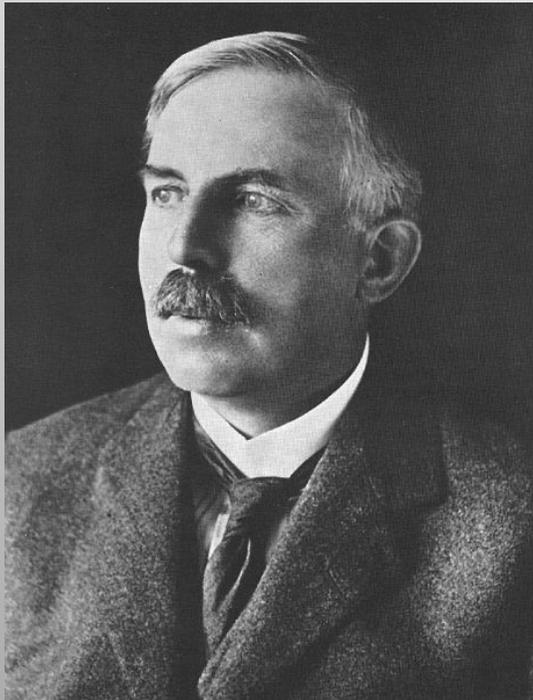


1852-1908



- ★ L'ombre de la croix de cuivre que Becquerel avait placée entre l'uranium et les plaques est visible: le nouveau rayonnement ne les a pas traversé.
- ↻ Il en arrive à la conclusion que les sels d'uranium **émettent naturellement des radiations** pénétrantes sans excitation préalable à la lumière.

1899: Rutherford montre qu'il existe deux sortes de rayonnement: alpha et bêta.



1871 - 1937

1900: Paul Villard rayonnement gamma.



1860 - 1934

1902: Pierre et Marie Curie montrent que le rayonnement bêta n'était autre que des électrons

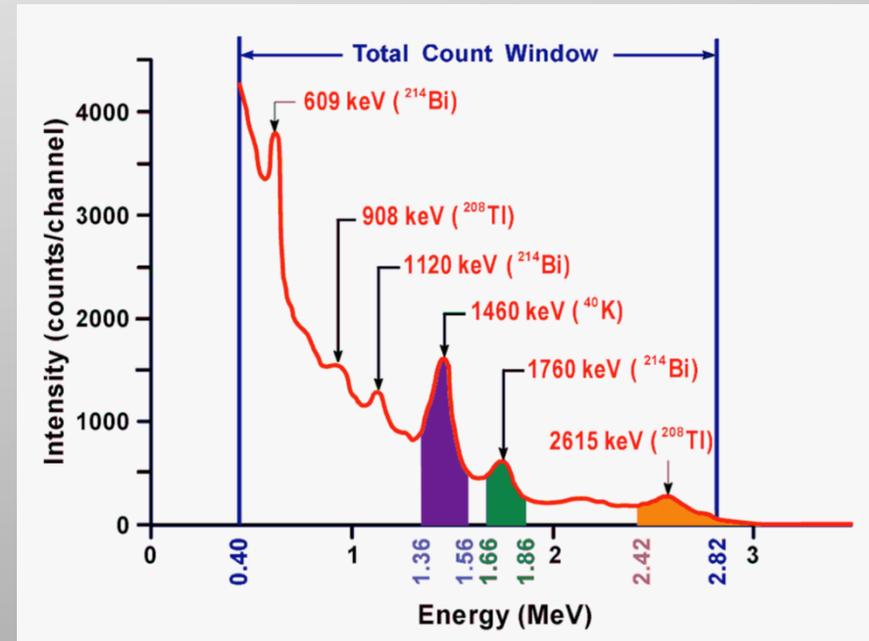
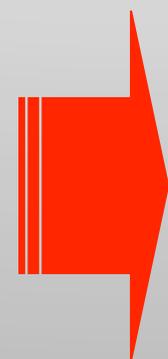
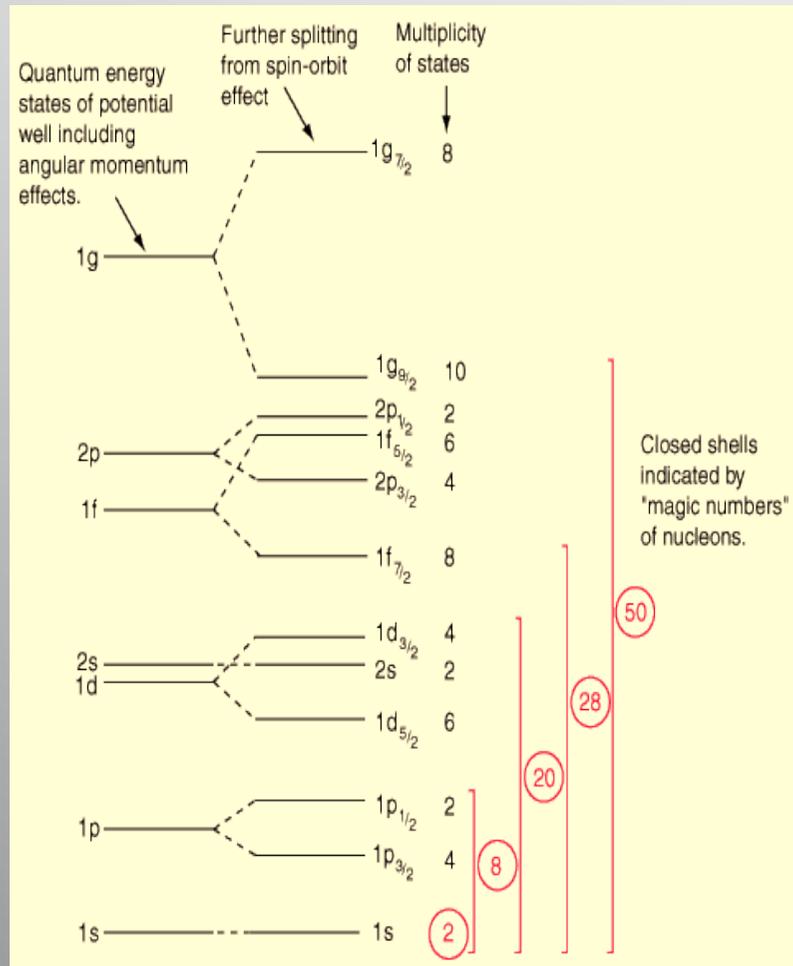
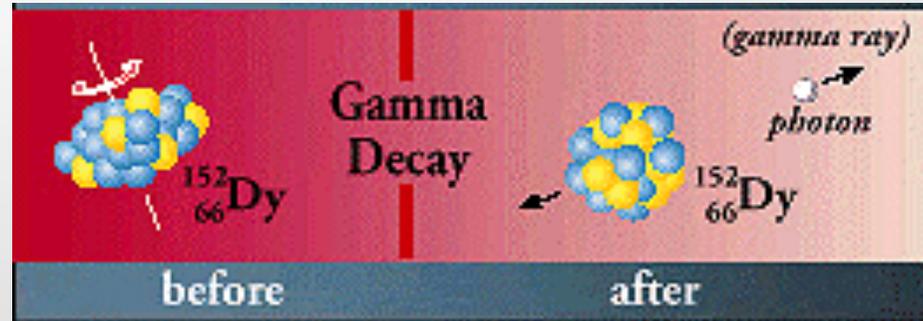


1859 – 1906 et 1867 - 1934

- rayonnement alpha: un noyau d'Hélium 4 (deux protons et deux neutrons) s'échappe du noyau radioactif
- rayonnement gamma: un photon de grande énergie (plusieurs MeV) s'échappe du noyau radioactif
- **rayonnement bêta: un électron s'échappe du noyau radioactif**

Désintégration γ :

Désintégration par l'interaction électro-magnétique

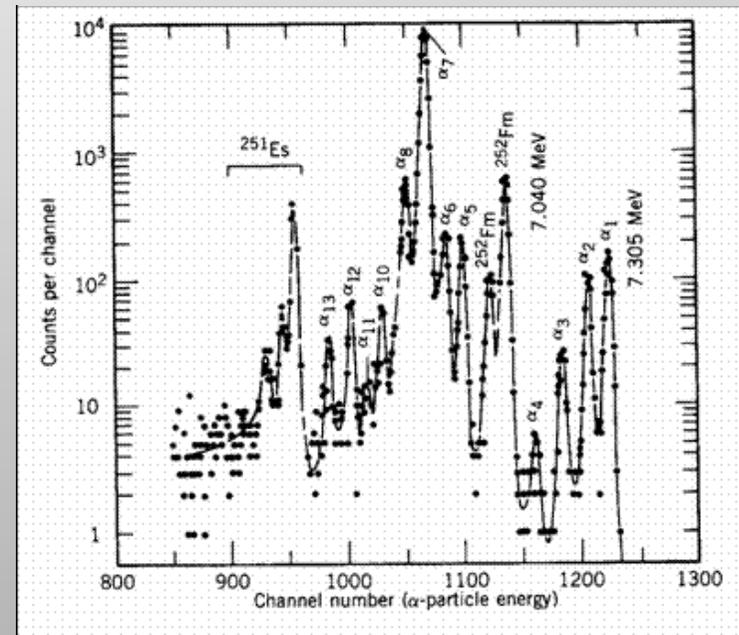
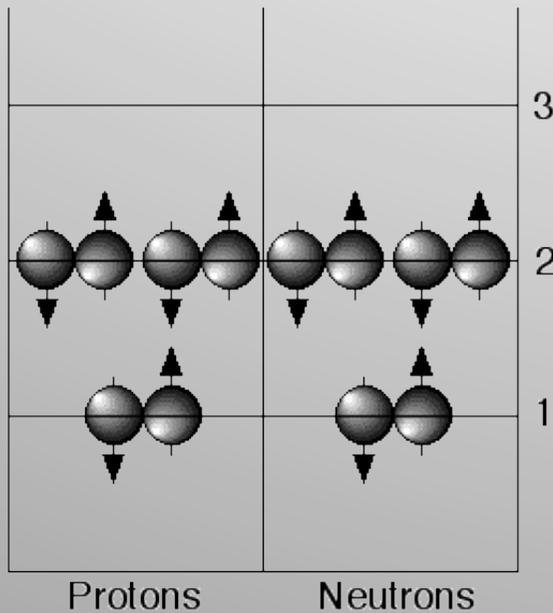
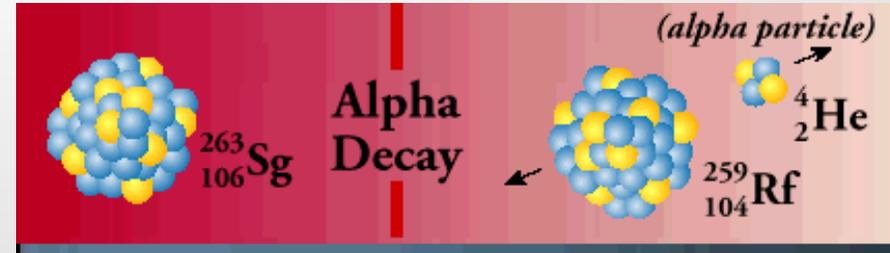


Chaque transition correspond à une ligne mono-énergétique

Model en couches

Désintégration α :

Désintégration par l'interaction forte



Niveaux quantifiés \rightarrow émission α mono-énergétiques

Désintégration β :



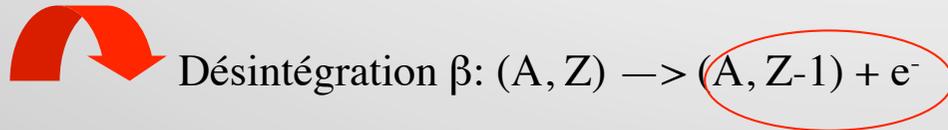
La naissance du neutrino

1914: James Chadwick: Le spectre en énergie de l'électron est continu !

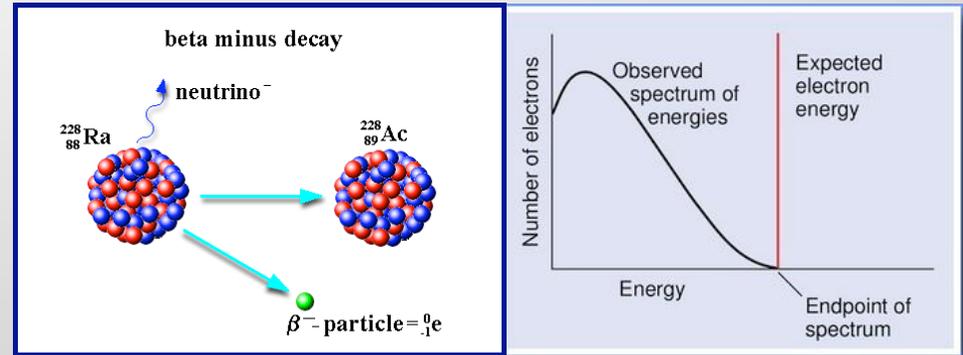
(avec une chambre à ionisation)

Problème:

à l'époque le noyau composé de A protons et A - Z électrons



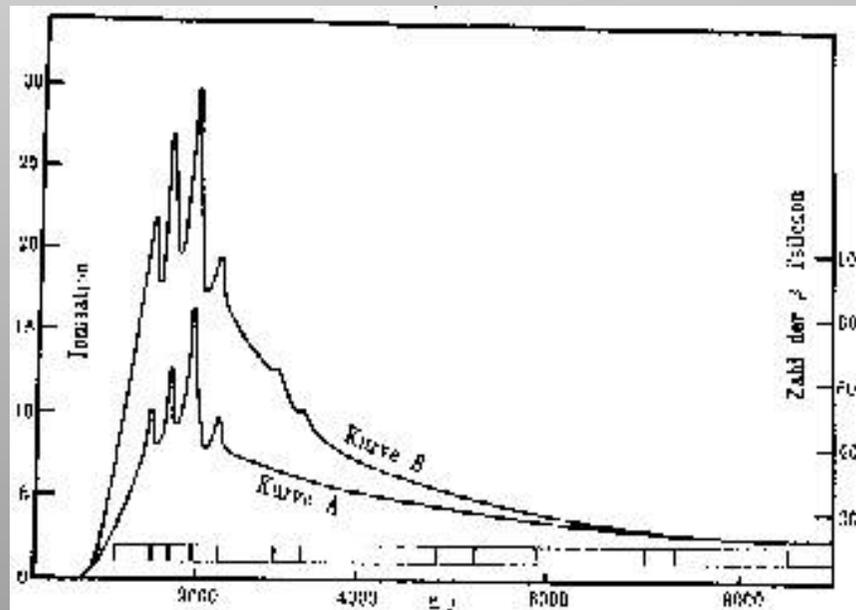
= désintégration à deux corps




On attend un pic mono-énergétique des e^-



1891 - 1974



Les explications fausses:

1. Plusieurs e^- émis? **NON!** En 1924 K. G. Emeleus a mesuré 1,43 e^- émis par désintégration β par nucléon. (avec un compteur Geiger)

2. L. Meitner: le rayonnement β initialement discret est transformé en spectre continu par des interactions secondaires.

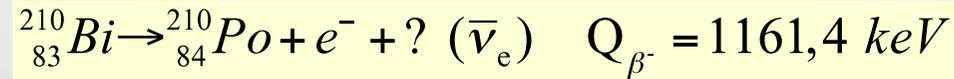


1878 - 1968

NON! L' 'électron premier de Meitner n'a jamais été observé

3. L'énergie maximale est partagée entre l'électron et des rayons γ : $E_\gamma = E_{\max} - E_e$

NON! En 1927 C. D. Ellis et W. A. Wooster \rightarrow mesure calorimétrique



La mesure de la chaleur absolue libérée dans la désintégration β



La chaleur déposée dans le détecteur = énergie moyenne du spectre β



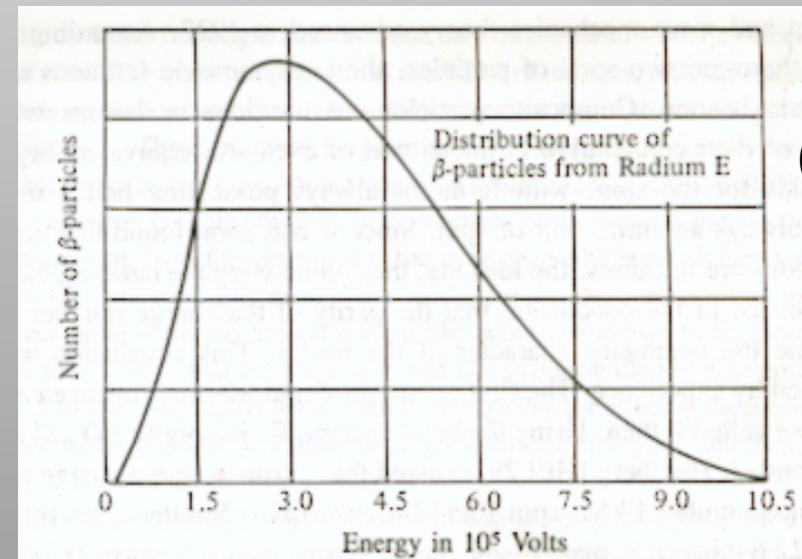
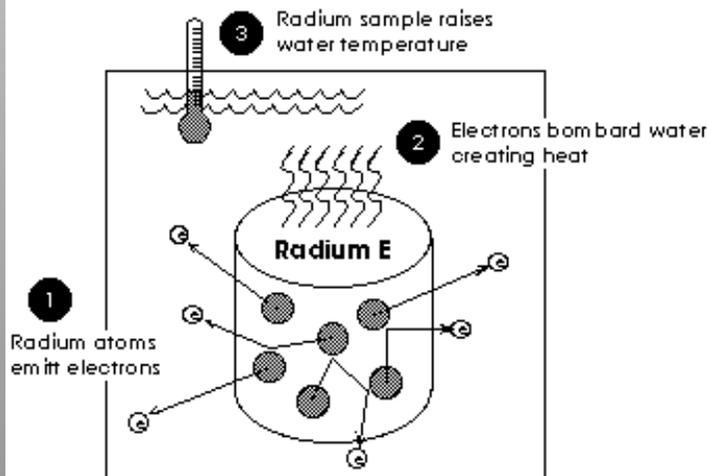
Aucun rayon γ compensateur n'est émis avec chaque particule β

(Les γ seront visibles dans le calorimètre, par conséquent la chaleur déposée dans le calorimètre sera égale à l'énergie maximale)

L'expérience: Chaleur par désintégration = 344,000 Volts \pm 10%

Très bon accord avec l'énergie moyenne du spectre β

The Original Radium E Experiment



(${}^{210}\text{Bi}$)

Vers une solution du problème:

Niel Bohr (1885 - 1962)



« L'énergie n'est conservée que statistiquement »

Bohr 1930: "At the present stage of atomic theory we have no argument, either empirical or theoretical, for upholding the the energy principle in β -ray disintegrations"

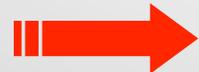
Wolfgang Pauli (1900 - 1958)



Une lettre très célèbre...

« Émission d'une particule neutre et légère »

Problème du spin et de la parité dans le model ou le noyau est composé de protons et électrons

 « anomalie de l'azote »

Dans ce model, la parité du numéro de la charge détermine la symétrie du noyau

Exemple pour N: $A = 14, Z = 7$ ou Li: $A = 6, Z = 3$

Dans le model proton + électron le spin sera $1/2$ (statistique de Fermi)

 Les expériences de R. Kronig, W. Heitler et G. Herzberg
(spectroscopie des lignes)

N et Li ont spin = 1

Statistique de Bose

 **Idée: le noyau est composé de protons et une autre particule neutre**

Spin du neutrino:

Le spin du noyau est lié au nombre de ses nucléons (A)



Une désintégration β ne change pas le nombre de nucléons



Ne change pas le caractère entier ou fractionnaire du spin

Le spin du noyau fils devrait être du même type que celui du noyau père

On sait que le spin de l'électron est $1/2$



Cela impose un spin $1/2$ au neutrino

Exemple: noyau émetteur avec $s = 7/2$ avant la désintégration \rightarrow **spin fractionnaire**



Après la désintégration son spin sera $s = 6/2 = 3 \rightarrow$ **spin entier**



Il faut l'émission de une particule avec $s = 1/2$ pour retrouver le spin fractionnaire du départ

$$\frac{7}{2} - \left(\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} \right)$$

4th December 1930

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

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

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

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

Your humble servant
W. Pauli

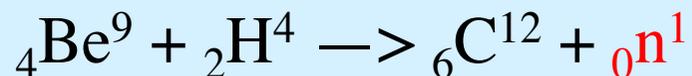
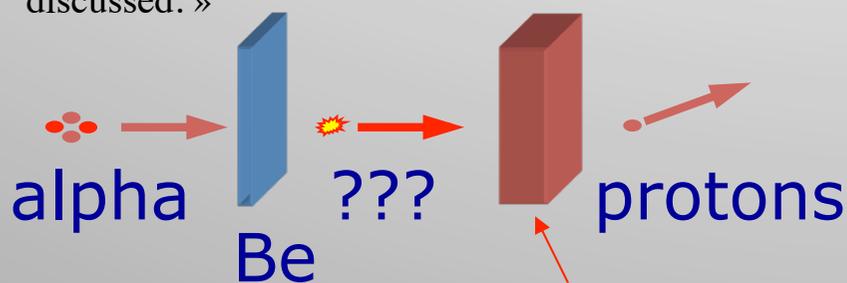
(CERN, Pauli archives)

1932: Chadwick découvre le Neutron:

The Existence of a Neutron

By J. Chadwick, F.R.S., Proc. Roy. Soc., A, 136, p. 692-708, (Received May 10, 1932)

« The properties of the penetrating radiation emitted from beryllium (and boron) when bombarded by the α -particles of polonium, have been examined. It is concluded that the radiation consists, not of quanta as hitherto supposed, but of neutrons, particles of mass 1, and charge 0. Evidence is given to show that the mass of the neutron is probably between 1.005 and 1.008. This, suggests that the neutron consists of a proton and an \acute{e} lectron in close combination, the binding energy being about 1 to 2 $\times 10^6$ \acute{e} lectron volts. From experiments on the passage of the neutrons through matter the frequency of their collisions with atomic nuclei and with electrons is discussed. »



- Les protons éjectés de la cible ont de grandes énergies (5,7 MeV)
- Pour produire des protons avec une telle énergie, des γ de 55 MeV seront nécessaires
- Expérimentalement les γ de cette énergie sont pas observés

Chadwick propose que cette radiation est composée de particules lourdes $\approx m_p \rightarrow$ large transfert d'énergie et neutres \rightarrow pénétration

Comment trancher?

1933 (Solvay conférence à Bruxelles):

Ellis & W. J. Henderson ont mesuré une coupure nette du spectre β

 Bilan énergétique compatible avec l'émission d'une ou plusieurs particules neutres

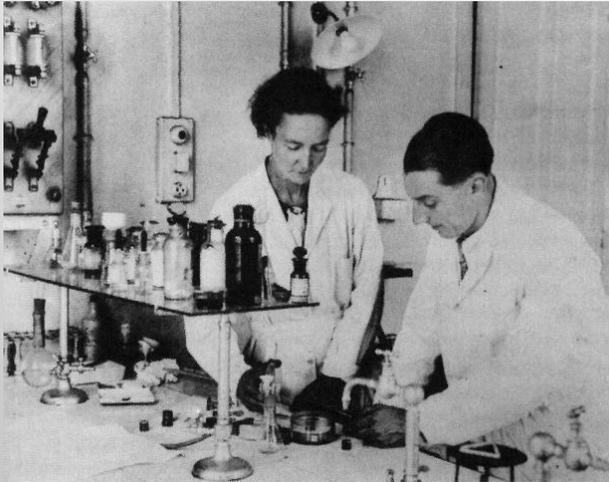
(Si il s'agit d'une distribution poissonienne (avec queue vers infini), l'hypothèse de perte d'énergie par des procès secondaires (L. Meitner) était favorisée.)

Pauli: conservation de l'énergie: la somme d'énergie de l'électron et de la particule neutre = énergie limite du spectre β $E_{\max} = E_{\beta} + m_0c^2 + E_{\nu} + m_{\nu}c^2$

+ Bilans en impulsion: $p_e \neq p_N$  Mesure du recul du noyau plus tard

+ F. Perrin montre que la masse du neutrino doit être beaucoup plus petite que celle de l'électron (forme du spectre proche E_{\max})

1933: Irene et Frederic Joliot-Curie



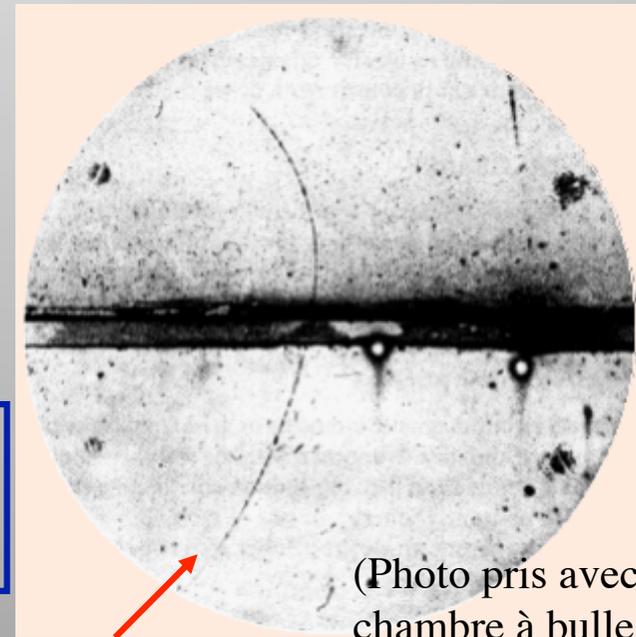
Découvert la radioactivité bêta plus
 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$

1933: Carl David Anderson



1905 - 1991

Découvert du positron dans
les gerbes générées par les
rayons cosmiques



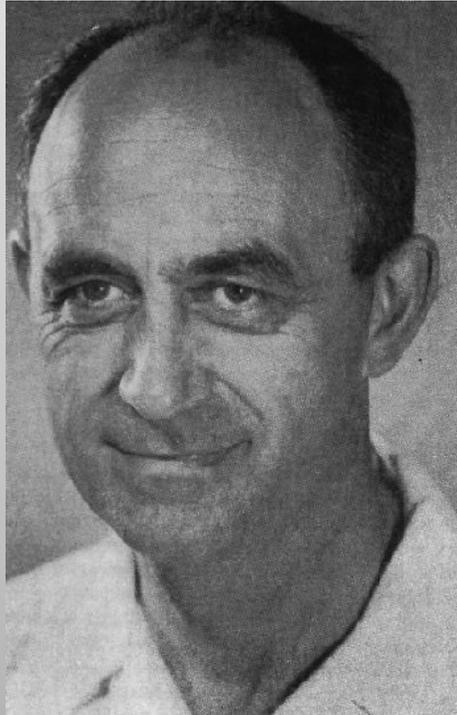
(Photo pris avec une
chambre à bulles)

positron

C.D. Anderson, Physical Review 43, 491 (1933).

La théorie de Fermi - 1933

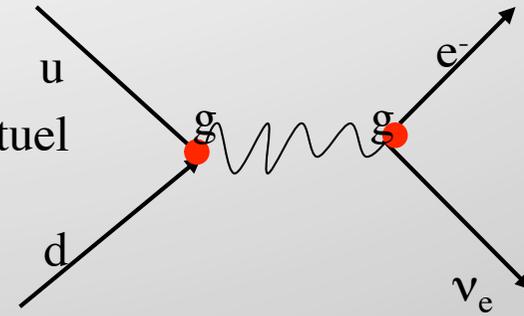
Enrico Fermi



1901 - 1954



Exchange d'un boson W virtuel

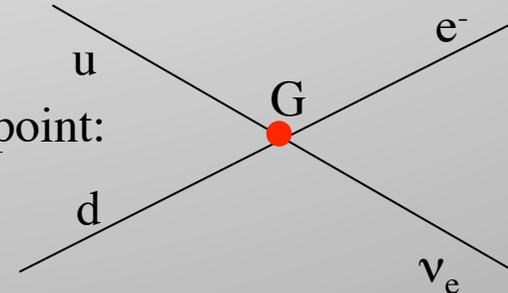


Transfert d'impulsion $q^2 \ll M_W^2$



Interaction effective dans un point:

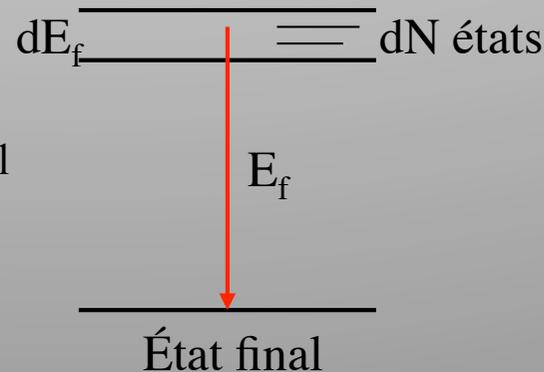
avec $G = g^2 / M_W^2$



Probabilité de transition:

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} G^2 |M|^2 \frac{dN}{dE_f}, \text{ avec } E_f = \text{énergie d'état final}$$

$$\frac{dN}{dE_f} = \text{densité des états finales}$$



1934: Gian-carlo Wick:



1909 — 1992

Modification de la théorie de Fermi de la désintégration β :



En plus la désintégration en positron et la capture électronique

1937: LUIS WALTER ALVAREZ



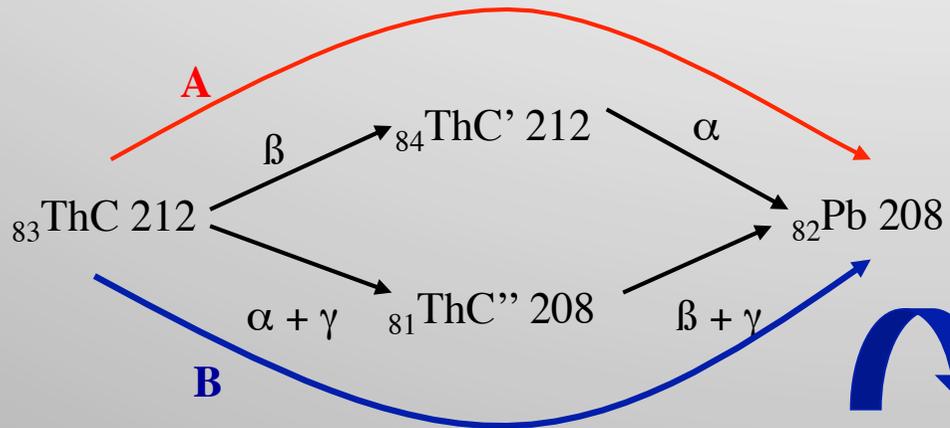
1911 - 1988

Mise en évidence de la capture électronique par expérience



Tout les spectres observés ont la même allure: un spectre continu avec une énergie maximale correspond à l'énergie disponible due à la différence de masse entre noyau émetteur et noyau résultant.

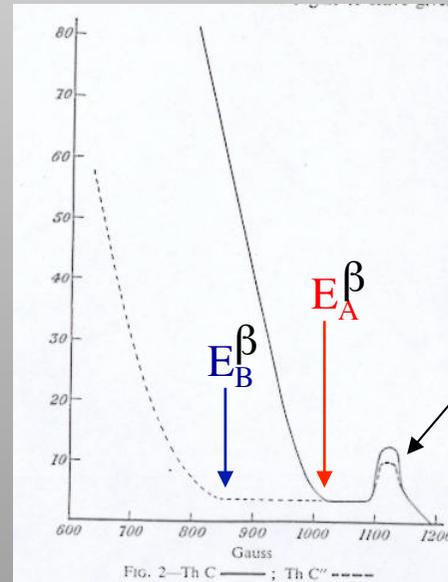
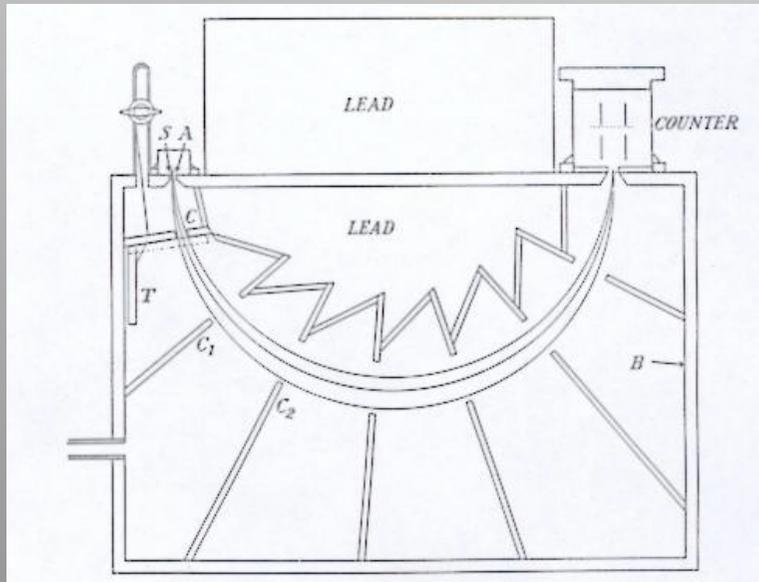
Exemple: les mesures de Beck (1933) et Henderson (1934)



Énergie pour A: $2,25 + 8,95 = 11,20 \text{ MeV}$

Énergie pour B: $(6,20 + 2,62) + (1,79 + 0,582) = 11,19 \text{ MeV}$

Le bilan énergétique n'est exact que si l'on prend E_{max} pour les énergie de désintégration β



γ d'une autre voie de désintégration

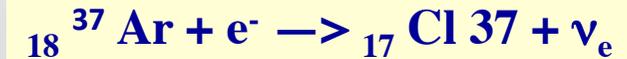
(W. J. Henderson, Proc. Roy. Soc. A, 147, 572, 1934)

Le recul du noyau lors de la capture électronique:

Pour une désintégration β^+ l'énergie disponible doit être $> 2m_0c^2 = 1,02 \text{ MeV}$

Lorsque l'énergie disponible n'est pas suffisante le noyau instable peut capturer un e^-

Exemple: l'expérience de Rodeback et Allen en 1951:



$$\Delta(\text{Ar}) = -30,9479, \Delta(\text{Cl}) = -31,76176$$

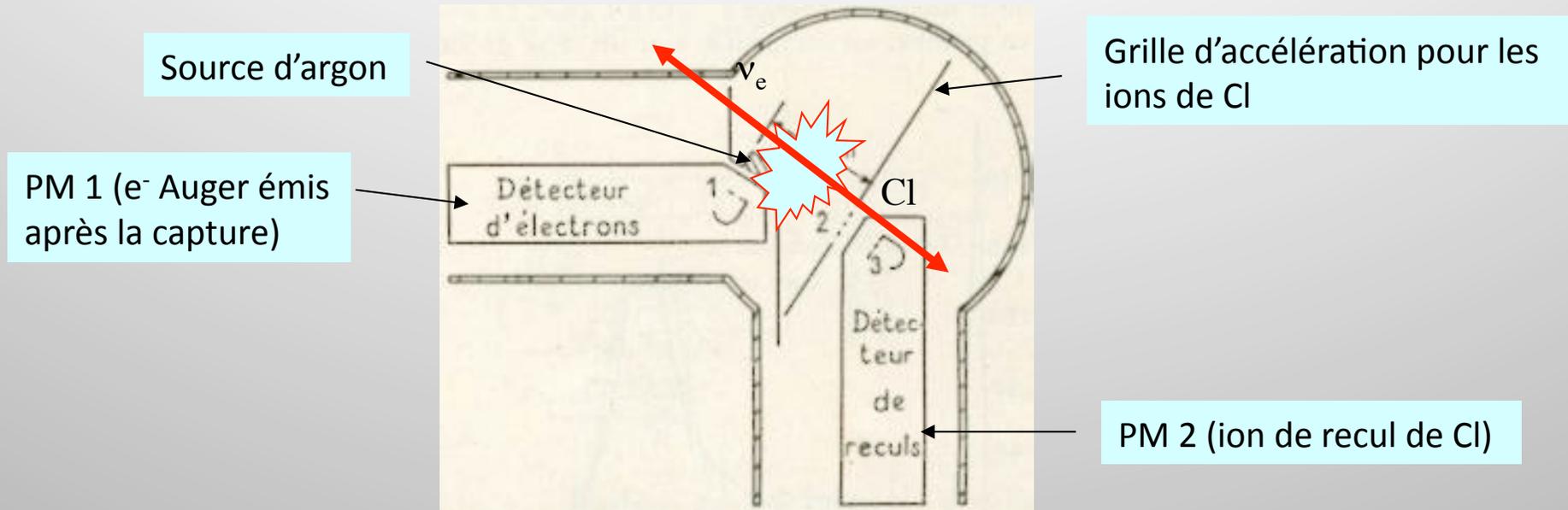
$$E_{\text{max}} = \Delta(\text{Cl}) - \Delta(\text{Ar}) = 0,8138 \text{ MeV}$$

$$T_{\text{recul}} = \frac{1}{2} M_{\text{Cl}} v^2 = \frac{p_{\text{Cl}}^2}{2M_{\text{Cl}}}, \text{ pour } m_{\nu} = 0 \Rightarrow p_{\text{Cl}} = p_{\nu} = \frac{E_{\nu}}{c}$$

$$\Rightarrow T_{\text{recul}} = \frac{(0,8138 \times 10^6)^2}{2 \times 35,45 \times 931,494 \times 10^6} = \underline{\underline{10,03 \text{ eV}}}$$

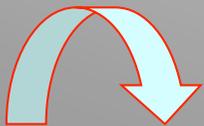
(1u = 931,494 MeV)

Mesure de temps de vol de Cl en coïncidence avec l'électron Auger (émis lors de la capture)



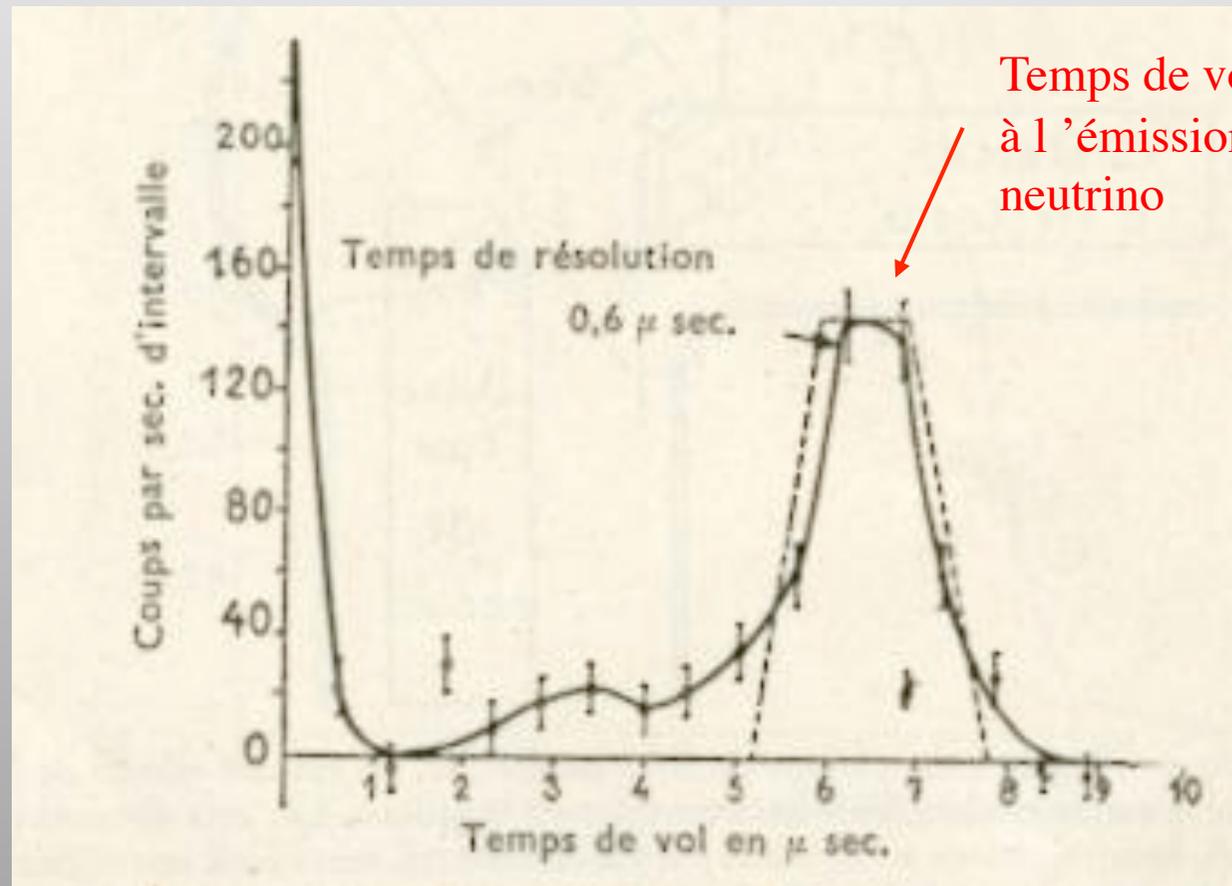
$$v = \sqrt{\frac{2 \times T_{Cl}}{m_{Cl}}} = \sqrt{\frac{2 \times 10 \text{ eV} \times 1,602 \times 10^{-19} \text{ kgm}^2}{35,45 \times 931,494 \times 10^6 \text{ eV} \times \text{s}^2 \times 1,782 \times 10^{-36} \text{ kg}}}$$

$$v = 7,38 \times 10^3 \text{ ms}^{-1}$$



t pour 6 cm = 8,13 μs

Résultat:

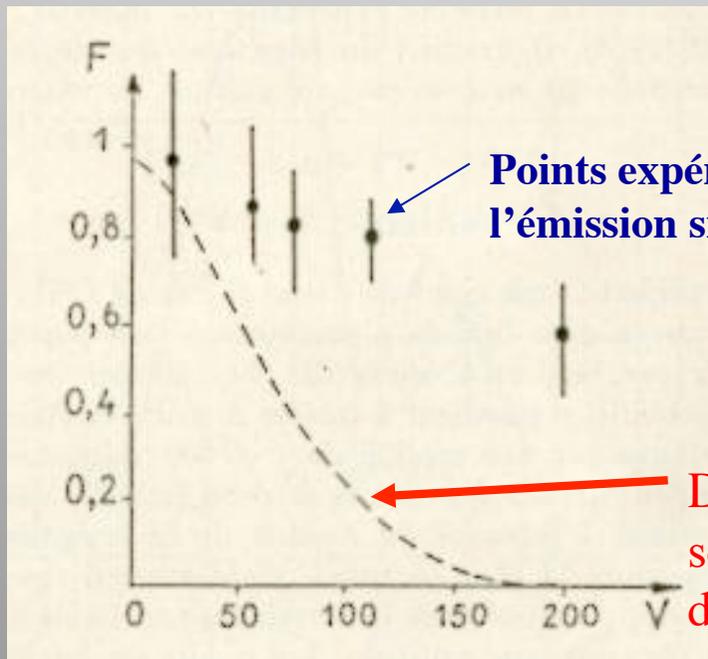


(Rodeback et Allen,
Phys. Rev. 81, 318, 1951)

Le recul du noyau lors des émissions β

1936: Première expérience par A. I. Leipunski:

- Carbone 11 radioactif - condensé sur une surface métallique
- Surface à un potentiel $+V$ (retardateur par rapport à une grille)
- Atomes de recul d'énergie supérieure au potentiel V passaient à travers la grille
- Accélérés par -5000 V
- Comptage des électrons arrachés par l'impact des noyaux
- Résultat:

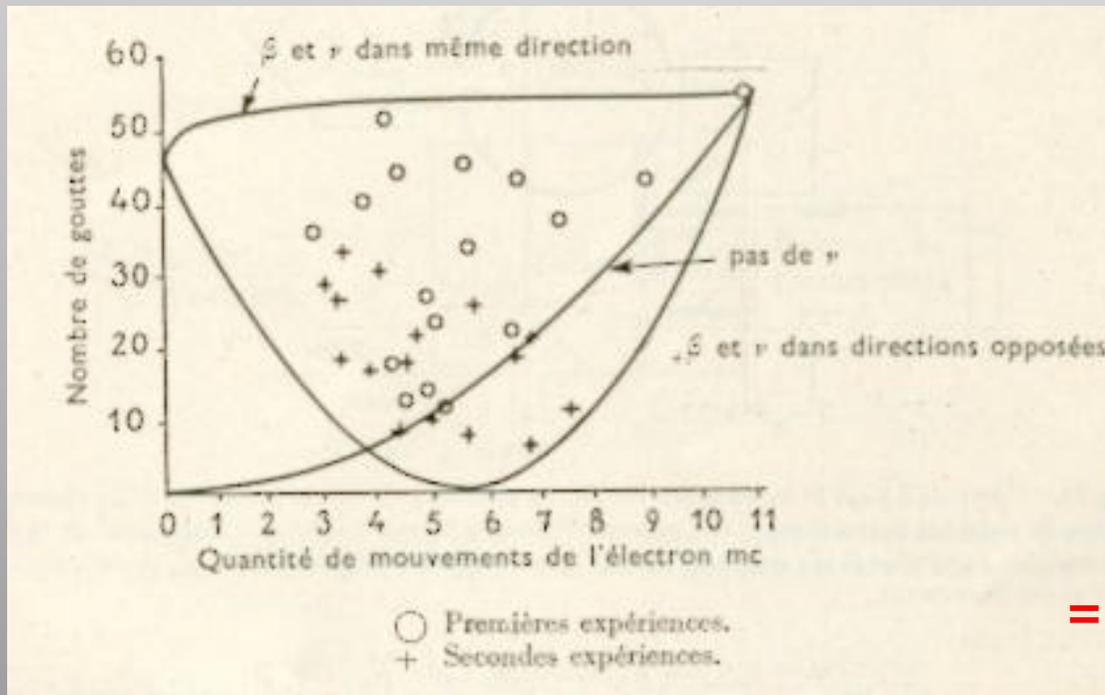


Points expérimentaux (montrent un recul supplémentaire dû à l'émission simultanée d'un neutrino et d'un électron)

Distribution prévue dans le cas où le recul serait dû uniquement à l'émission d'un électron sans neutrino

1939: Crane et Halpern - expérience avec chlore 38:

- Étude du recul lors de la désintégration de Cl^{38}
- Cl^{38} sous forme de dichloréthylène dans une chambre de Wilson (chambre à brouillard)
- L'énergie du recul est donnée par la mesure des gouttelettes sur le trajet des ions de recul



= Cinématique à 3 corps

Les premiers pas vers une détection directe:

Le moment magnétique du neutrino et son pouvoir ionisant

1935: Bethe a calculé le nombre de collisions élastiques ν e- avec un neutrino de moment magnétique μ_ν

Par cm de parcours:
$$I = \pi \left(\frac{e^2}{m_e c^2} \right)^2 N Z \text{Log} \left(137 \times Z^{-\frac{1}{2}} \right) \mu_\nu^2, \text{ avec } N = \frac{\text{atoms}}{\text{cm}^3}$$

Pour l'air NTP on aurait $I = 103 \mu_\nu^2$

En 1935 Nahmias: 5g de radium, protégée par 91 cm de Pb,
mesurent l'ionisation dans un compteur de Geiger

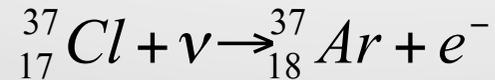
moins d'une paire d'ions sur 300000 km d'air NTP

$$103 \mu_\nu^2 < \frac{1}{3 \times 10^5} \Rightarrow \mu_\nu < \frac{1}{5600} \times \mu_B \Rightarrow \sigma < 10^{-31} \text{ cm}^2 \text{ par e}^-$$

En 1954 Cowan, Reines et Harrison avec un réacteur: $\mu_\nu < 10^{-7} \times \mu_B \Rightarrow \sigma < 10^{-42} \text{ cm}^2 \text{ par e}^-$

Le processus β inverse et le neutrino type $Z \rightarrow (Z+1) + e^- + \nu$

1955 R. Davis tente de mettre en évidence la formation d'argon 37 par la réaction:



(expérience suggérée par Pontecorvo 1948 et mise au point par Luis Alvarez en 1949)

Expérience réalisée auprès du réacteur nucléaire de Brookhaven = source d'anti-neutrinos

3900 litres de CCl_4

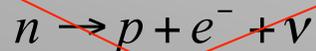
Argon 37 est radioactif par C.E. avec $\tau = 34$ jours

—> si la réaction existe - accumuler dans une grande masse de chlore irradiée pendant ≈ 100 jours
extraire l'Ar et mesurer l'activité avec un compteur de Geiger

Résultats: - dans le temps on pensait que les **réacteurs produisent des neutrinos = faux - anti-neutrinos**

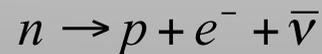
- discussion sur la nature du neutrino - Majorana ou Dirac

- le résultat négatif ne montre par la non-existence du neutrino mais donne la preuve que les neutrinos et les anti-neutrinos subissent différentes réactions



Fausse hypothèse

(pas de conservation
du nombre leptonique)



Réaction possible

Mais pas de source de neutrino
dans le temps



Réaction β inverse

1951: Conversation entre Fred Reines et Clyde Cowan:
(de mémoire de Reines)

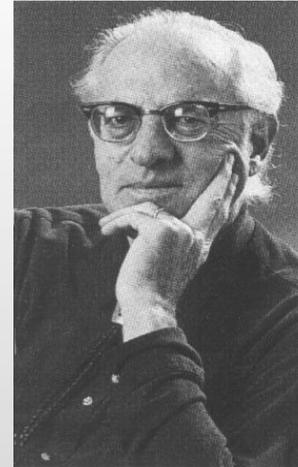
R: "Let's do a challenging problem."

C: "Let's work on positronium"

R: "No, positronium is a very good thing but Deutsch has it all sewn-up. "...Let's work on the neutrino"

C: "GREAT IDEA"

Reines: "He knew as little about the neutrino as I did but he was a good experimentalist with a sense of derring do."



1918-1998

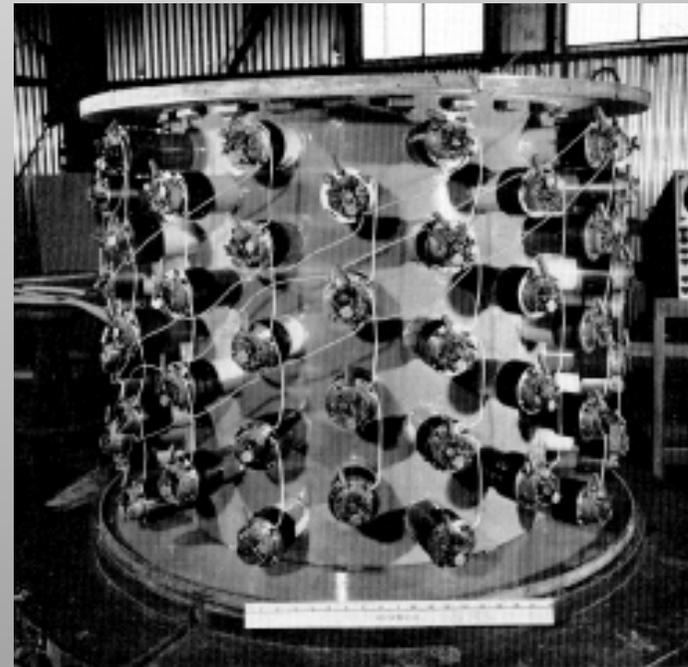


1919-1974

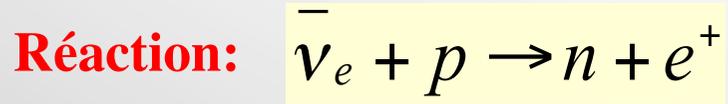


"Poltergeist"

Prix Nobel pour Reines en 1995
(Cowan décédé)



"Herr Auge"^{27/62}

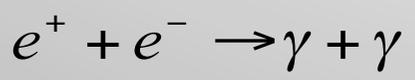


Seuil de la réaction = 1,8 MeV

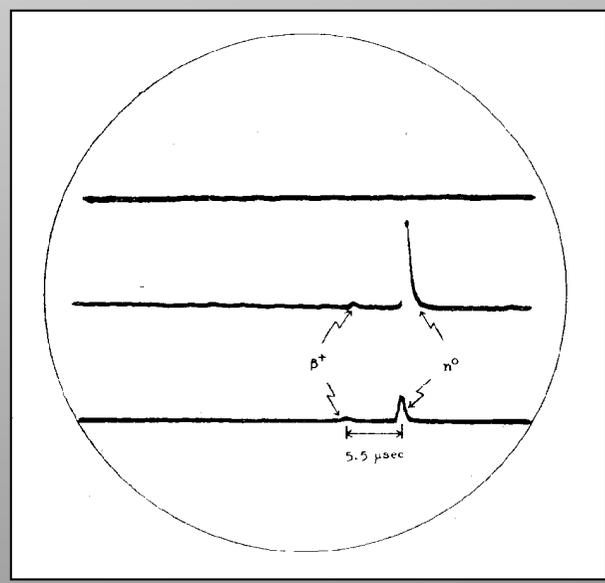
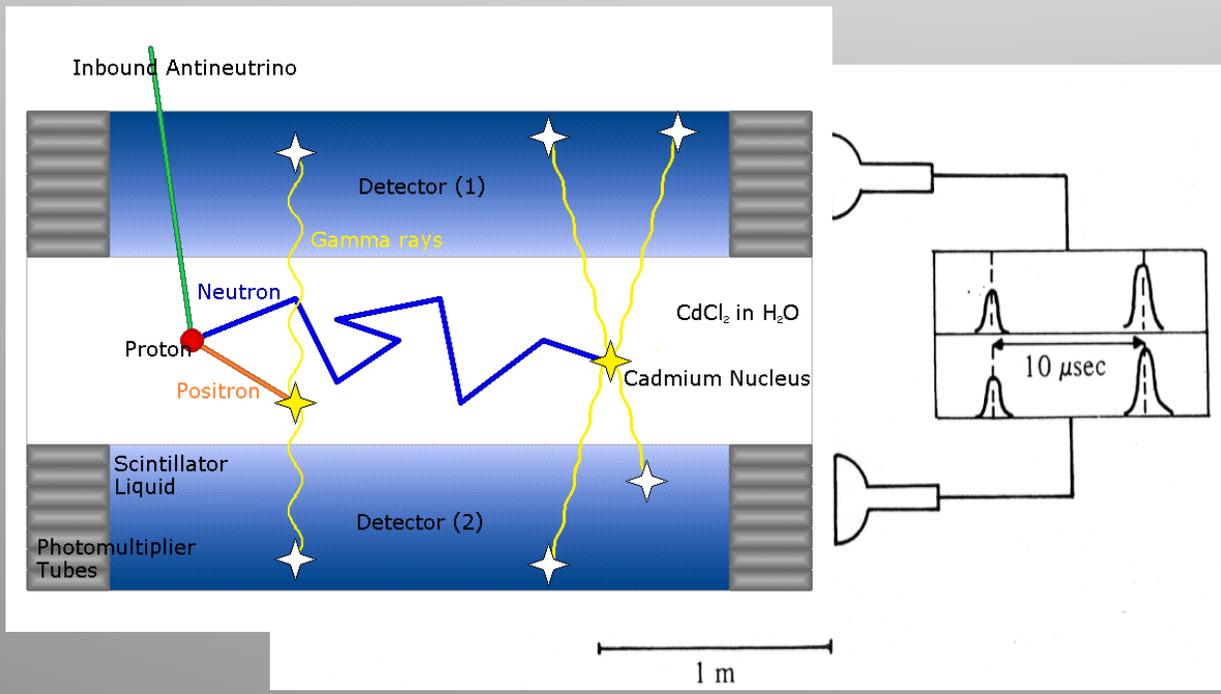
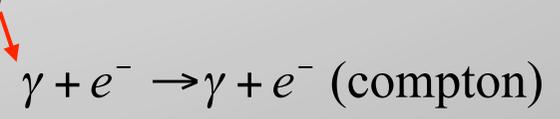
Sources possibles: - bombe nucléaire (Reines est de Los Alamos...)

- réacteur d 'Hanford - trop bruit de fond dû aux rayons cosmiques
- expérience avec le réacteur de Savannah River (12m souterrain), 250 kg H₂O + CdCl₂

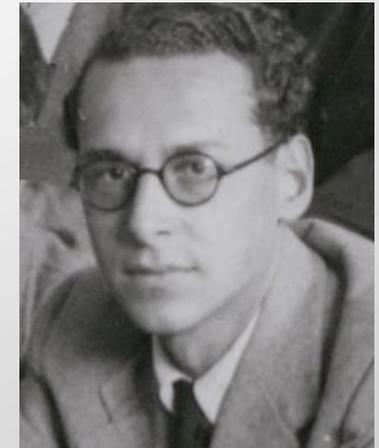
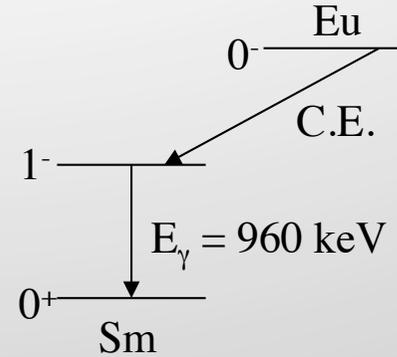
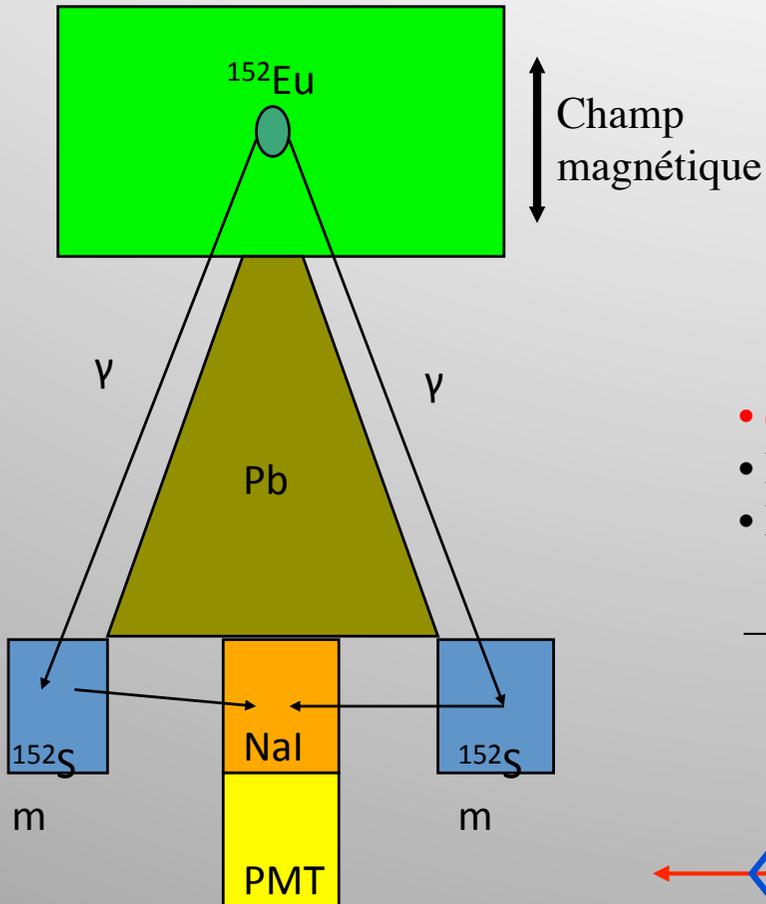
1. Réaction instantanée:



2. Réaction retardée:



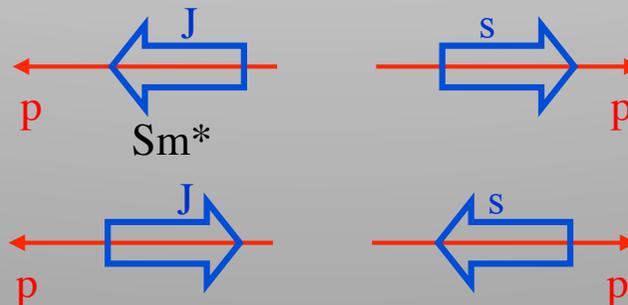
1958: L'hélicité du neutrino: L'expérience de Goldhaber:



Maurice Goldhaber
1911 -

- $e^- (1/2) + \text{Eu}(0) \rightarrow \nu (1/2) + \text{Sm}^* (1)$,
- Le moment cinétique du système initial = $1/2$
- La conservation de l'impulsion impose au Sm^* une impulsion opposée à celle du neutrino
 \rightarrow le spin du Sm^* doit être opposé de spin du neutrino pour retrouver le moment cinétique du système final = $1/2$

Deux possibilités:



Neutrino droit

Neutrino gauche

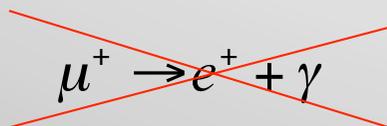


Le Sm^* à la même hélicité que le neutrino \rightarrow reste à déterminer la polarisation de Sm^*

Découvert du neutrino muonique

1962: Le neutrino muonique:

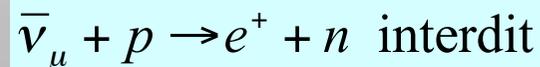
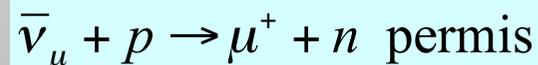
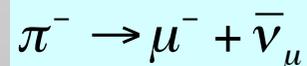
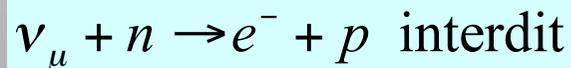
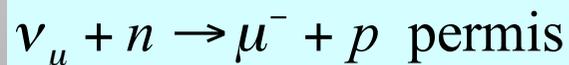
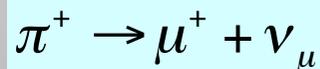
Les chercheurs se sont posés la question d'identité ou non-identité de ν_e et ν_μ , car certaines réactions n'étaient pas observées



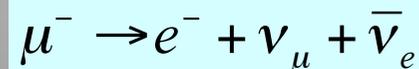
Conservation du nombre leptonique



1962: Preuve de l'existence du ν_μ au laboratoire de Brookhaven



➡ Par conséquent les deux neutrinos de la désintégration du π sont différents

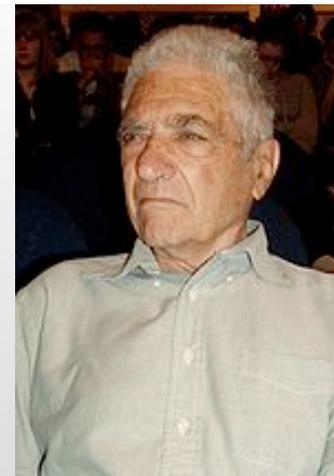




Leon M. Lederman
1922-

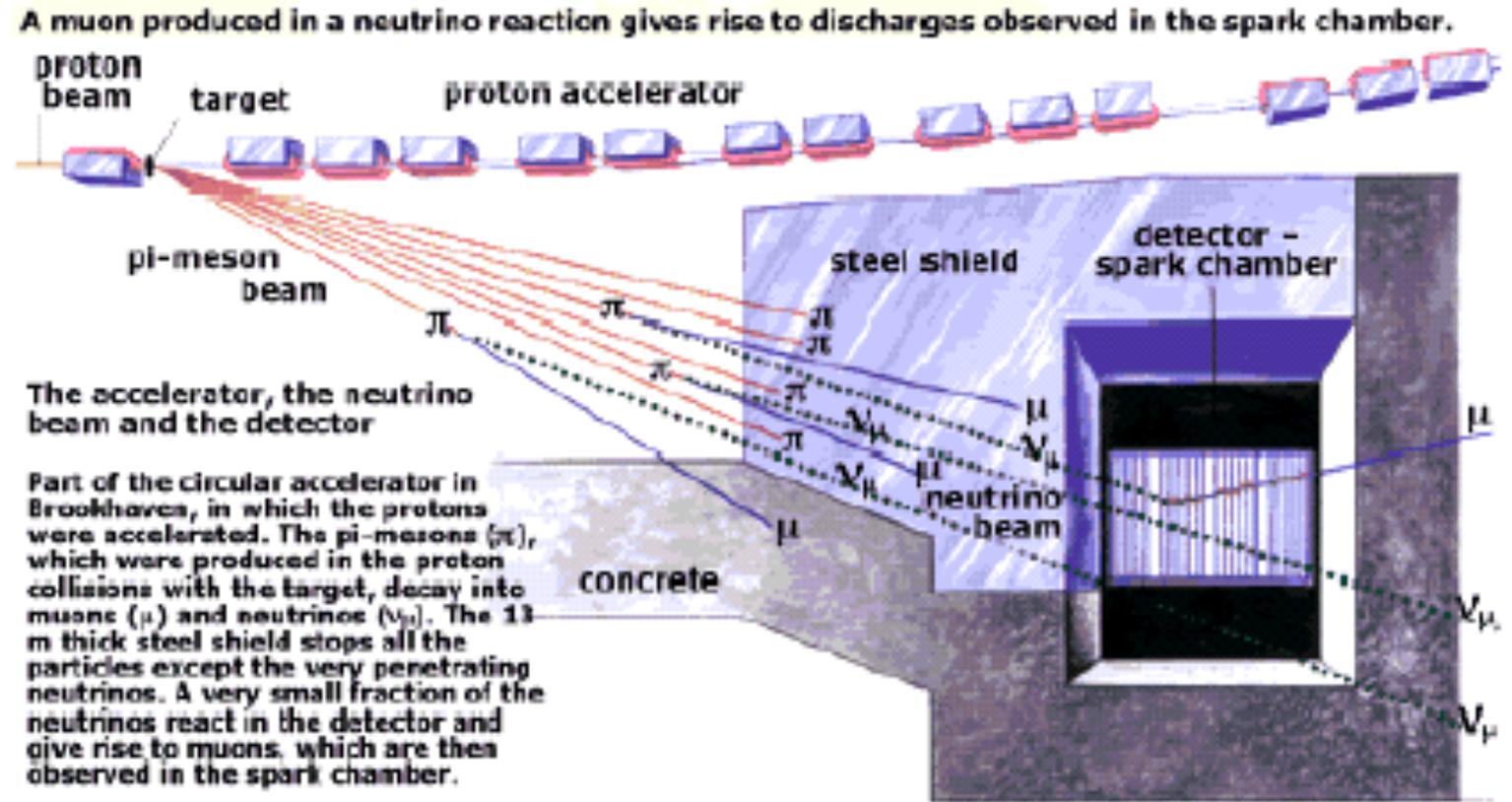


Melvin Schwartz
1932-2006



Jack Steinberger
1921-

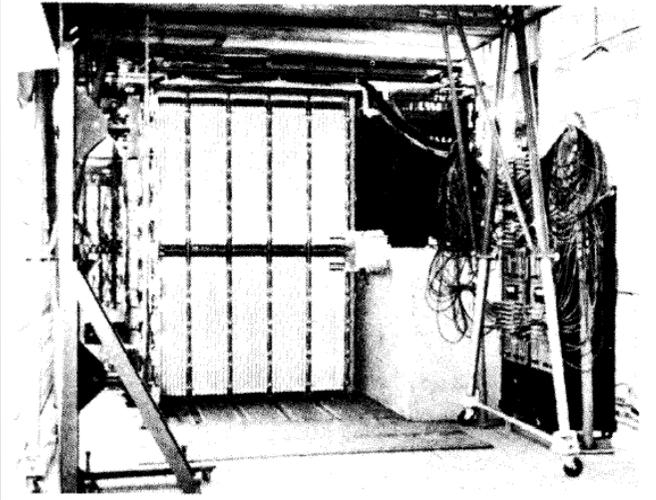
15 GeV Proton beam:
(2-4) $\times 10^{11}$ protons/pulse
3000 pulses/hr



The accelerator, the neutrino beam and the detector

Part of the circular accelerator in Brookhaven, in which the protons were accelerated. The pi-mesons (π), which were produced in the proton collisions with the target, decay into muons (μ) and neutrinos (ν_μ). The 13 m thick steel shield stops all the particles except the very penetrating neutrinos. A very small fraction of the neutrinos react in the detector and give rise to muons, which are then observed in the spark chamber.

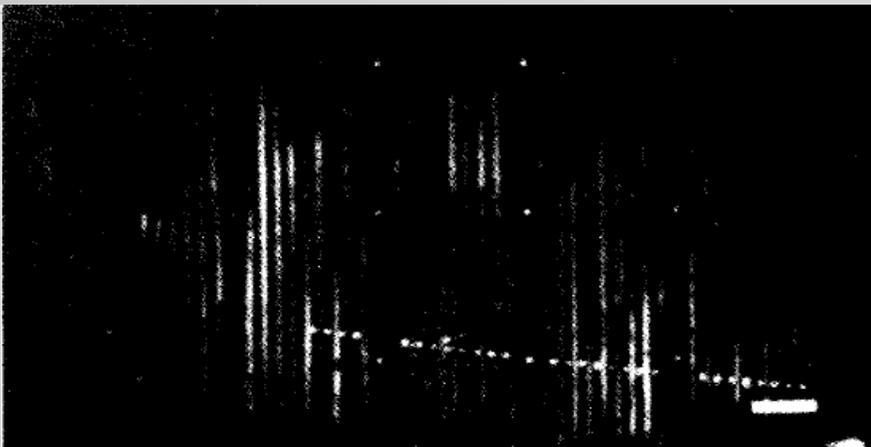
Based on a drawing in Scientific American, March 1963.



Ten 1T modules each of nine Al plates 44''x44''x1'' separated by 3/8'' lucite spacers

50 anticoincidence counters covered front top and rear of assembly

40 triggering counters between modules and at end of assembly

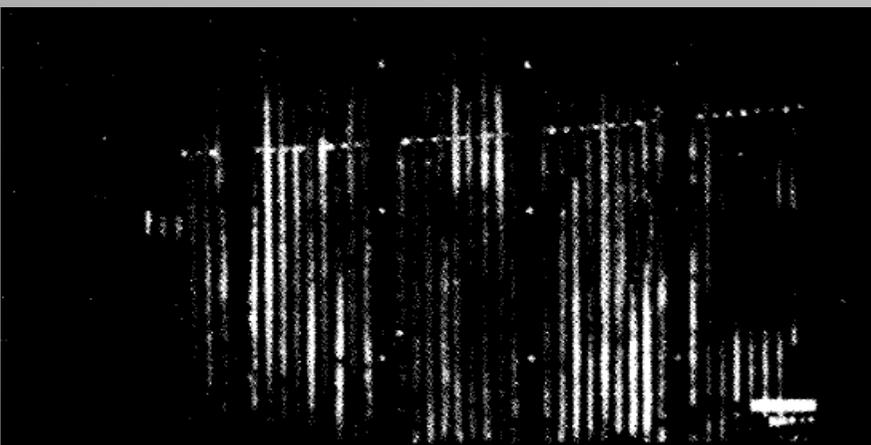


34 événements avec un seul μ
Bruit de fond attendu = 5

Les particules sont bien des μ ?

➡ Traversent 820 cm d 'Al sans interaction!

➡ Si π, λ_{π} (Al) pour 400 MeV = 100 cm



$$\nu_{\mu} \neq \nu_{e}$$



Prix Nobel 1988

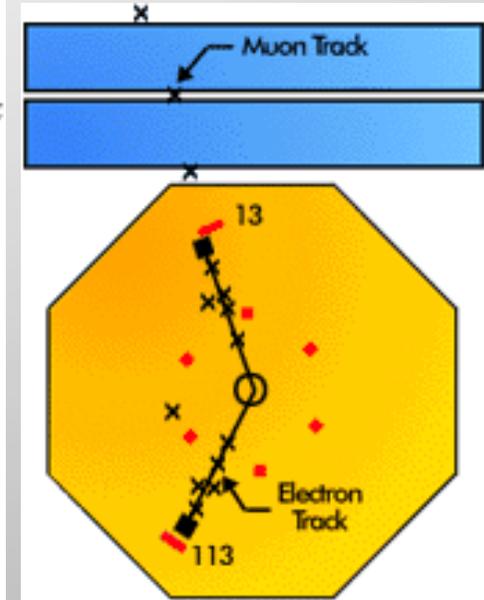
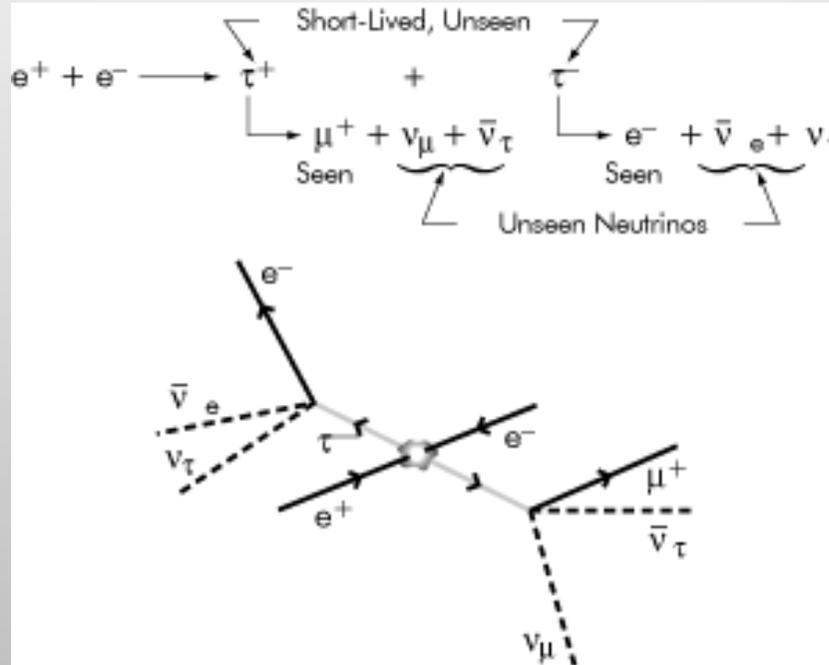
**La troisième famille de leptons
et
le neutrino tau**

1975: Martin Perl découvre le τ :

Analyse des données de la collaboration MARK I au anneau De stockage SPEAR at SLAC



Martin Perl
1927 -
Prix Nobel 1995



Recherche des événements où il y a une seule trace d'électron et une seule trace de muon dans le détecteur

Création d'une paire $\tau^+ \tau^-$ et un τ se désintègre en e^- et l'autre en μ^+

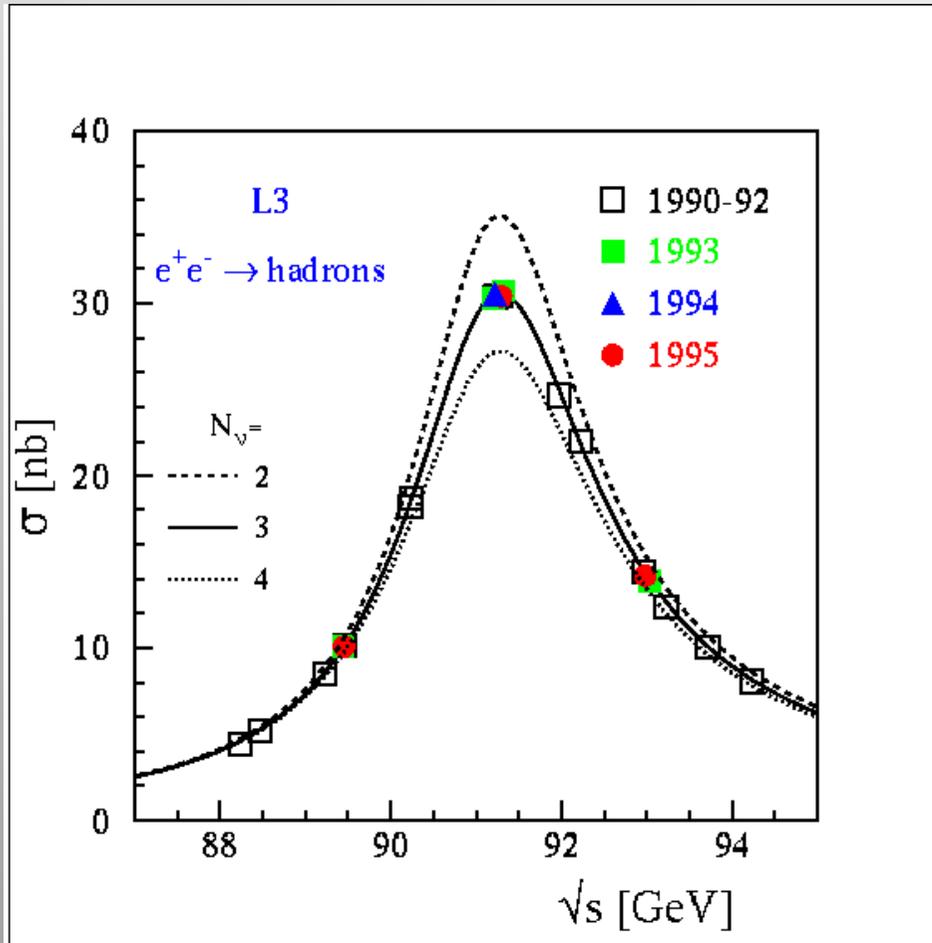
Événement type $e^+ e^- \rightarrow e + \mu + \text{énergie manquante}$ \rightarrow 24 événements trouvés (bruit de fond = 5 evts)

(M. L. Perl et al., « Evidence for Anomalous Lepton Production in $e^+ - e^-$ Annihilation », Phys. Rev. Lett., 1975)



3^e famille de leptons!!!

Résultat du LEP: 3 neutrinos légers



Mesure de la largeur « invisible » du Z:

$$\Gamma_{\text{inv}} = \Gamma_Z - \Gamma_{\text{had}} - \Gamma_{ee} - \Gamma_{\mu\mu} - \Gamma_{\tau\tau}$$

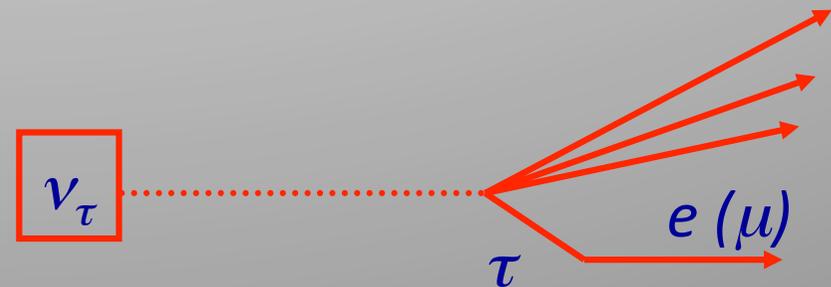
$$N_\nu = \Gamma_{\text{inv}} / \Gamma_Z^{\nu\nu}$$

$$\Gamma_Z^{\nu\nu} = 166 \text{ MeV (modèle standard)}$$

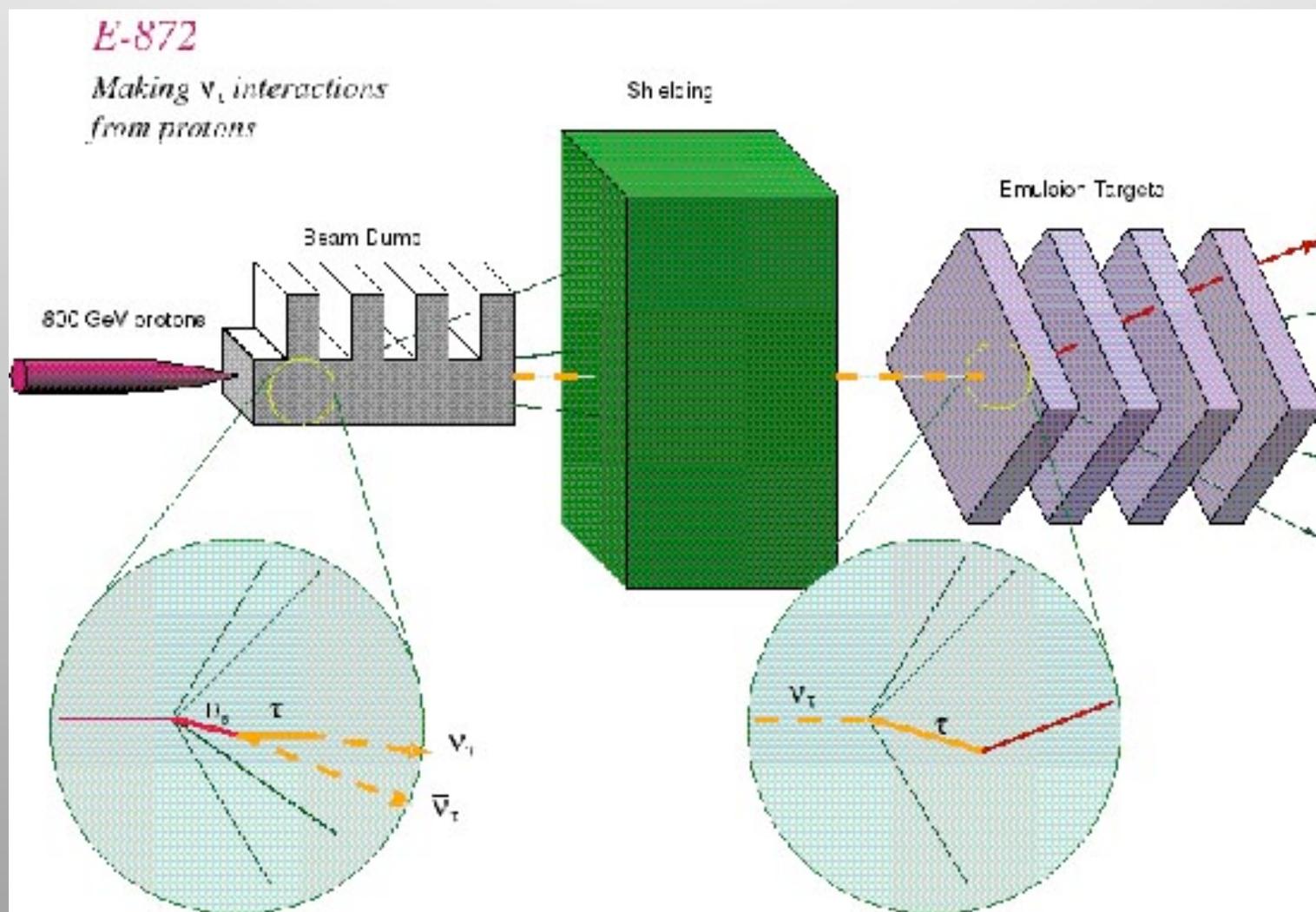
$$N_\nu = 2,96 \pm 0,14$$

4. Découverte du neutrino τ avec l'expérience DONUT

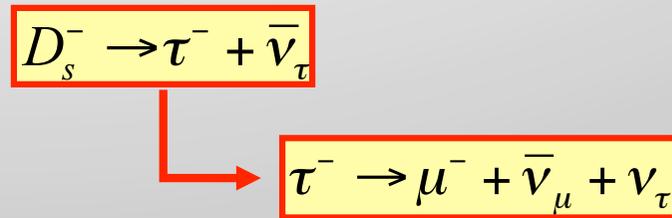
- ➔ But de l'expérience: observation des interactions du neutrino tau via le courant chargé
—> détection du lepton τ chargé
- ➔ Localisation et identification du lepton tau avec une cible en émulsion nucléaire et un spectromètre
- ➔ La probabilité de désintégration du lepton tau dans **une particule chargée est de 86%**
 $\tau \rightarrow e \nu_\tau \nu_e$ (18%) $\tau \rightarrow \mu \nu_\tau \nu_\mu$ (18%) $\tau \rightarrow h + \text{neutre}$ (50%)
- ➔ Longueur de désintégration du tau: $c\tau_\tau = 0.087$ mm —> pour les énergies de tau dans DONUT la longueur est ≈ 2 mm
- ➔ Événement type: une trace (lepton tau) + kink de désintégration avec un large p_t et énergie manquante



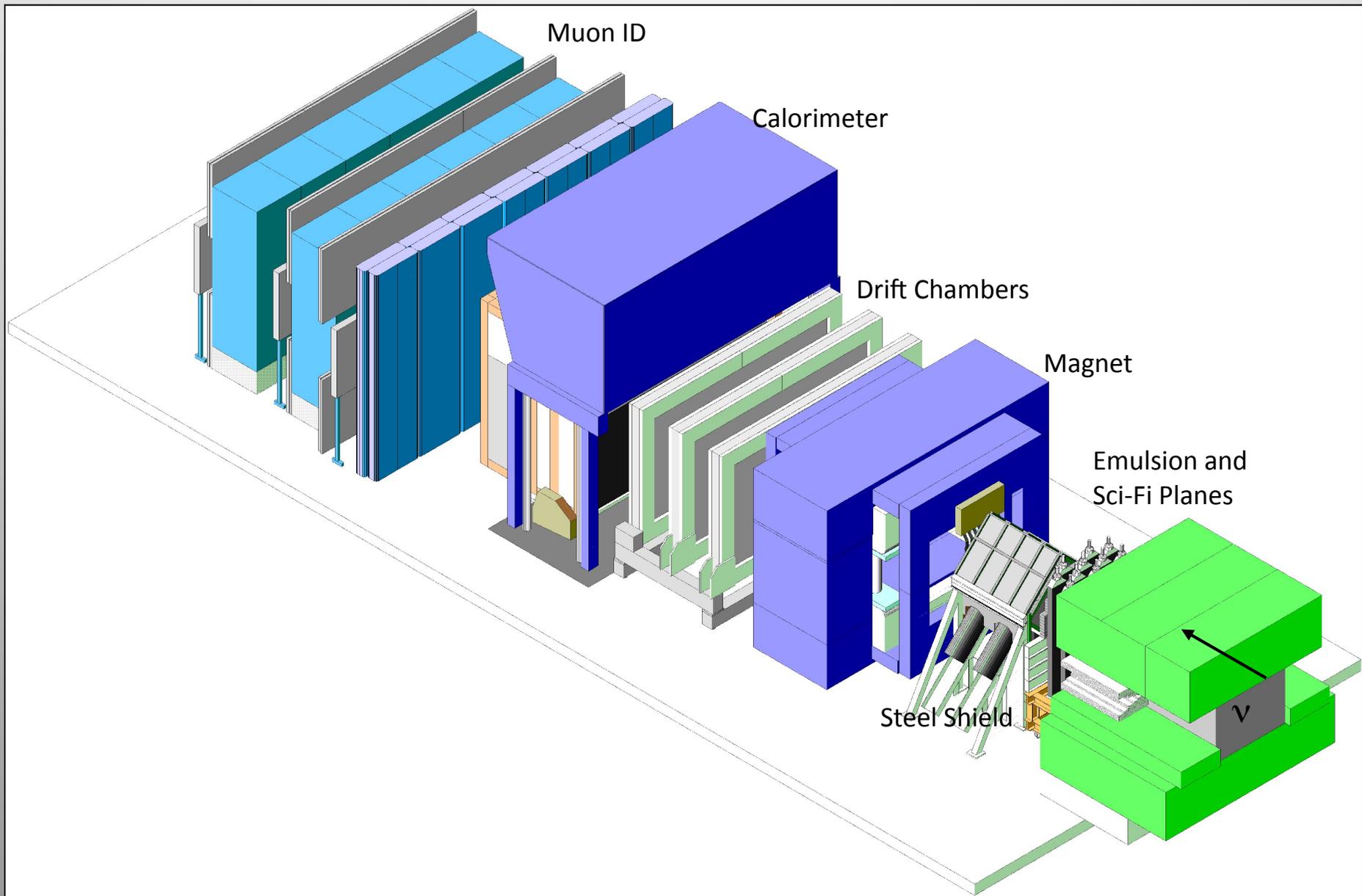
DONUT au Fermilab:



- Expérience au Tevatron du Fermilab, 800 GeV protons sur une cible de 1 m de tungstène
- L'origine des neutrinos est la désintégration des mésons charmés dans la cible
- La source primaire des neutrinos tau est la désintégration de D_s



- L'énergie moyenne des neutrinos tau = 111 GeV
- Les neutrinos tau ont été détectés dans une cible d'émulsion à une distance de 36 m de la source
- 5% des interactions détectées dans l'émulsion sont dues aux neutrinos tau, le reste est dû aux neutrinos électron et muon
- Le bruit de fond est réduit par un écran en béton, fer et plomb et un aimant



Émulsions

1947: Les premières émulsions nucléaires (Lattes *et al.*, Brown *et al.*)

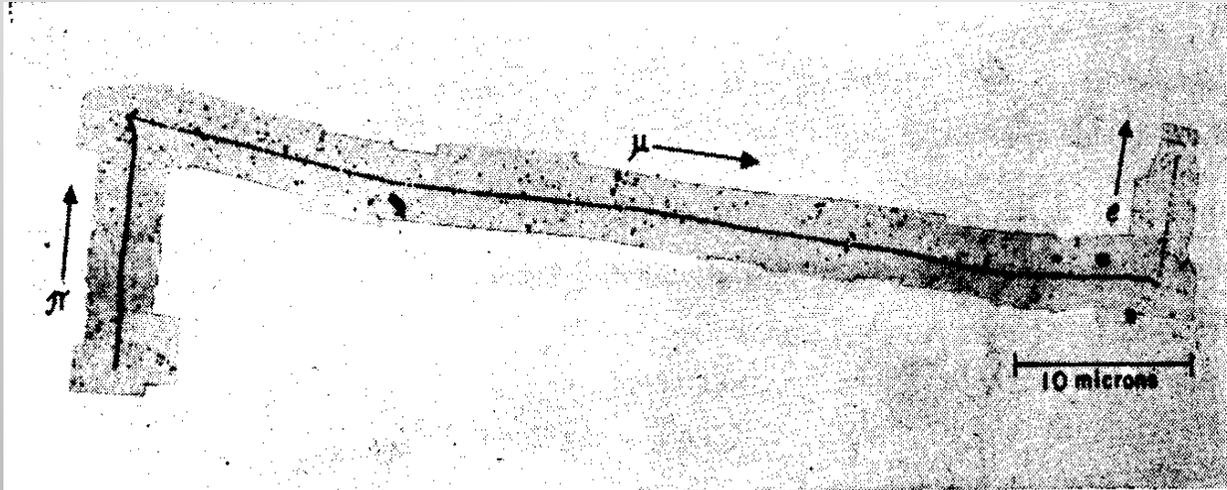
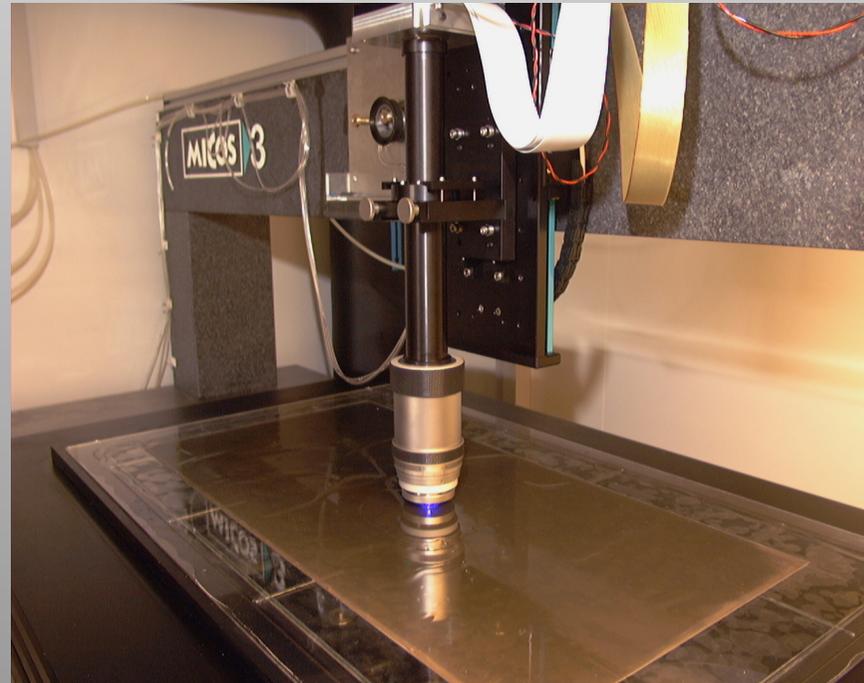


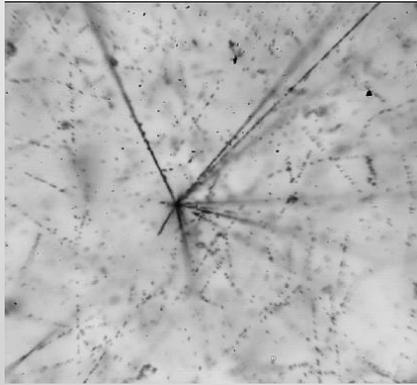
Fig. 4.8.2. Mosaic of microphotographs showing a $\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$ decay. Kodak NT4 electron-sensitive emulsion. From Brown *et al.* (BRH49.2).

Et l'analyse des données...

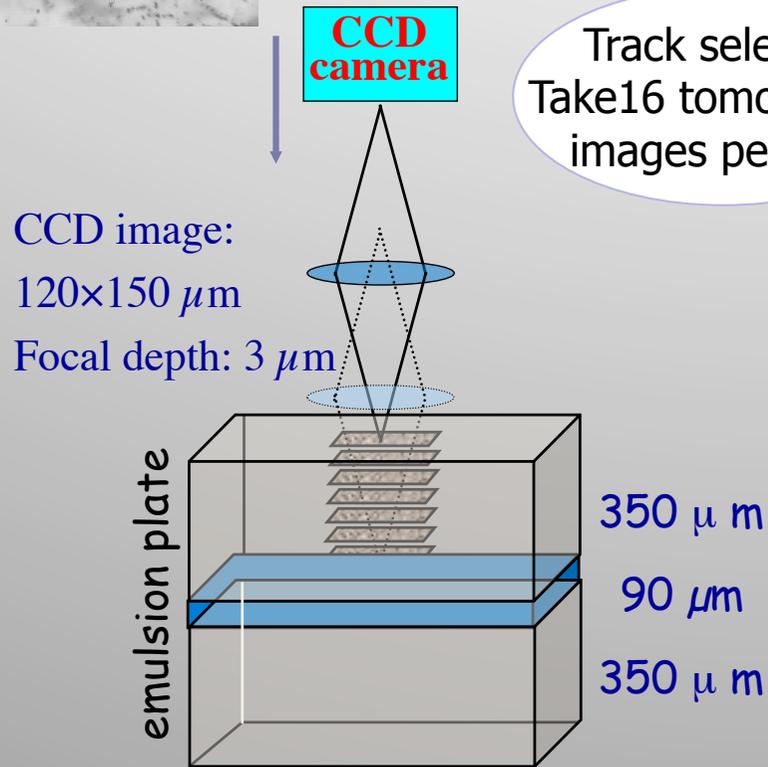


Scanning des émulsions à Nagoya au Japon:

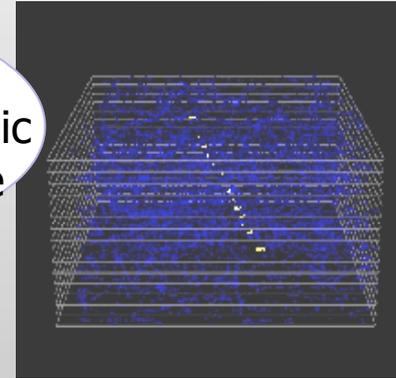




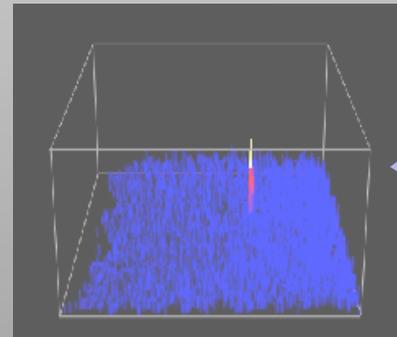
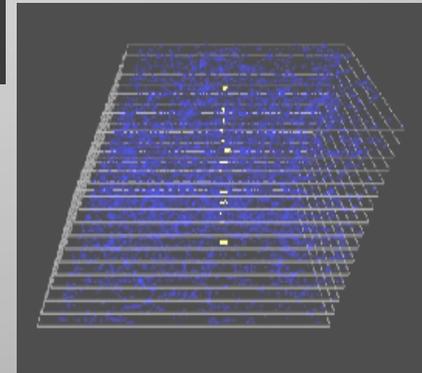
Analyse des données:



Track selector:
Take 16 tomographic
images per plate

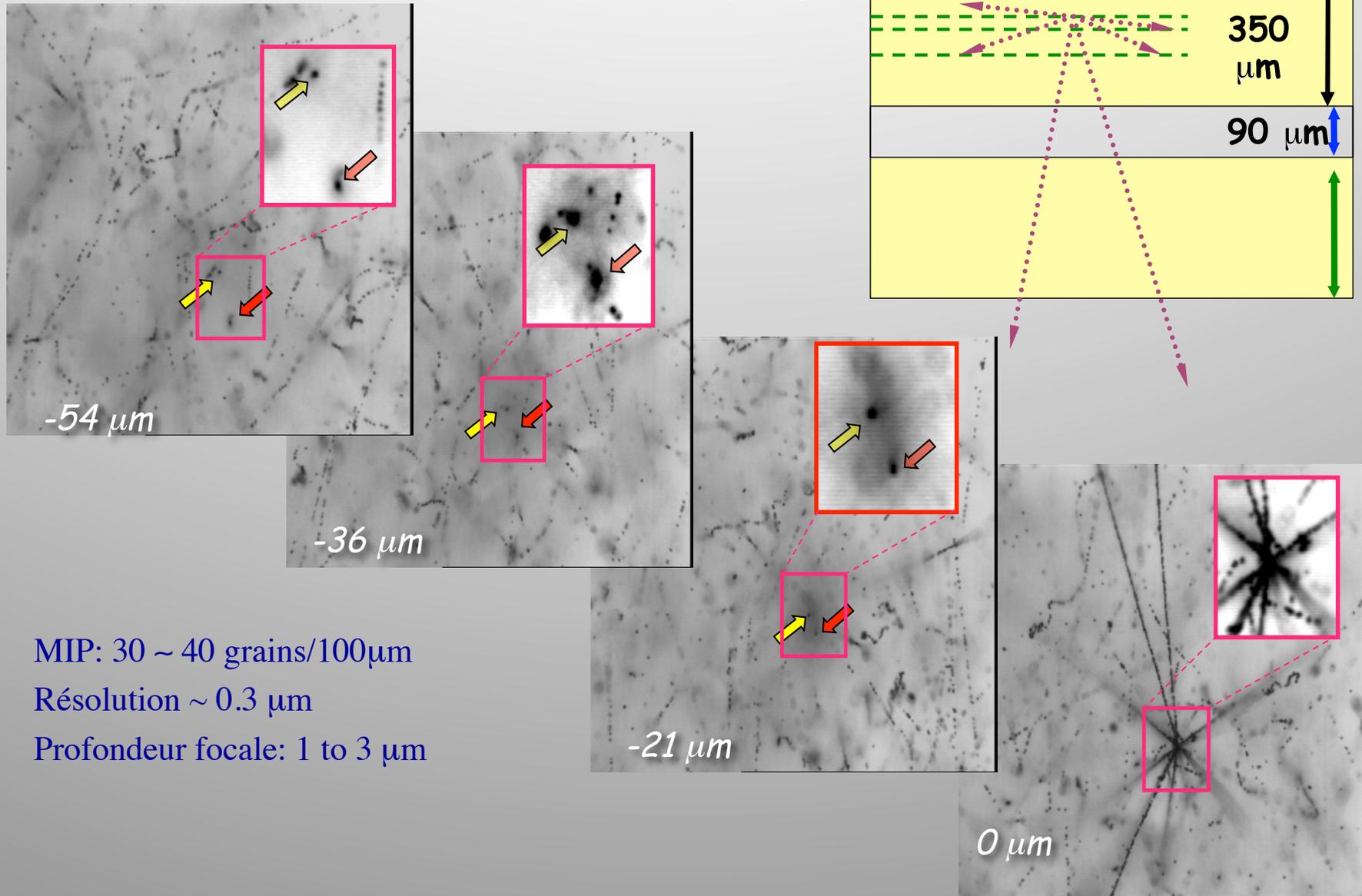


Shift each plane
by the angle given
in predictions



Sum up the ph
A track is recognized
as a peak

Émulsions (suite)



MIP: 30 ~ 40 grains/100 μm
Résolution ~ 0.3 μm
Profondeur focale: 1 to 3 μm

Step 1: Emulsion Sheets Alignment

A first plate to plate alignment allowing for relative translation of the emulsion sheets is performed by comparing the pattern of segments in a plate with the corresponding pattern in the next plate. Total-Scan reconstruction with about 6000 segments.

Step 2: Track Reconstruction

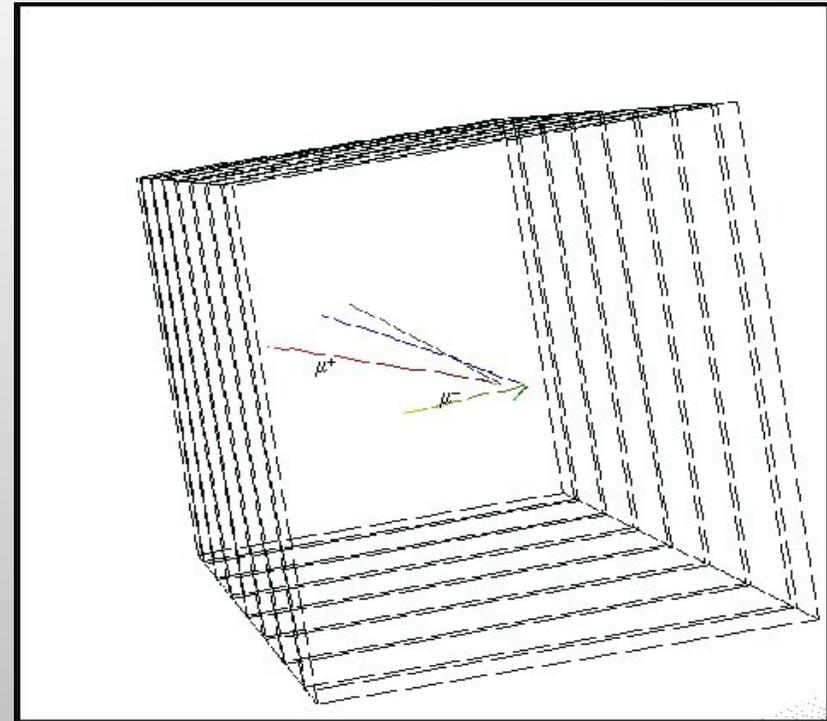
Segments in different plates are associated within some tolerances in positions and slopes and tracks are reconstructed. On the right a Total-Scan reconstruction with about 200 tracks (having at least 3 segments)

Step 3: Fine Alignment

A, more accurate, alignment of sheets is performed using tracks passing through the whole volume

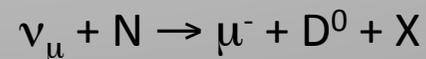
Step 4: Vertex Detection

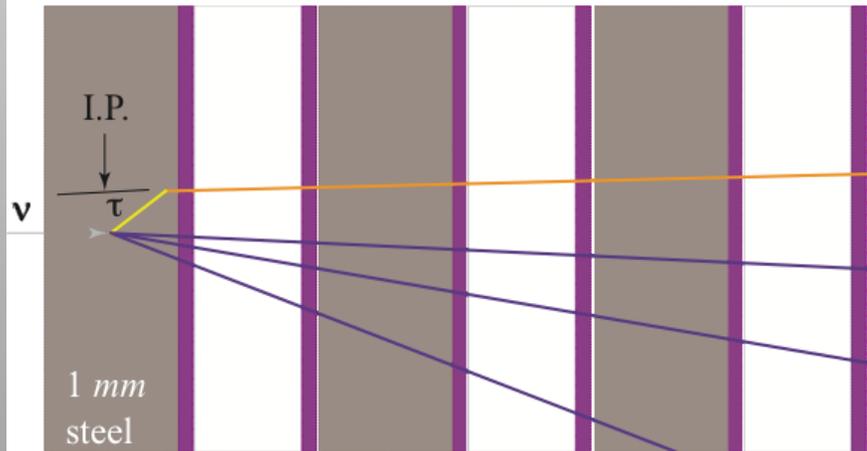
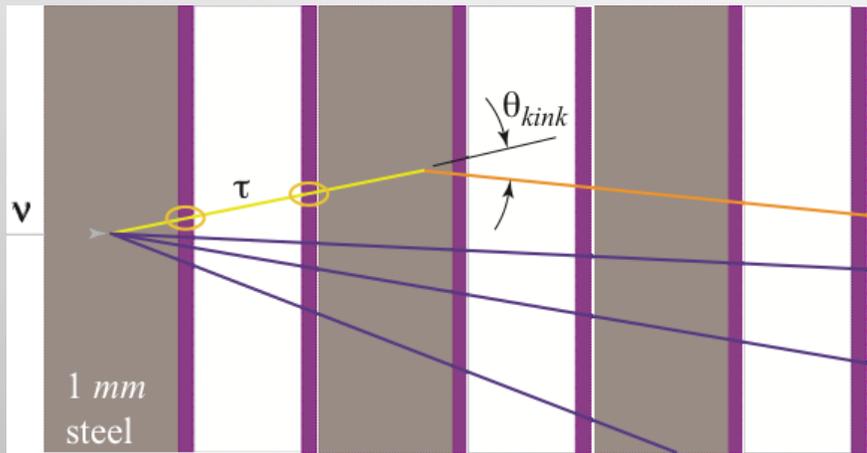
A χ^2 cut is applied to select well reconstructed tracks; tracks passing through the scanning volume are rejected; the remnant part of tracks is tried to be associated into vertices.



A Total Scan reconstructed event consisting of 2 vertices.

D^0 production (Flight length = 137 μm).





- *Long Decays*
 - parent measured
 - kink resolved
 - no primary muon or electron
 - ~75% of expected events

- *Short Decays*
 - only daughter was measured
 - ~25% of expected events
 - can be a background event

4 candidats pour une interaction du ν_τ

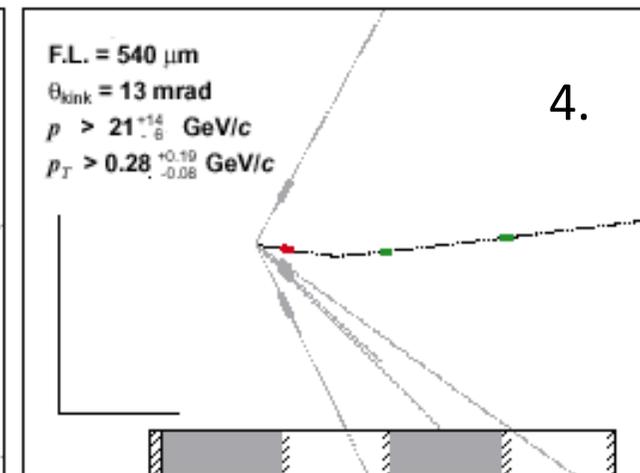
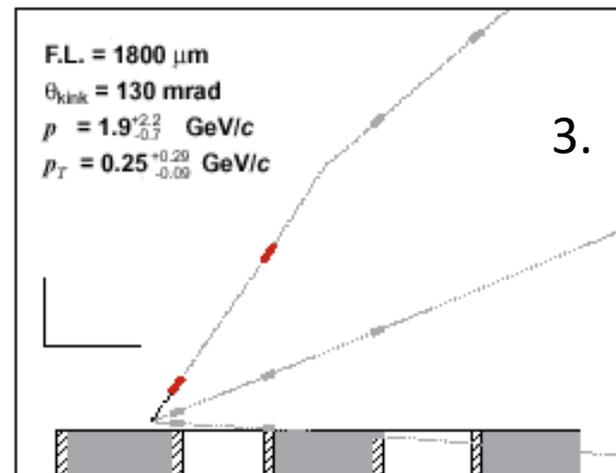
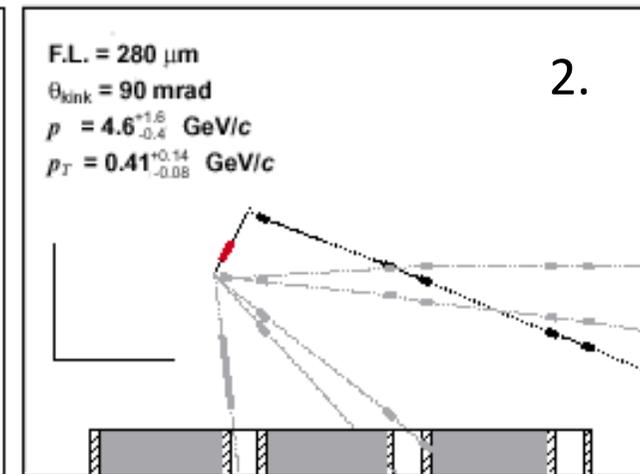
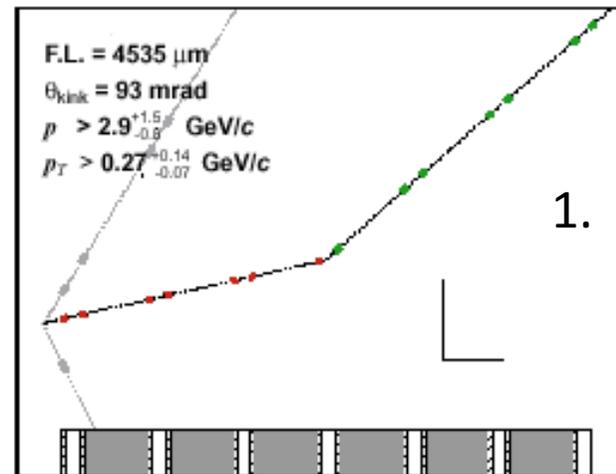
1. $\tau \rightarrow e + \nu_\tau + \nu_e$
shower in fibers

2. $\tau \rightarrow h + \nu_\tau + X$
secondary interaction
was seen after 1.5 cm

3. $\tau \rightarrow h + \nu_\tau + X$

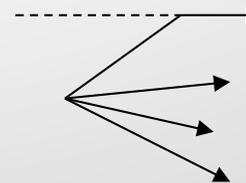
4. $\tau \rightarrow e + \nu_\tau + \nu_e$

Expected number of
tau-neutrino
interactions - 4.2



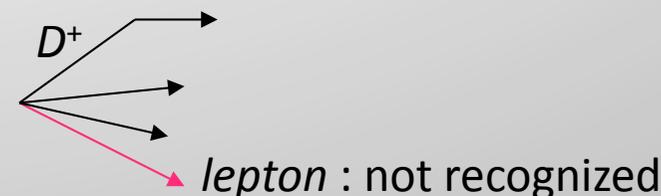
Bruit de fond:

Trace associée de manière aléatoire: E.g. trace primaire + trace d'un muon = BF négligeable

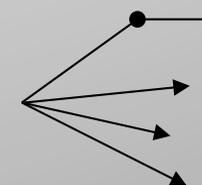


Production d'un méson charmé dans une interaction CC du ν_μ ou ν_e et le lepton primaire n'est pas détecté:

BF = 0.18 ± 0.03



Interactions secondaires des particules chargées : BF = 0.16 ± 0.04



Bruit de fond total estimé par simulation MC = **0.34 ± 0.05**



Probabilité que les 4 événements trouvés soient dus au bruit de fond:

$$P(4) = \frac{0,34^4 \times e^{-0,4}}{4!} = 3,7 \times 10^{-4}$$

Découverte du ν_τ

K. Kodama et al. (DONUT Collaboration). "Observation of tau neutrino interactions", *Phys. Lett. B*, **504**, (2001) 218.

The New York Times

ON THE WEB

July 21, 2000, Friday

Scientists Detect Elusive Building Block of Matter

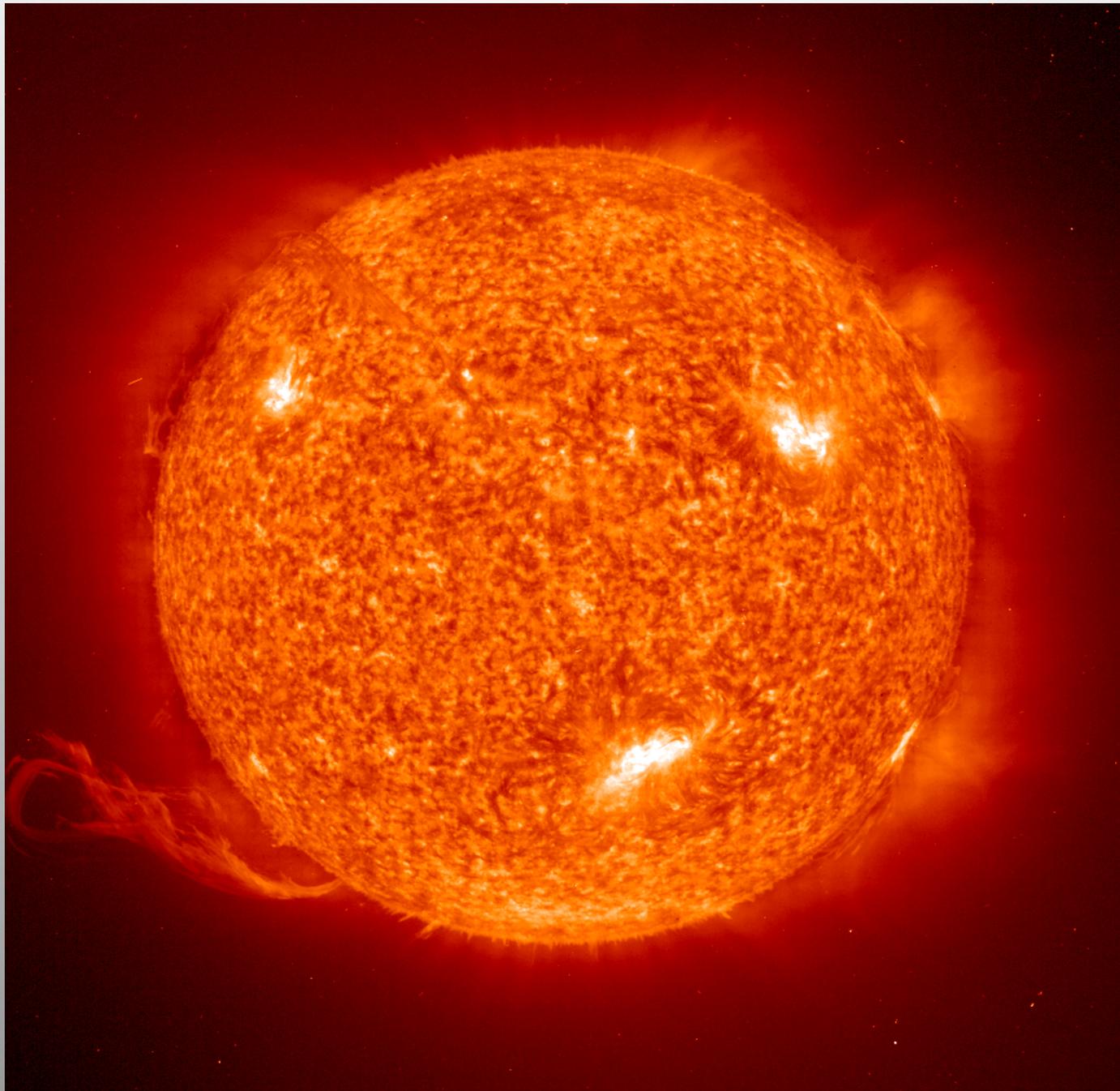
By JAMES GLANZ (NYT) 1249 words

Late Edition - Final , Section A , Page 1 , Column 2

ABSTRACT - Scientists at Fermi National Accelerator Laboratory detect what may be one of last pieces of theoretical puzzle explaining structure of matter; international team will announce detection of tau neutrino, most elusive member of nature's ghostly family of particles; 54 physicists used world's most powerful particle accelerator, Tevatron, to fire estimated 100 trillion tau neutrinos into advanced emulsion similar to photographic film; four of neutrinos produced minute but clearly recognizable streaks, confirming existence suspected for 25 years;

Hier

Neutrinos solaires



Modèle solaire standard - 3

Energy produced in the Sun results from several cycles:



pp in pp cycle
 ${}^4\text{He}$ in ${}^7\text{Be}$ and ${}^8\text{B}$ cycle
 ${}^{12}\text{C}$ in CNO cycle

Each source is assumed to be the only process

$$\Phi_\nu = 2 \frac{\text{Sun luminosity}}{Q} \frac{1}{4\pi d^2}$$

$3.8 \cdot 10^{26} \text{ W}$

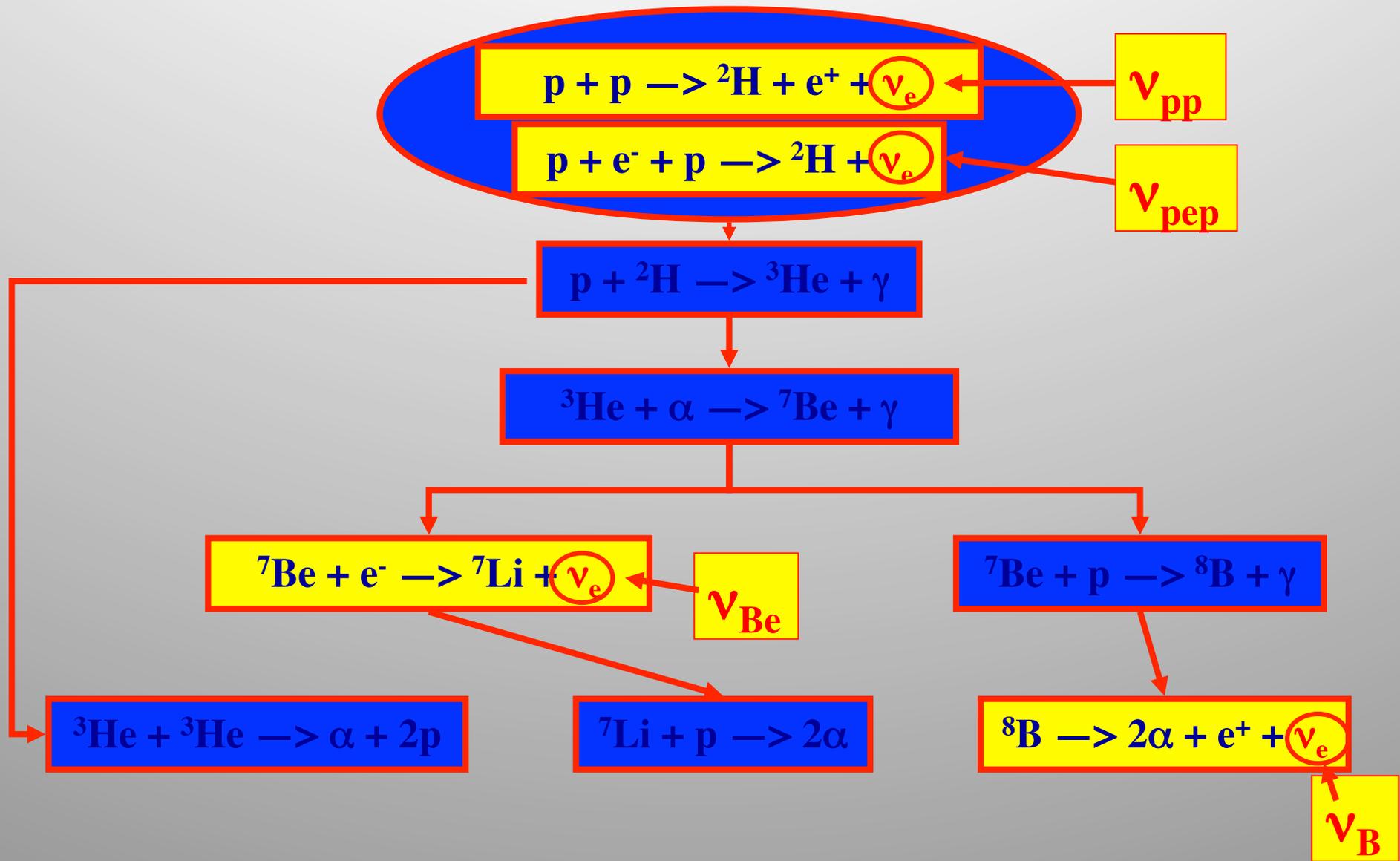
$1.5 \cdot 10^{11} \text{ m}$

19-26 MeV (depending on the reactions)

$$\Phi_\nu = 6.5 \text{ to } 9 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Global ν flux strongly constrained by solar luminosity

Production d'énergie dans le soleil: principalement pp - chain:

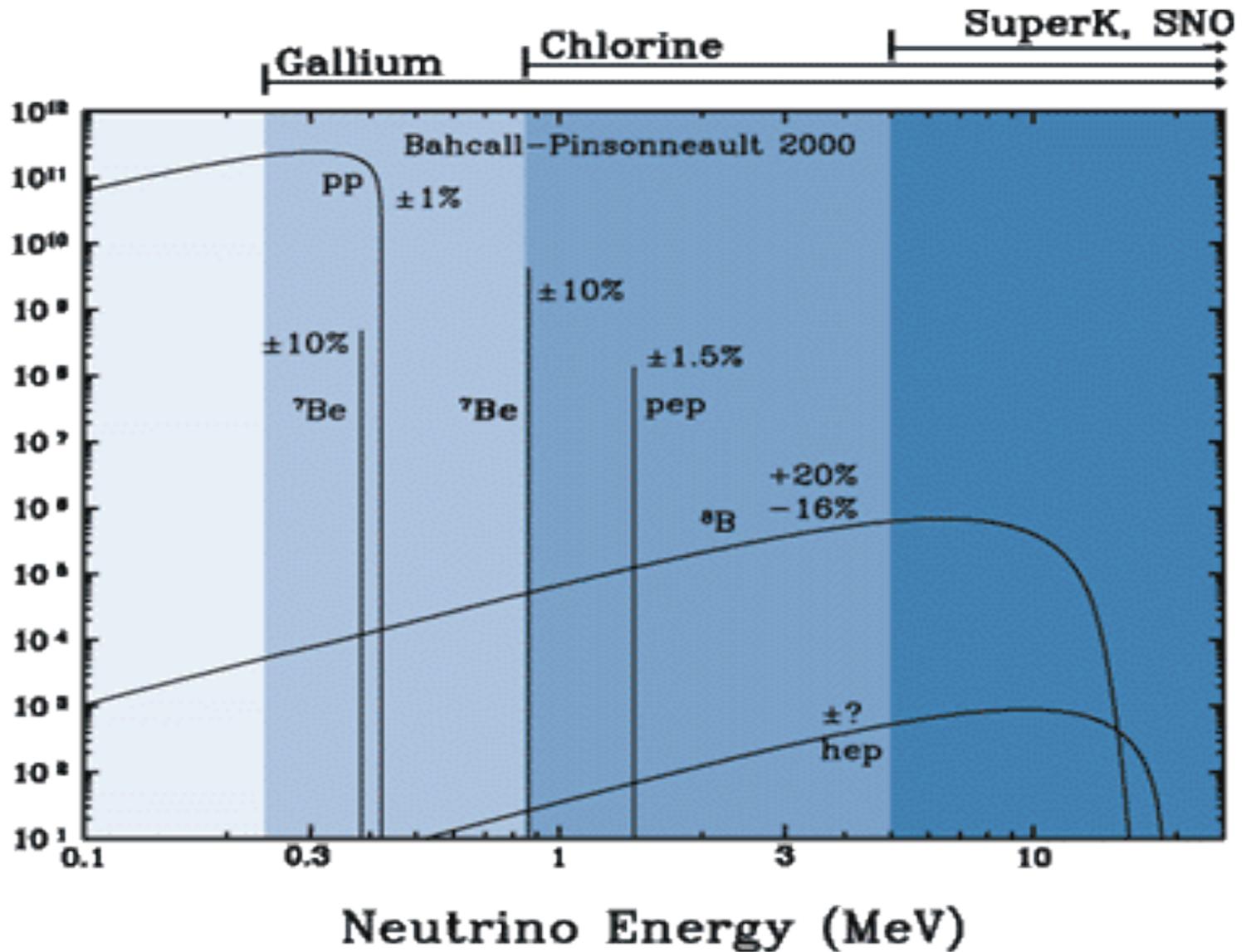




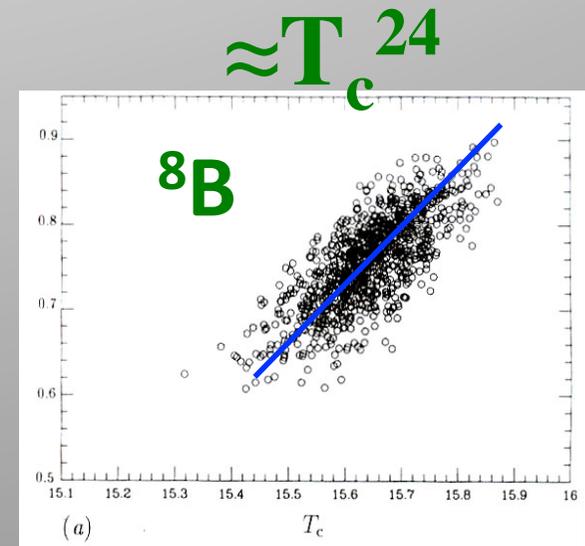
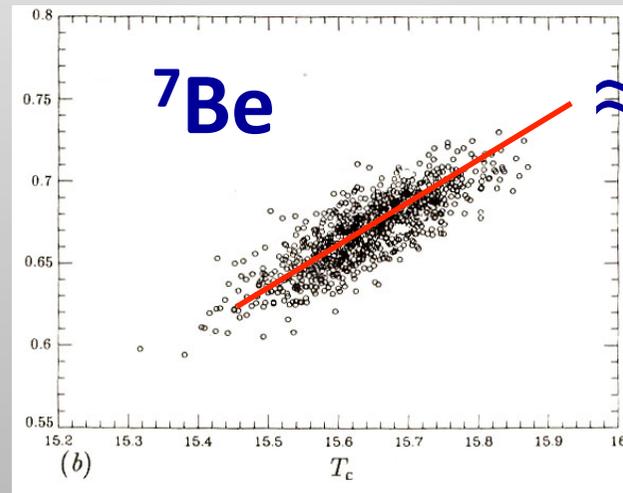
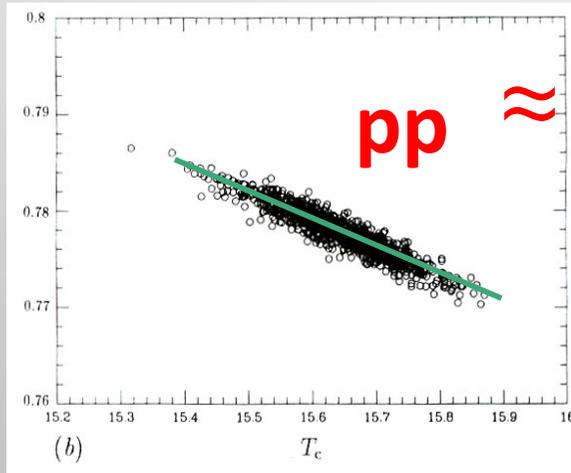
Spectre en énergie des neutrinos solaires

Continuous fluxes in $/\text{cm}^2/\text{s}/\text{MeV}$
Discrete fluxes in $/\text{cm}^2/\text{s}$

Neutrino Flux



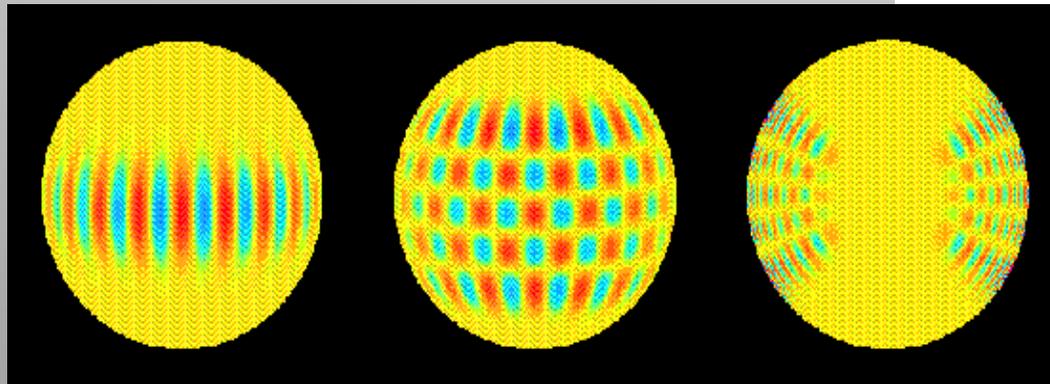
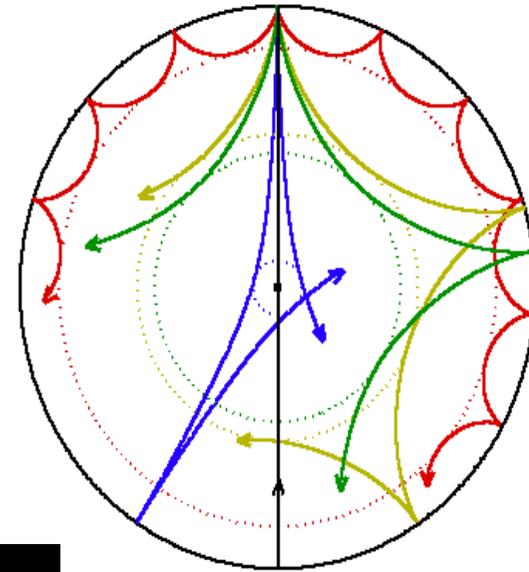
La dépendance du flux de la température:



See also J.N.Bahcall and A.Ulmer, Phys. Rev. D53 (1996) 4202

Helioseismologie (1)

The Sun acts as a resonating cavity, exhibiting millions of oscillation modes (described by spherical harmonics)

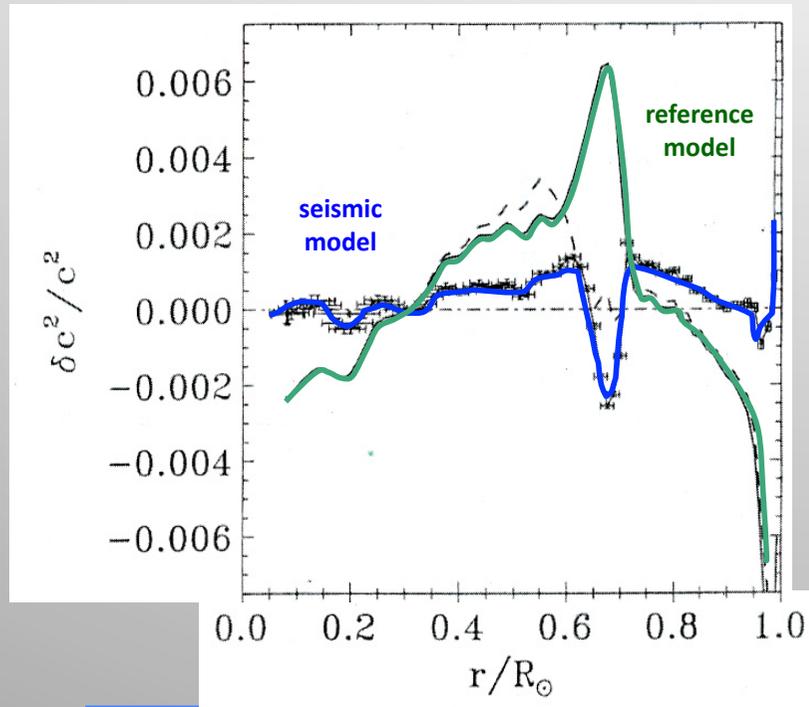


$l=19$
 $m=19$

$l=19$
 $m=15$

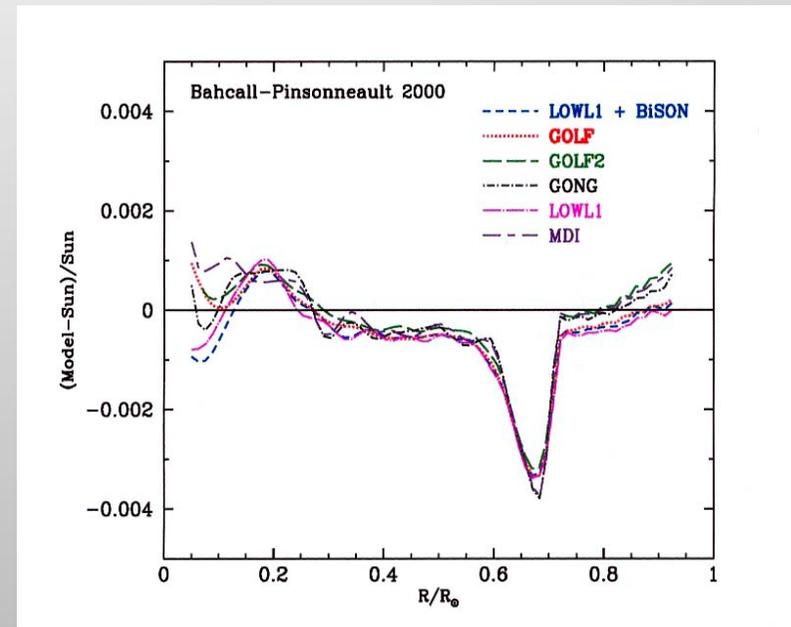
$n=11$
 $l=19$
 $m=15$

Helioseismology constraints



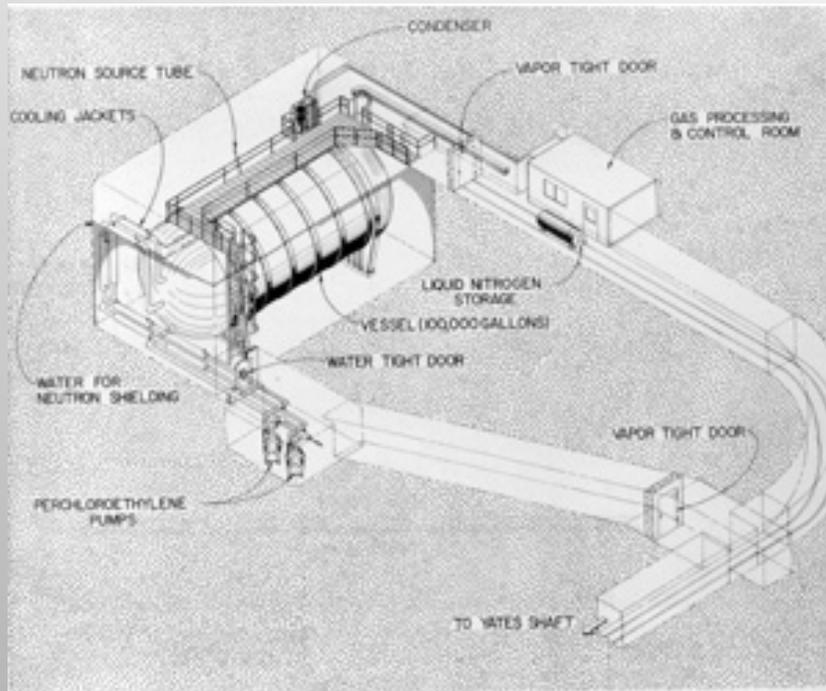
S.Turck-Chièze et al.,
Ap. J. Lett. 555 (2001) L69
(GOLF-MDI data)

Seismic model = Reference model +
a) Diffusive treatment of the tachocline
b) pp reaction rate : +1%
c) heavy elements : +3.5%



J.N.Bahcall et al., Ap. J. 555 (2001) 990

The « pioneering » chlorine experiment



Homestake mine (South Dakota)

615 tons of C_2Cl_4



Seuil = 0,8 MeV \searrow ${}^{37}Cl$ ($T_{1/2}=35$ d)

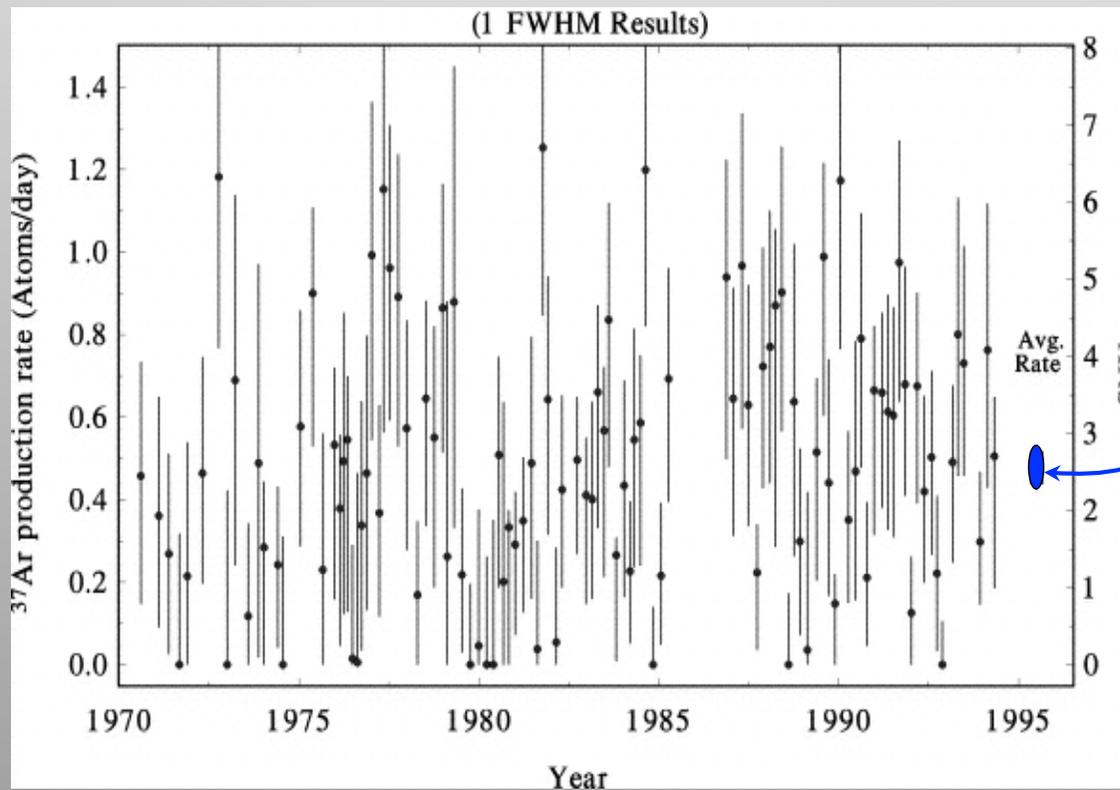


1970 :
le détecteur

(R. Davis, Prix Nobel en 2002)

The chlorine experiment

- Radiochemical
- Sensitive to Be and B neutrinos
- 25 years of data (108 runs)



Result :
 2.56 ± 0.20 SNU

**1/3 of
solar models
(7.6 ± 1.2 SNU)**

B.T.Cleveland et al., Ap. J. 496 (1998) 505



Raymond Davis Jr.

(2002)

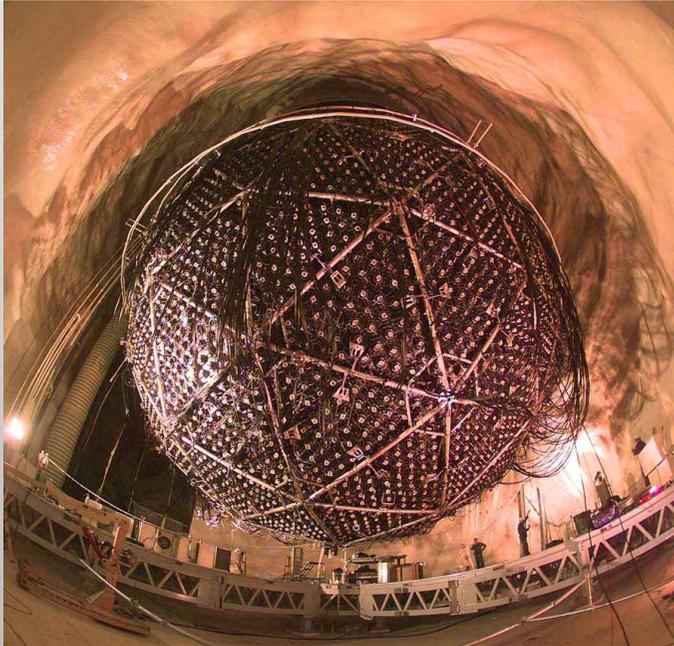
La naissance du « problème » des neutrinos solaires:

$2.56 \pm .23$ SNU mesuré par l'expérience

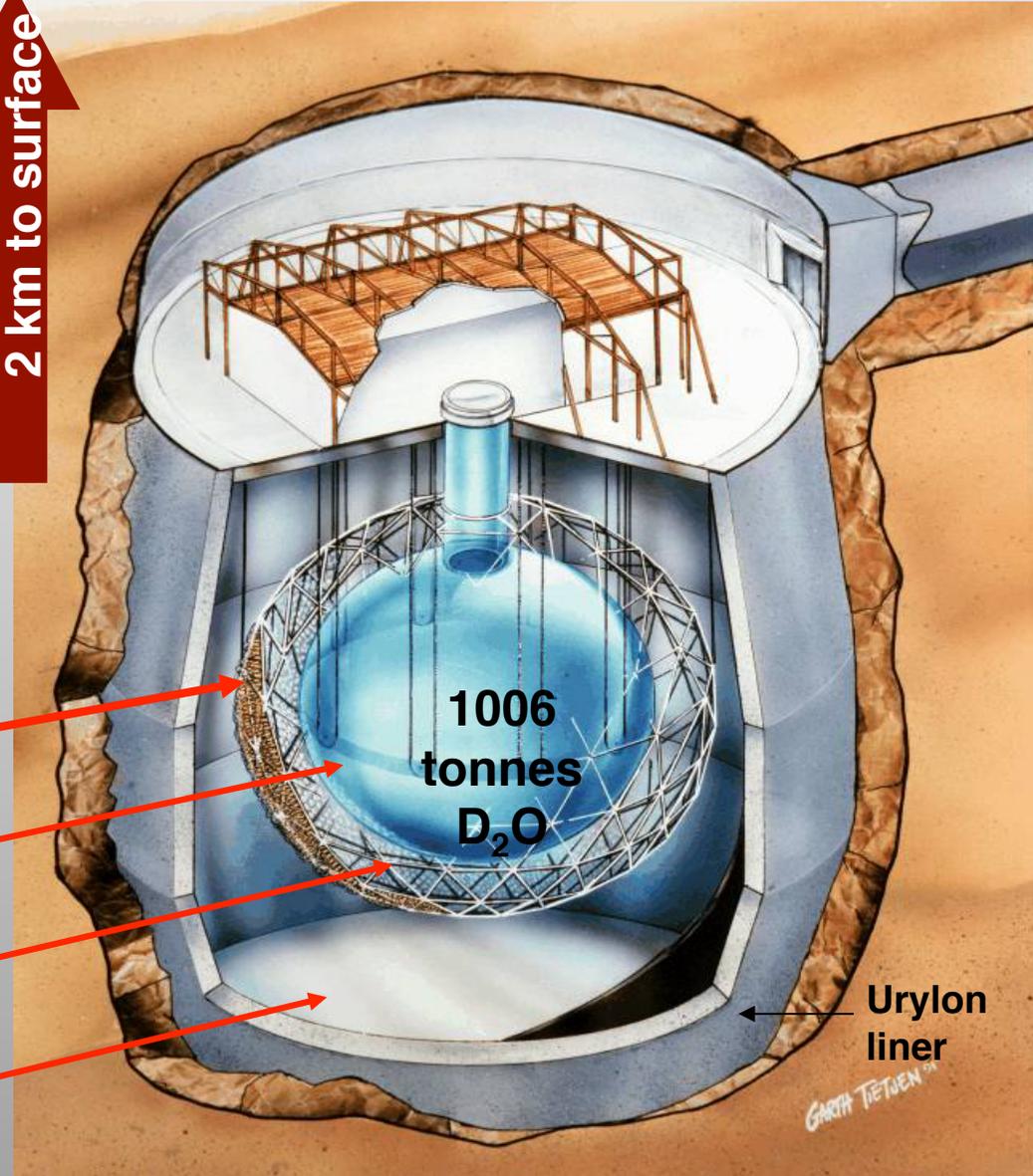


$7.7 + 1.2 - 1.0$ SNU prédit par le modèle solaire

L'expérience SNO (Sudbury Neutrino Observatory) :



2 km to surface



17.8m dia. PMT Support Structure
9456 20-cm dia. PMTs
56% coverage

12.01m dia. acrylic vessel

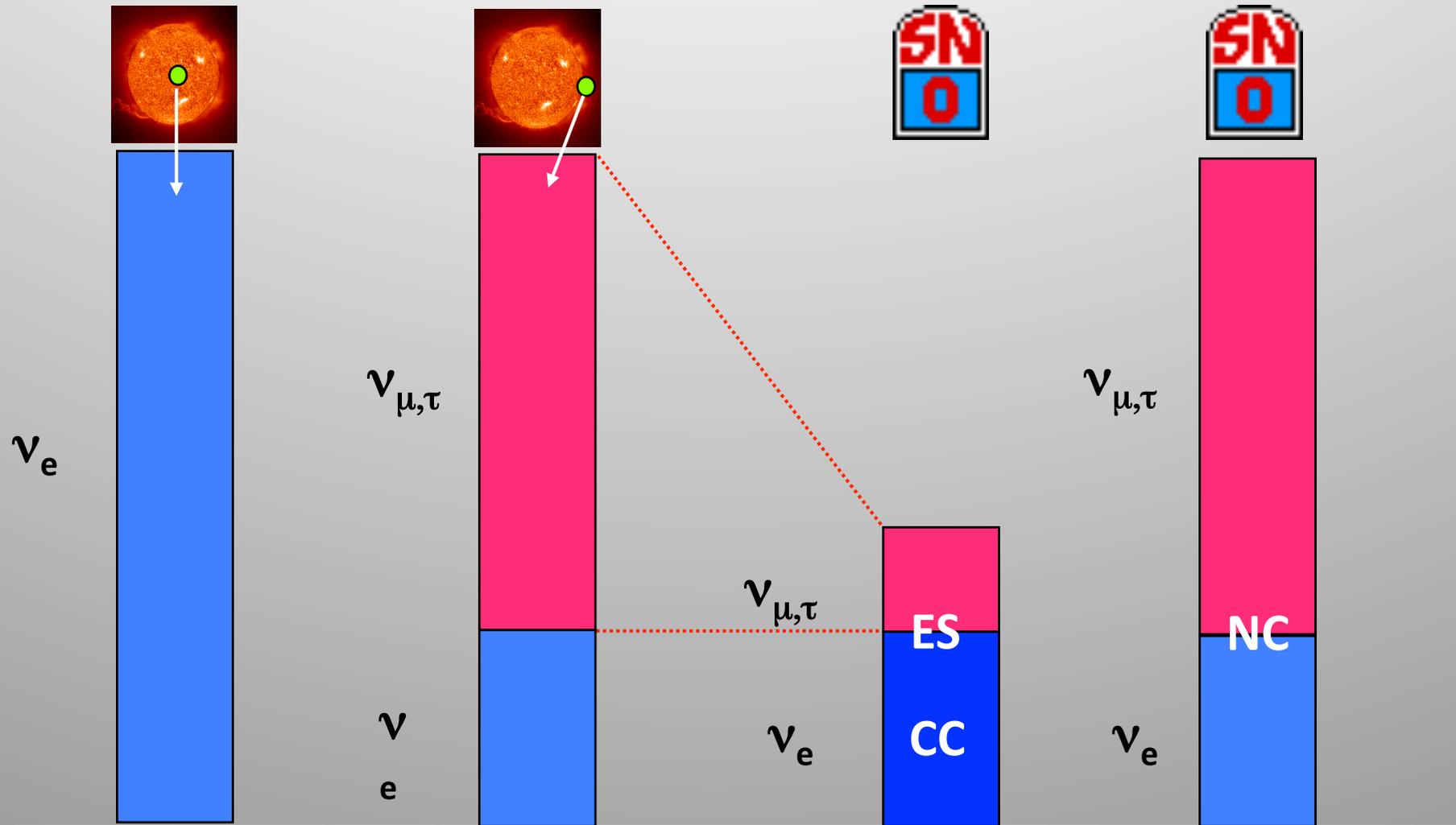
1700 tonnes of inner shielding H₂O

5300 tonnes of outer shielding H₂O

Nucl. Inst. Meth. A449, 127 (2000)

Résultats de SNO (Avril 2002)

[unités : $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$]



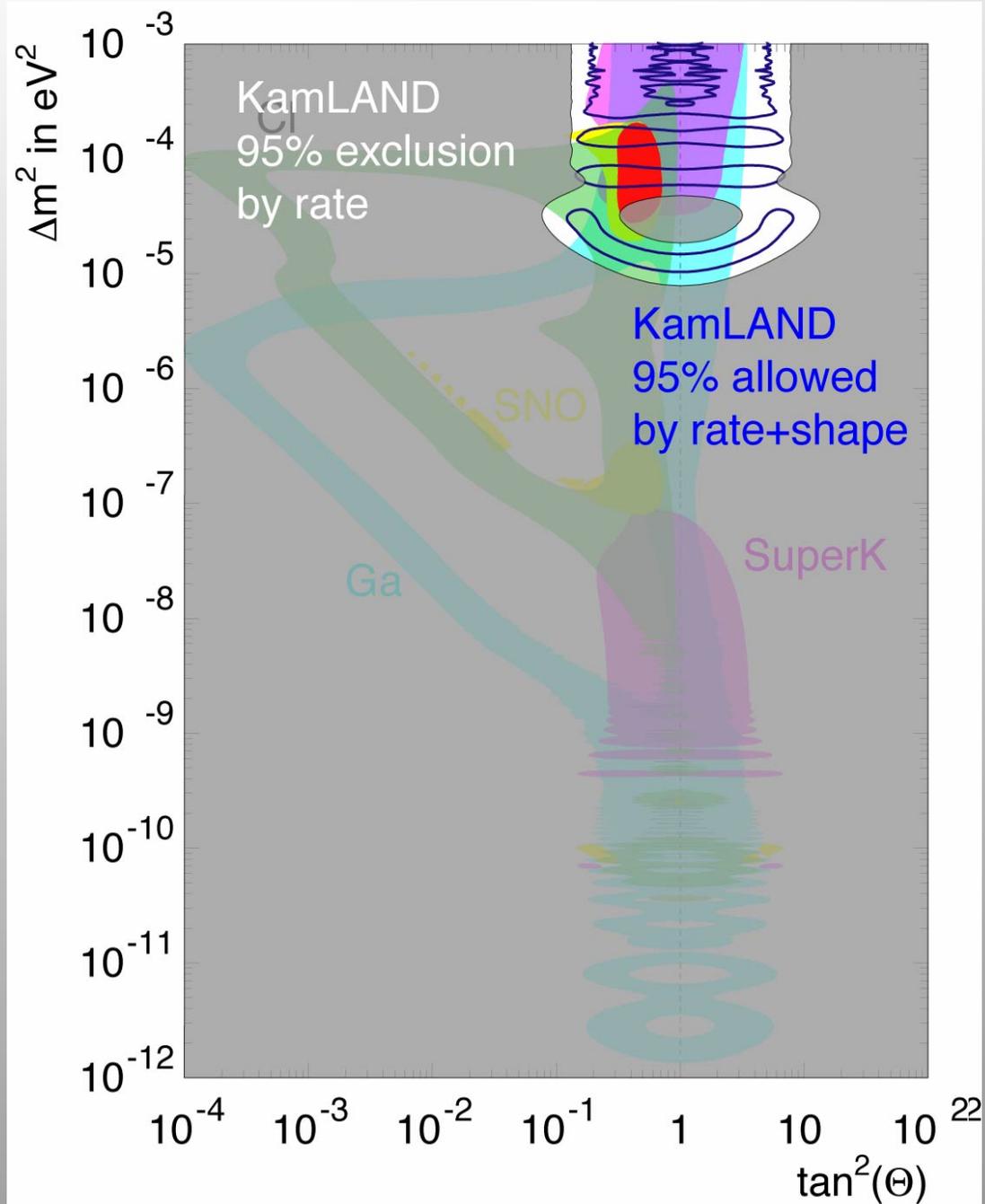
Progrès en 2002 sur le
problème des
neutrinos solaires

Mars 2002

Avril 2002
(SNO)

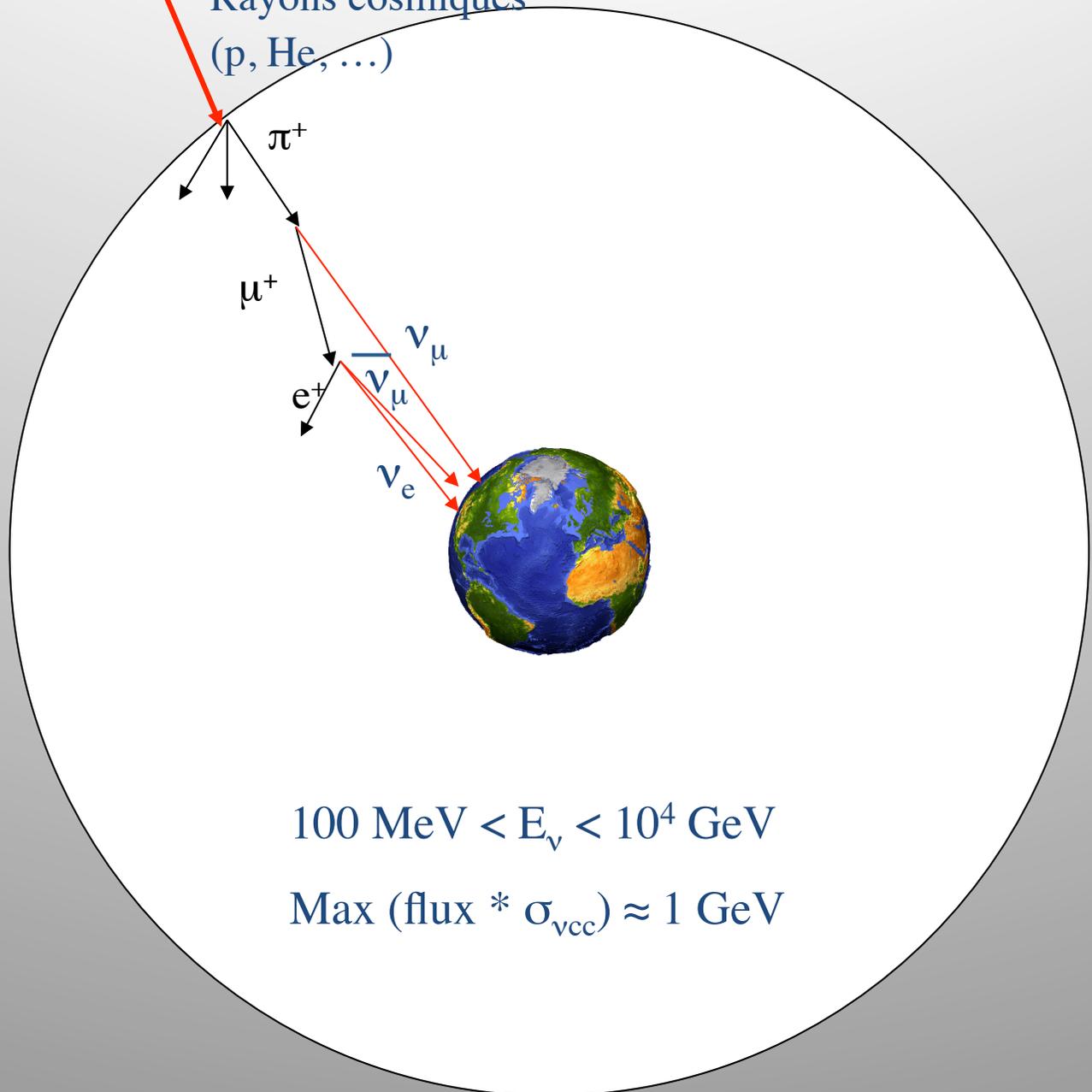
Décembre 2002
(KamLAND)

From Murayama



2. Neutrinos atmosphériques

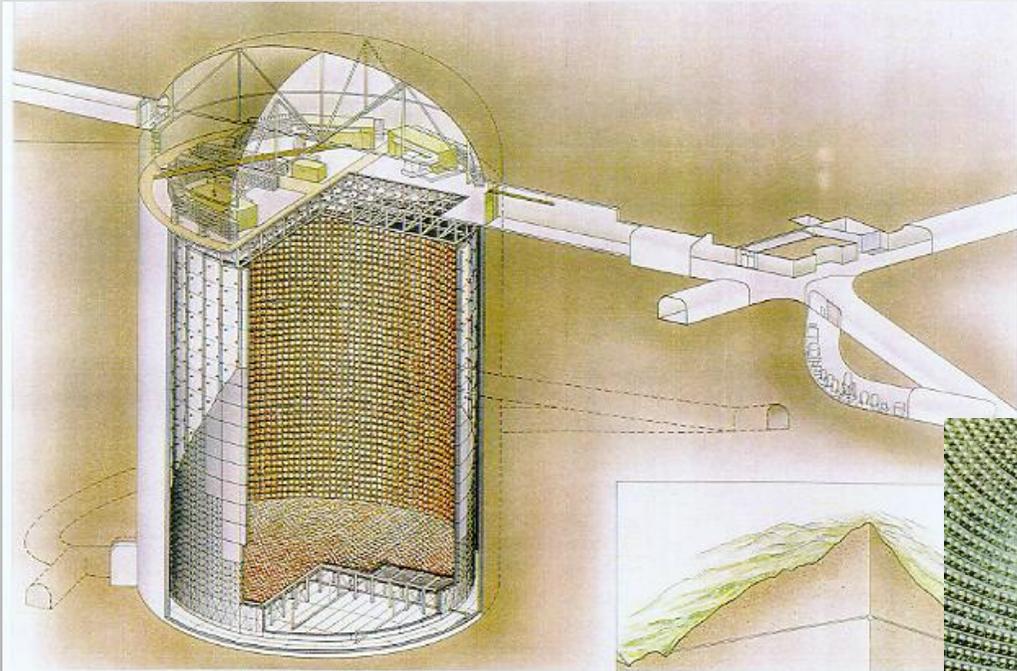
Rayons cosmiques
(p, He, ...)



$$100 \text{ MeV} < E_\nu < 10^4 \text{ GeV}$$

$$\text{Max (flux} * \sigma_{\nu\text{cc}}) \approx 1 \text{ GeV}$$

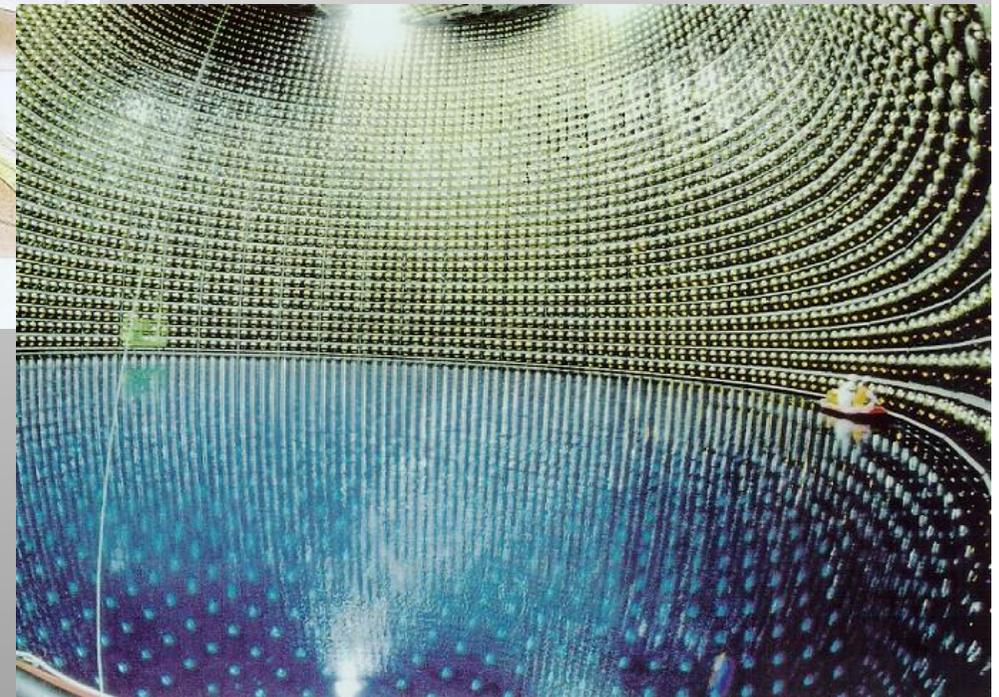
SuperKamiokande



50kt d'eau (40m de Ø
40m de haut)

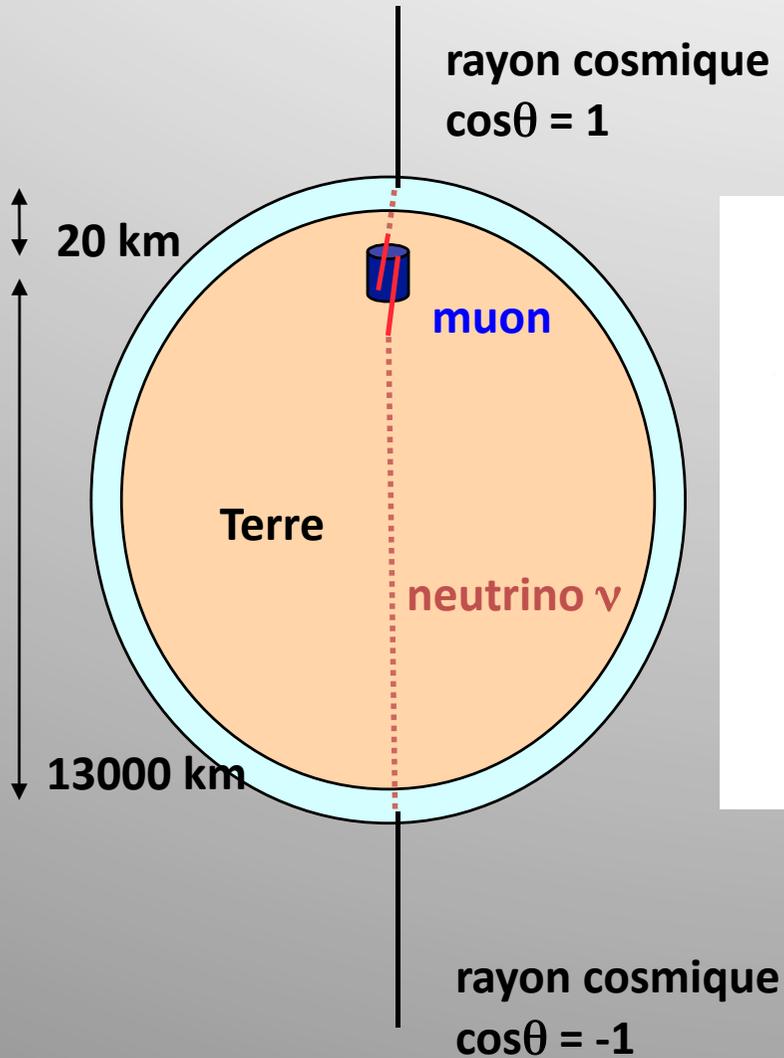
SUPERKAMIOKANDE INSTITUT FÜR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

11000 PM (50cm de Ø)
Taux de couverture = 40%

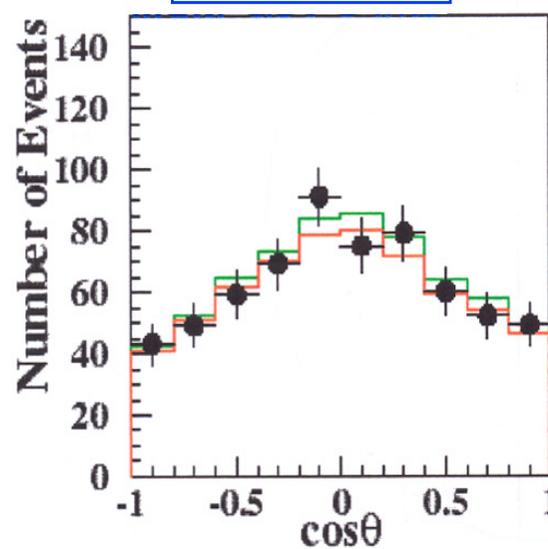


SuperKamiokande

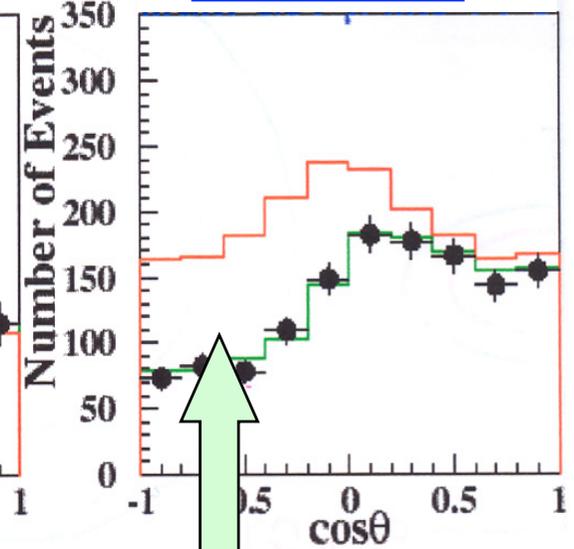
Juin 1998



Événements
« électrons »



Événements
« muons »

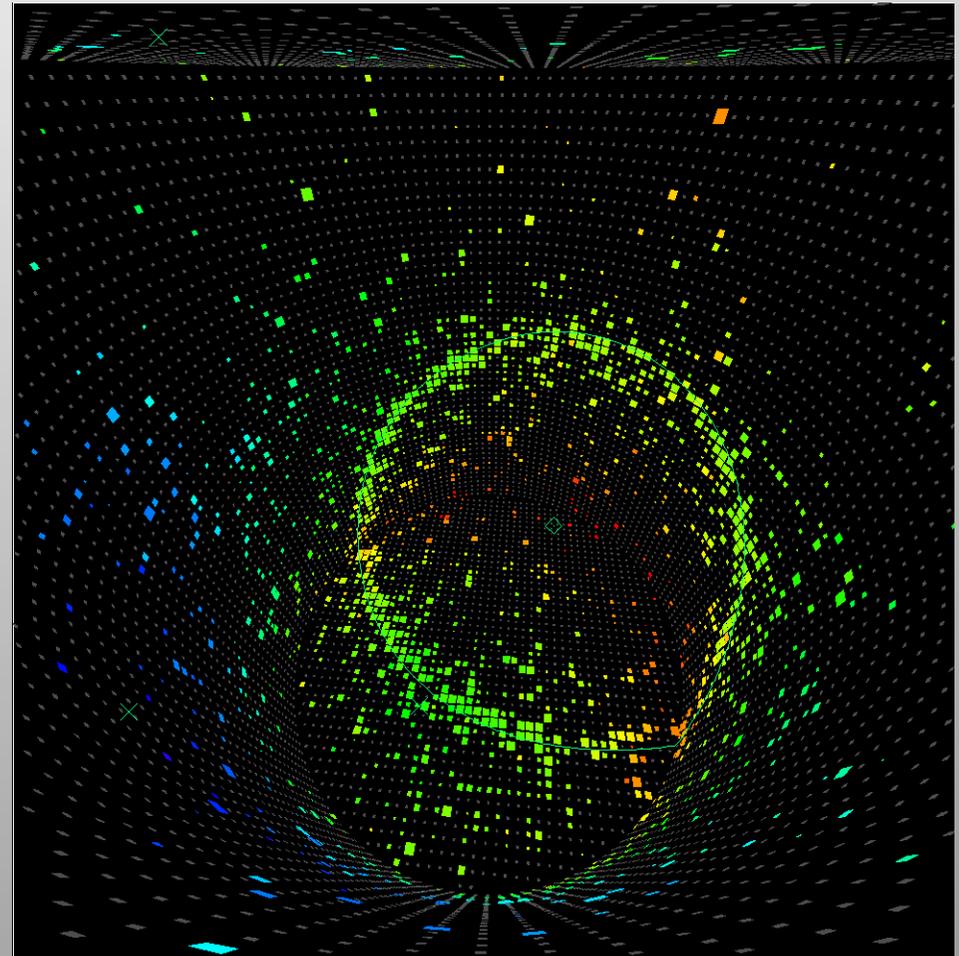
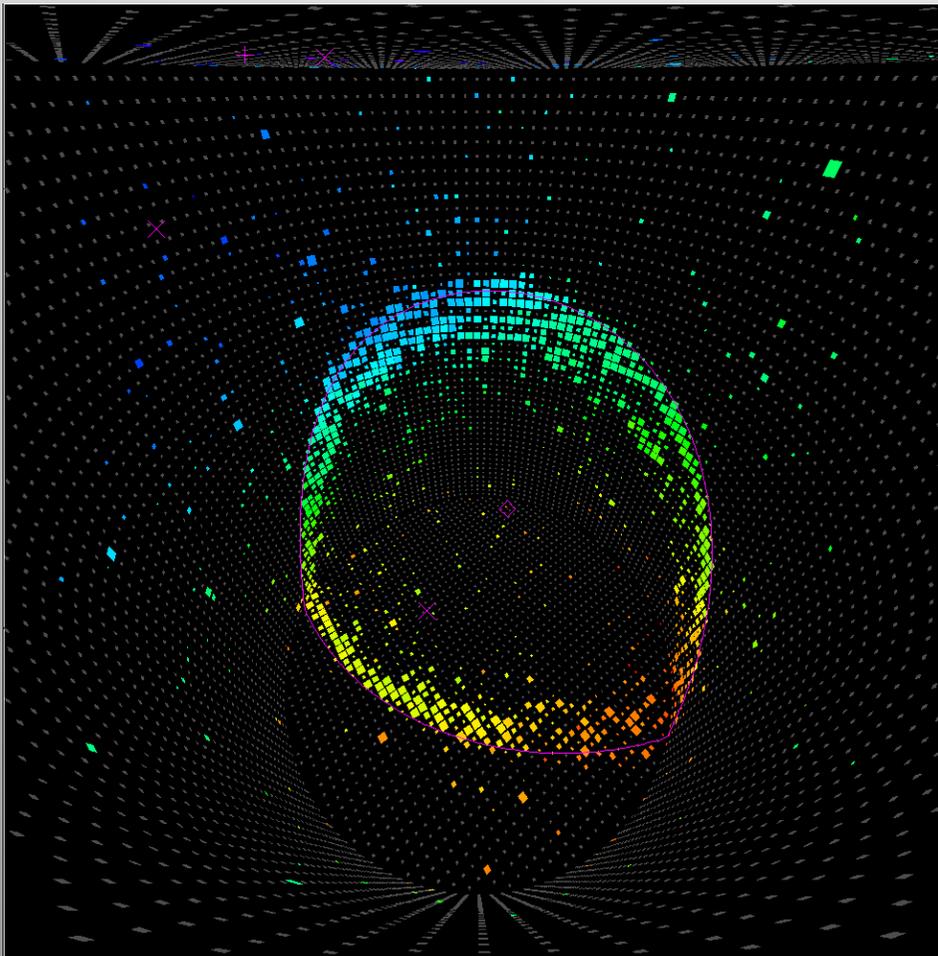


oscillation $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

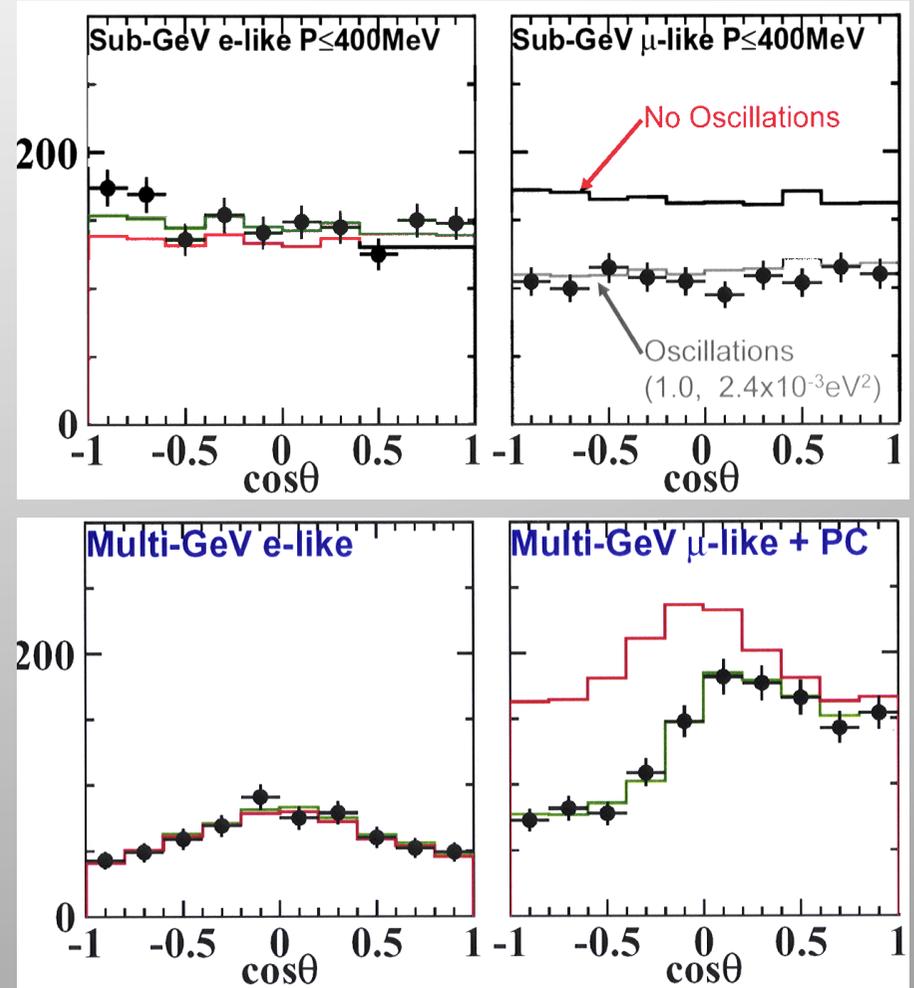
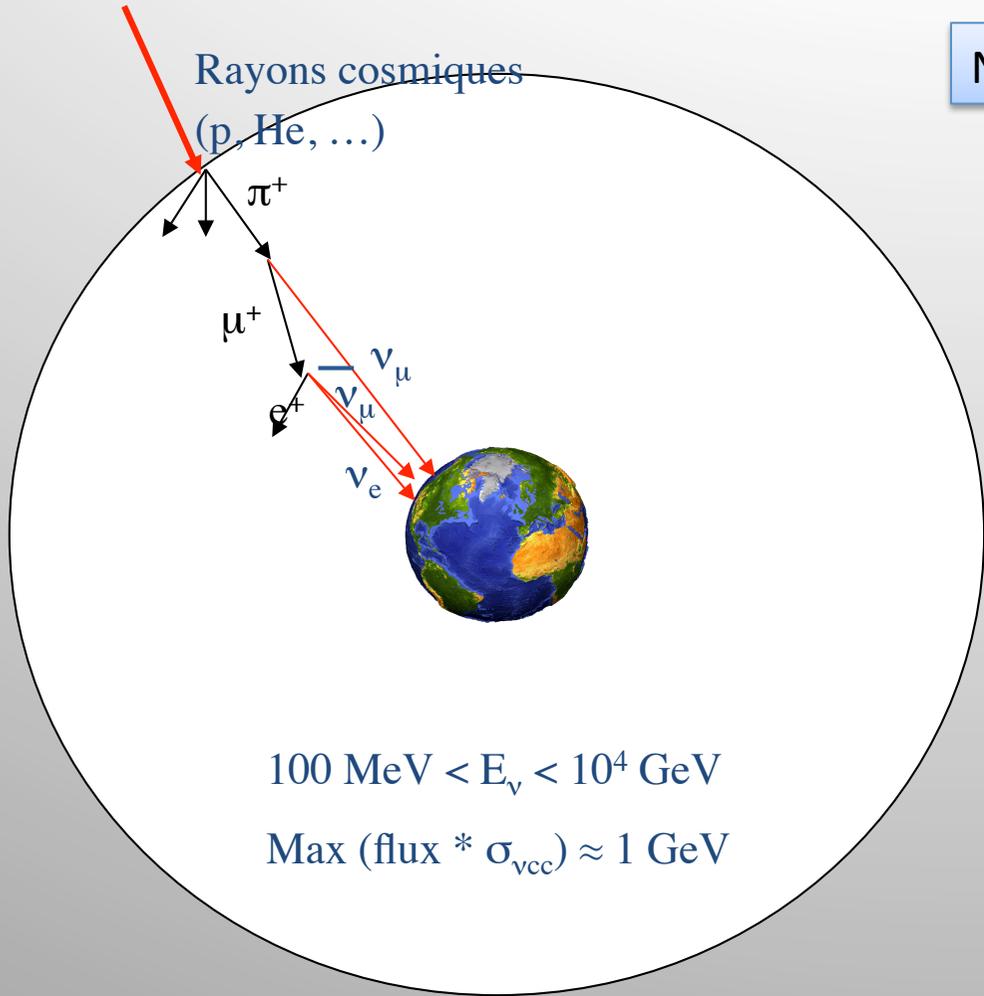
Identification des particules dans Super-K

muon de 603MeV

électron de 492MeV



Neutrinos atmosphériques



Neutrinos et le modèle standard...

$m_\nu = 0 ?$

$m(\nu_e) < 2.2 \text{ eV}/c^2$ ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}^+ + e^- + \nu_e$ Troitsk, Mainz

$m(\nu_\mu) < 160 \text{ keV}/c^2$ $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$ PSI

$m(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV}/c^2$ $\tau \rightarrow 5\pi + \nu_\tau$ Aleph

$\tau \rightarrow 3\pi + \nu_\tau$



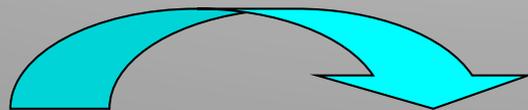
Theory: GUT



$m_\nu > 0$



- **ν 's atmosphériques:** Superkamiokande & SoudanII : $\Delta m^2 \approx 10^{-2} - 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta = 1$
- **Cosmologie:** ν = candidat pour la matière noire chaude
- **ν 's solaires:** Homestake, Gallex, Sage, SK & SNO $\rightarrow \approx 50\%$ de la prédiction MSS



Oscillations

B. Pontecorvo: première proposition d'oscillation du neutrino!

1957: B. Pontecorvo, « Mesonium and Antimesonium »,
J. Exptl. Theoret. Phys. (USSR) 33, 549-551 (August 1957)

Et en mai 1968:



Бруно Понтекорво

Bruno Pontecorvo, 1913 - 1993

SOVIET PHYSICS JETP

VOLUME 26, NUMBER 5

MAY, 1968

NEUTRINO EXPERIMENTS AND THE PROBLEM OF CONSERVATION OF LEPTONIC CHARGE

B. PONTECORVO

Joint Institute for Nuclear Research

Submitted June 9, 1967

Zh. Eksp. Teor. Fiz. 53, 1717-1725 (November, 1967)

The possible violations of leptonic charge conservation, which are compatible with experimental data, are large. This paper analyses various experimental setups which would be capable of detecting such hypothetical violations. It is shown that the most sensitive experiments are the search for the process $\mu \rightarrow e + \gamma$ and especially a search for oscillations of the type $\nu \rightleftharpoons \bar{\nu}$ and $\nu_e \rightleftharpoons \nu_\mu$. A nonvanishing neutrino mass could be related to CP-nonconservation and to an electric (and magnetic) dipole moment of the neutrino. Astronomical implications of the oscillation $\nu \rightleftharpoons \bar{\nu}$ are discussed.

Mais attention aux conclusions trop rapides...

PHYSICAL REVIEW LETTERS

VOLUME 45

20 OCTOBER 1980

NUMBER 16

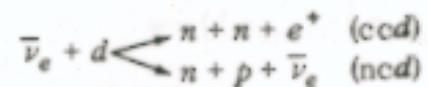
Evidence for Neutrino Instability

F. Reines, H. W. Sobel, and E. Pasierb

Department of Physics, University of California at Irvine, Irvine, California 92717

(Received 24 April 1980)

This Letter reports indications of neutrino instability obtained from data taken on the charged- and neutral-current branches of the reaction



at 11.2 m from a 2000-MW reactor. These results at the (2-3)-standard-deviation level, based on the departure of the measured ratio (ccd/ncd) from the expected value, make clear the importance of further experimentation to measure the $\bar{\nu}_e$ spectrum versus distance.

Aujourd'hui

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_{23} & \sin\theta_{23} \\ 0 & -\sin\theta_{23} & \cos\theta_{23} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\theta_{13} & 0 & \sin\theta_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_{13}e^{i\delta} & 0 & \cos\theta_{13} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \cos\theta_{12} & \sin\theta_{12} & 0 \\ -\sin\theta_{12} & \cos\theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

(Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata)



neutrinos
atmosphériques

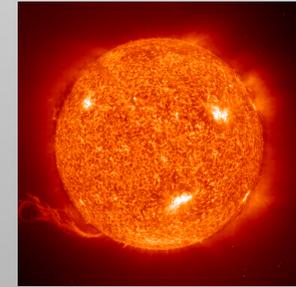
$$\theta_{23} = 45^\circ$$

$$\Delta m_{23}^2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{eV}^2$$



neutrinos
de réacteur
(Chooz)

$$\theta_{13} < 13^\circ$$

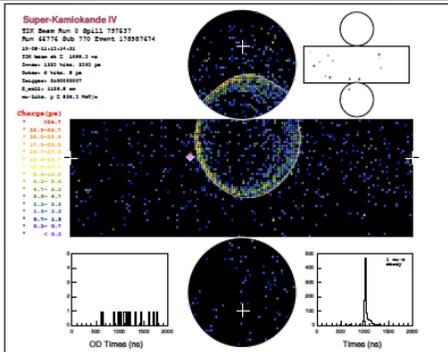


neutrinos
solaires

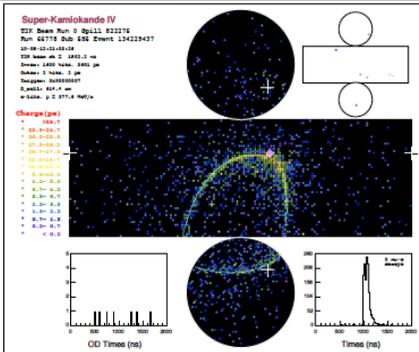
$$\theta_{12} = 30^\circ$$

$$\Delta m_{12}^2 = 7.2 \cdot 10^{-5} \text{eV}^2$$

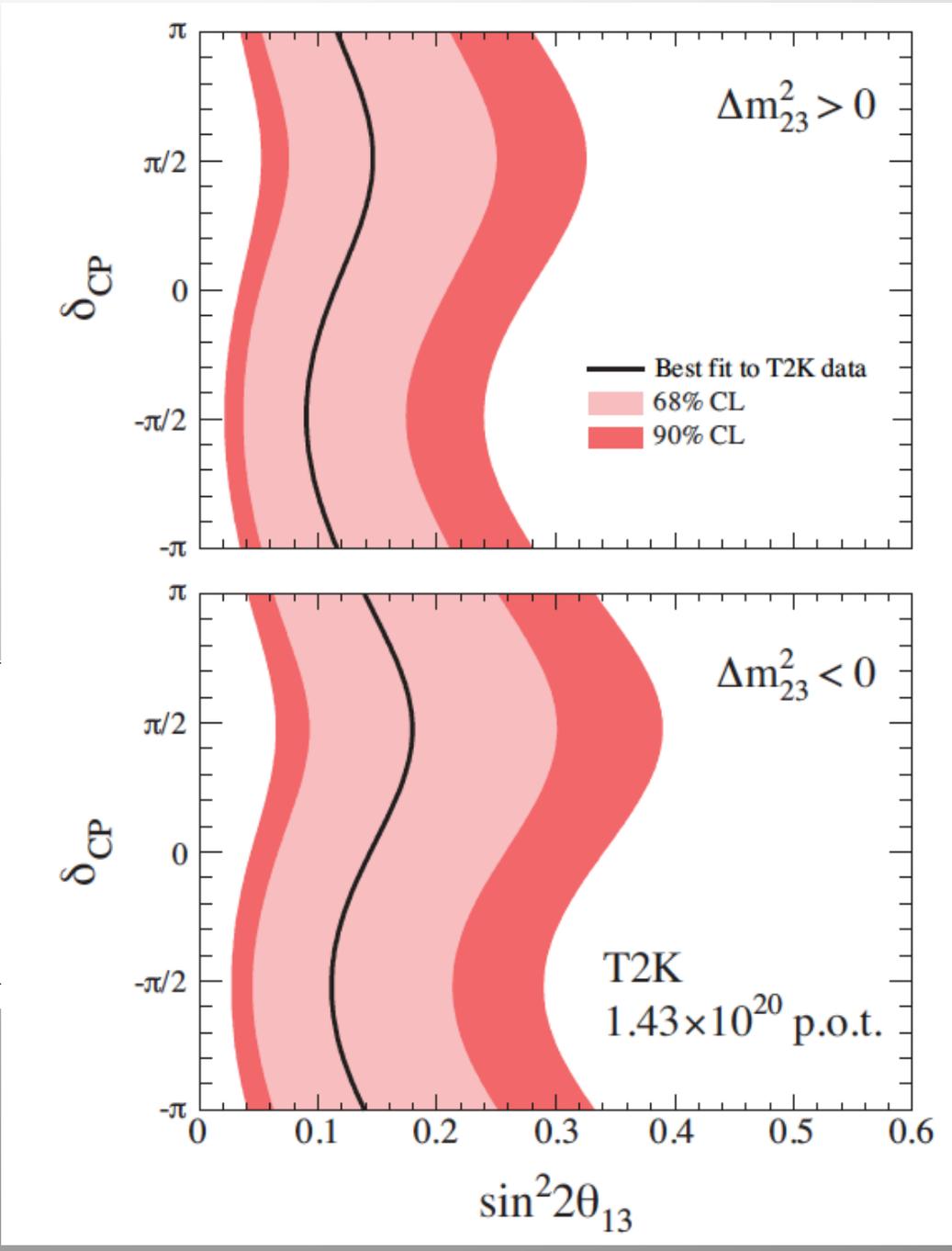
T2K



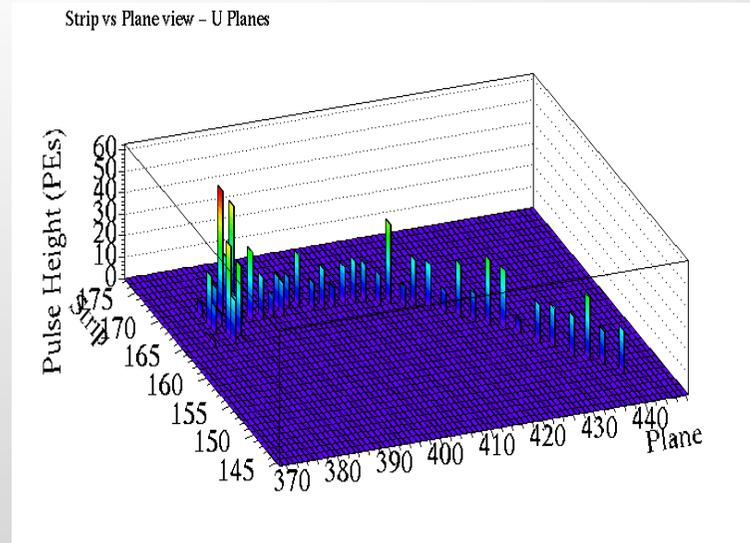
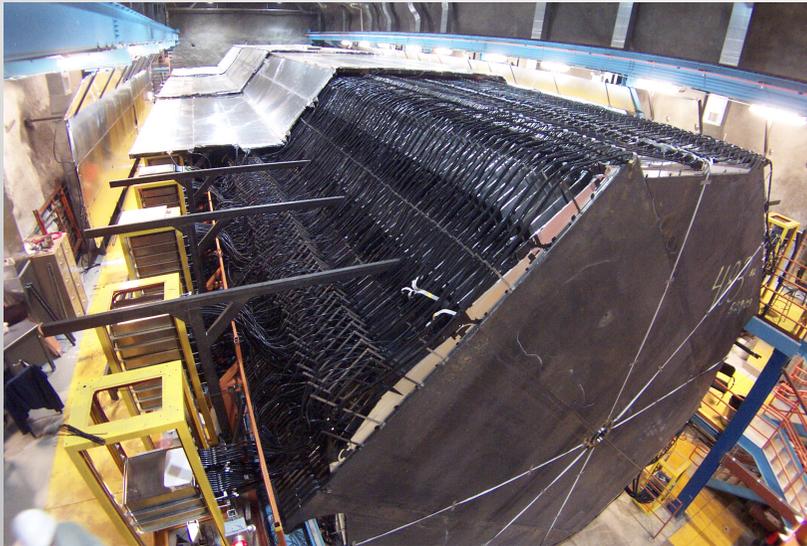
(a) muon-like event



(b) electron-like event

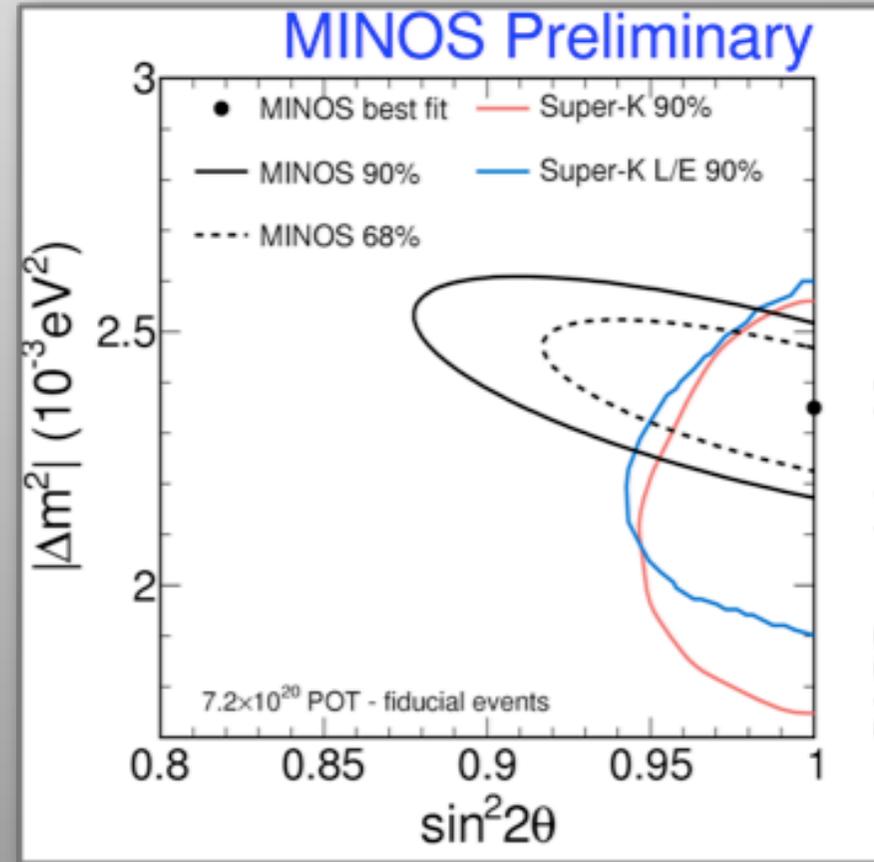


MINOS



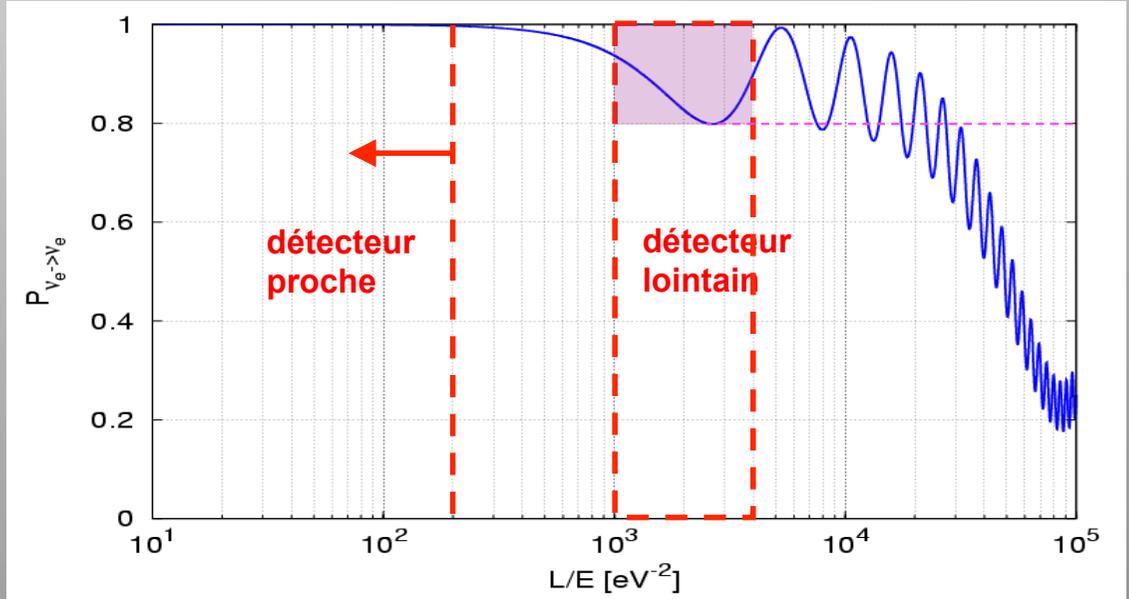
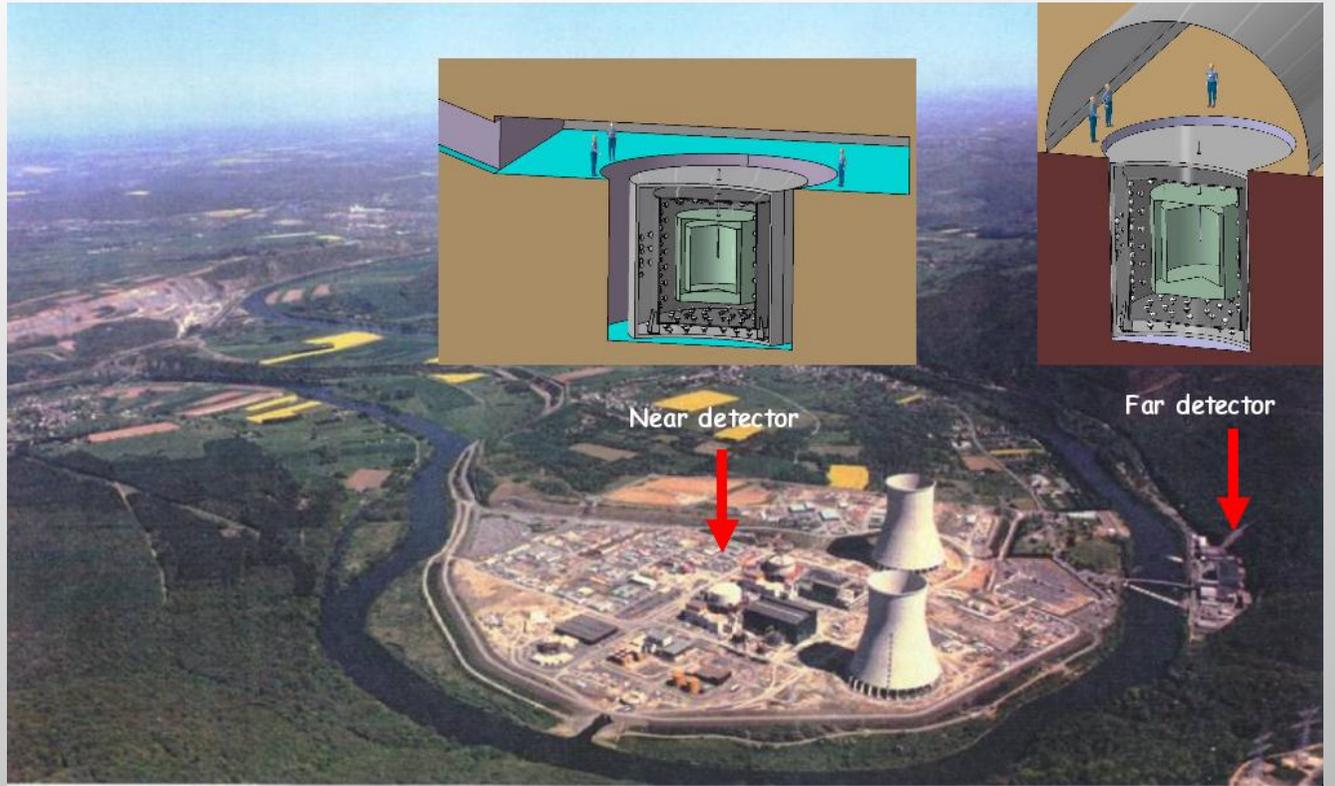
$$|\Delta m^2| = 2.35^{+0.11}_{-0.08} \times 10^{-3} \text{eV}^2$$
$$\sin^2(2\theta) > 0.91 \text{ (90\% C.L.)}$$

World's best measurement of Δm^2_{32} !



Demain

Double CHOOZ



APRÈS DEMAIN

Laguna-LBNO: Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astrophysics Long Baseline Neutrino Oscillation

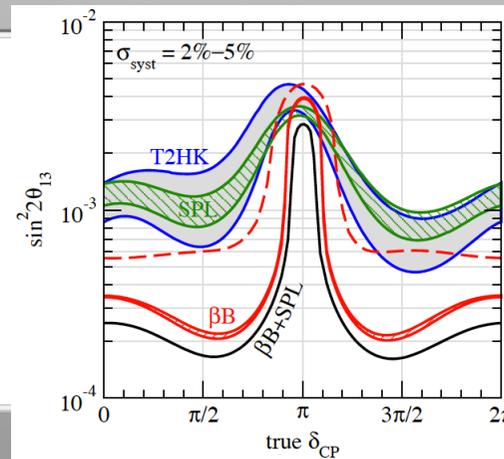
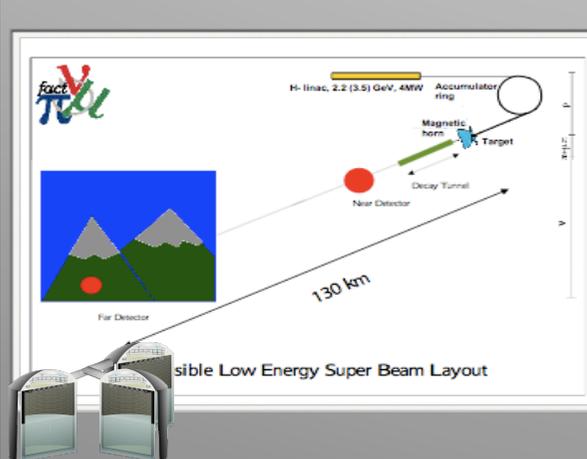
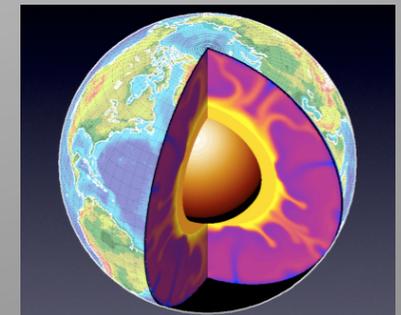
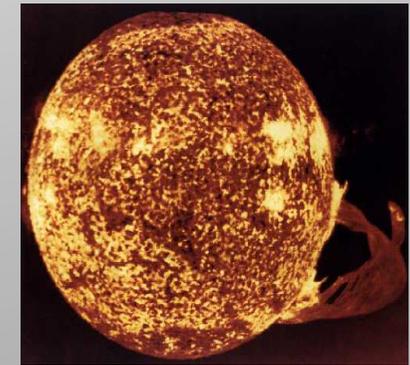
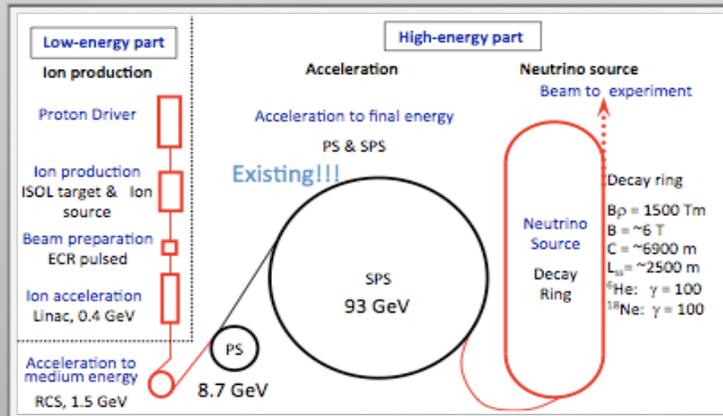
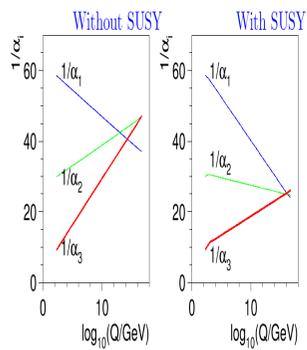
New megaton class, multipurpose detectors will allow to study these fundamental questions

Particle physics

Proton decay
 θ_{13}
CP-violation

Neutrino astronomy

Supernova neutrinos
Diffuse SN neutrinos
Atmospheric Neutrinos
Solar neutrinos
Dark matter annihilation
Geo-neutrinos...





... In a



Large Apparatus for Grand Unification and Neutrino Astrophysics

2008 - 2011

1,7 M€ from EU

7 candidate sites:

- Boulby
- Fréjus
- Caso
- LSC
- Pyhäsalmi
- Sunlab
- IFIN-HH



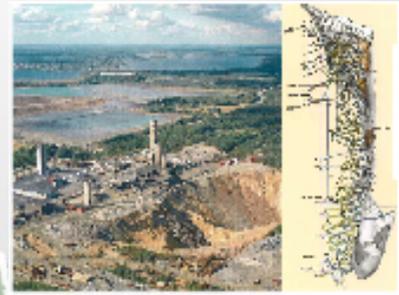
Boulby mine
1050 Km



130 Km



630 Km



2300 Km, Pyhäsalmi



SUNLAB
950 Km



Unirea Salt Mine



CASO, 659 Km

LENA

MEMPHYS

60 – 100 m

65 m

~ 440 ktons fiducial mass

Water Čerenkov

GLACIER

Liquid Argon

~ 100 ktons fiducial mass

70 m

Liquid Scintillator

~ 50 ktons fiducial mass

100 m

- ✓ Laguna => very comprehensive evaluation of all sites, construction and costs
- ✓ Laguna => baselines from 130 km to 2300 km available in Europe = advantage
- ✓ Laguna => allowed to form a strong community in Europe (> 100 physicists and Ing.)
- ✓ Laguna => showed the need to evaluate constraints and costs for the detector options



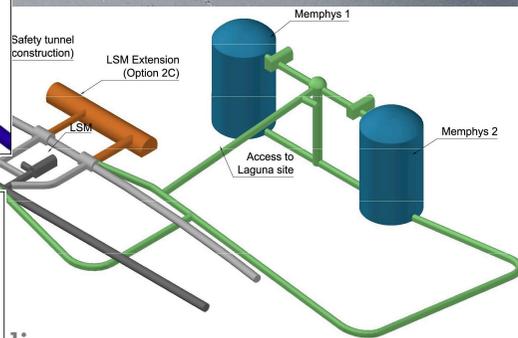
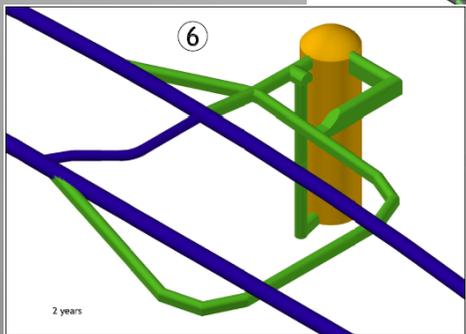
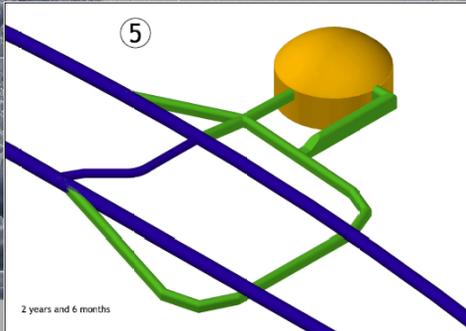
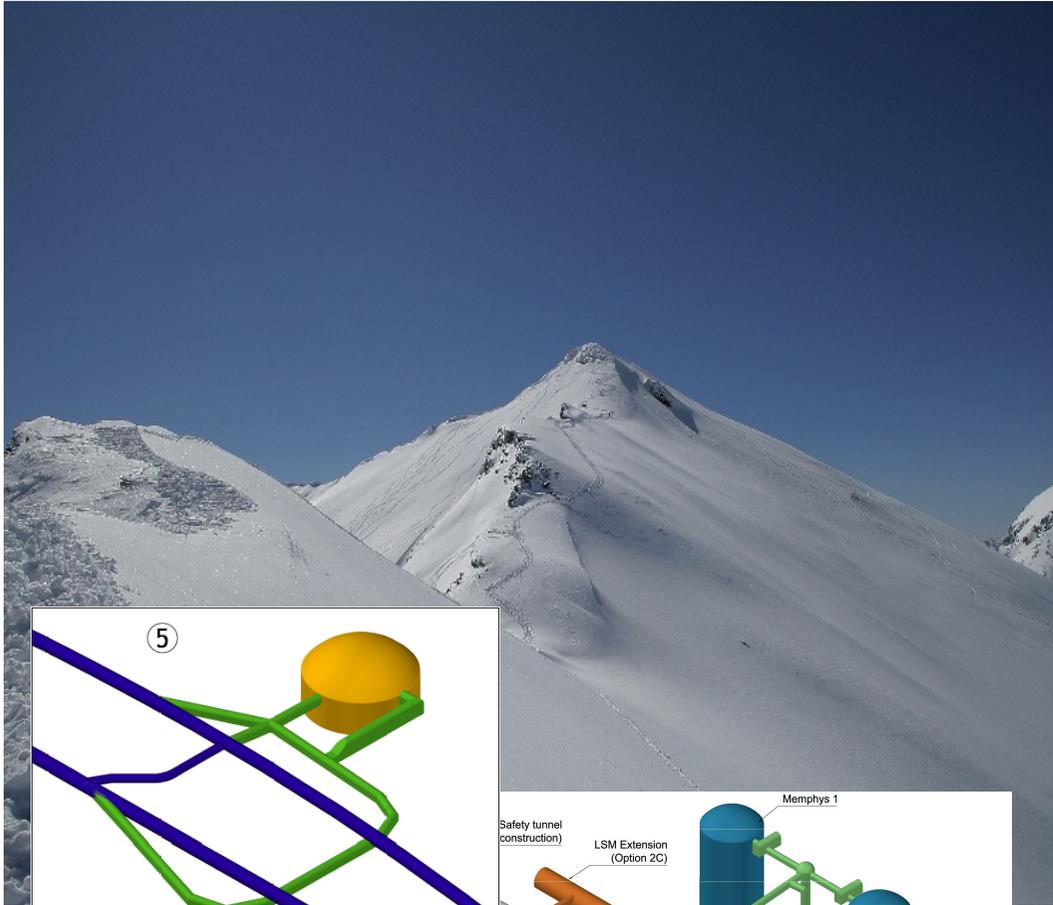
New program: Laguna-LBNO (one of the two fully financed by EC, 5M€)
Start September 2011 – End September 2014

- Laguna-LBNO: evaluate costs for detector construction and long term running (> 30y)
- Laguna-LBNO: investigates complementary beam options from CERN
- Laguna-LBNO: deep study of physics potential for the combination detector/site
- Laguna-LBNO: strengthens the community even more:
> 250 physicists, 13 countries, 39 beneficiaries

Focus on 3 options:

1. Shortest baseline (130 km), CERN -> Fréjus: no matter effects; clean measurement of LCPV
2. Longest baseline (2300 km), CERN -> Pyhhäsalmi: matter effect; mass hierarchy, LCPV
3. (Existing CNGS beam (650 km), CERN -> Umbria)

Fréjus Tunnel

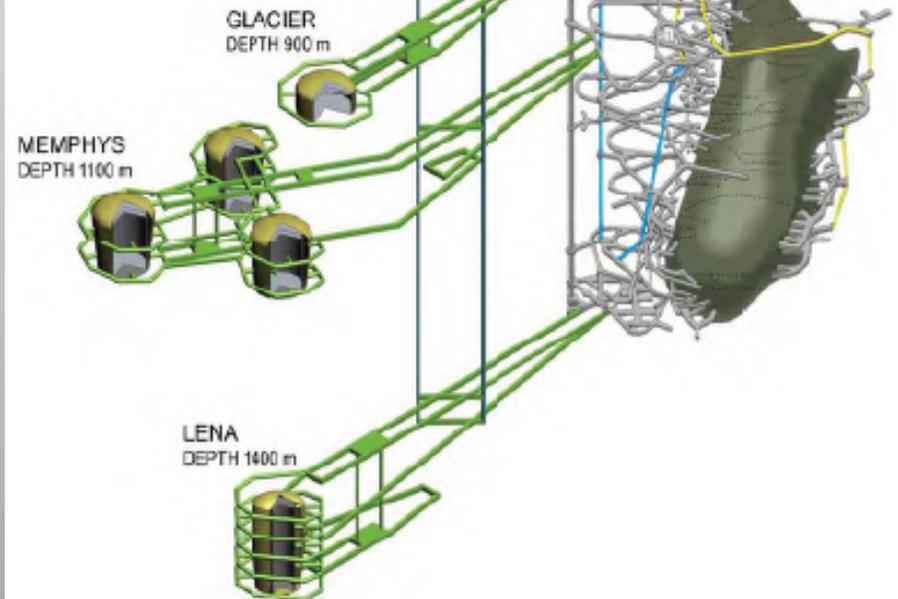


Pyhäsalmi Mine

LAGUNA infrastructure at site

2500-4000 m.w.e

two dedicated shafts foreseen

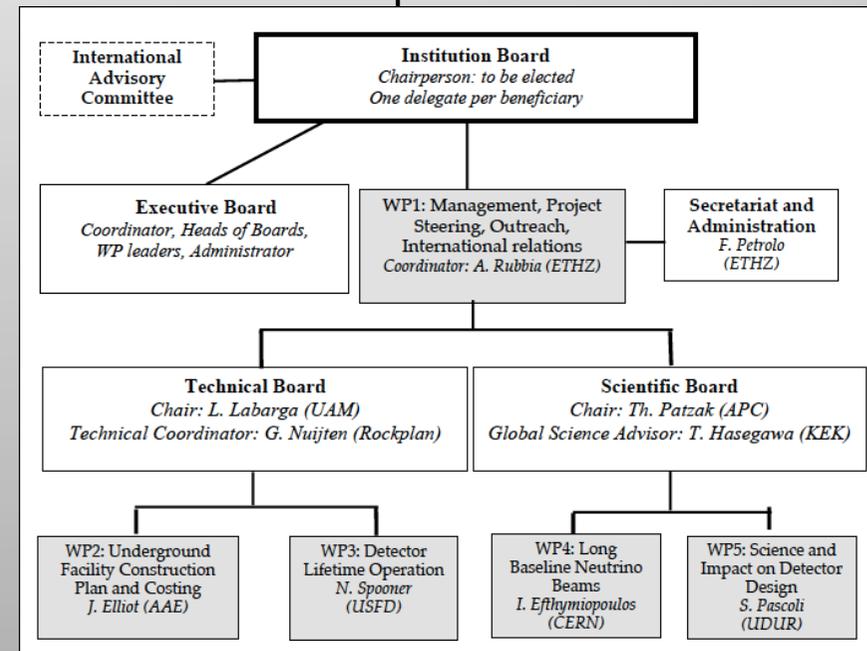
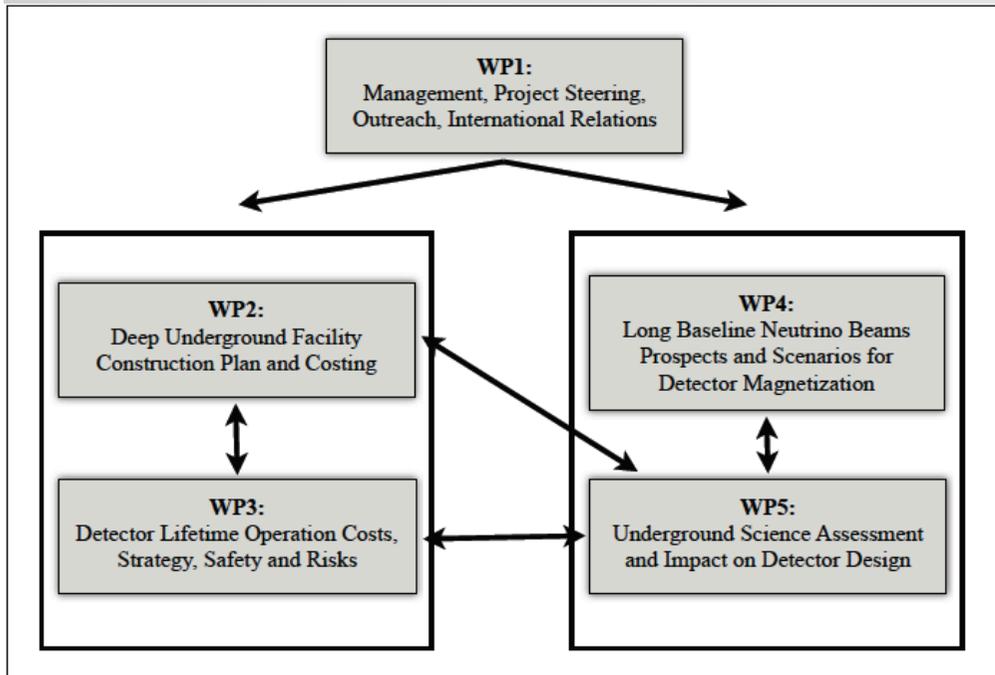


Laguna-LBNO: Pan European Infrastructure for Large Apparatus Studying Grand Unification, Neutrino Astrophysics and Long Baseline Neutrino Oscillations

New FP7 2010 DS starting September 1st 2011

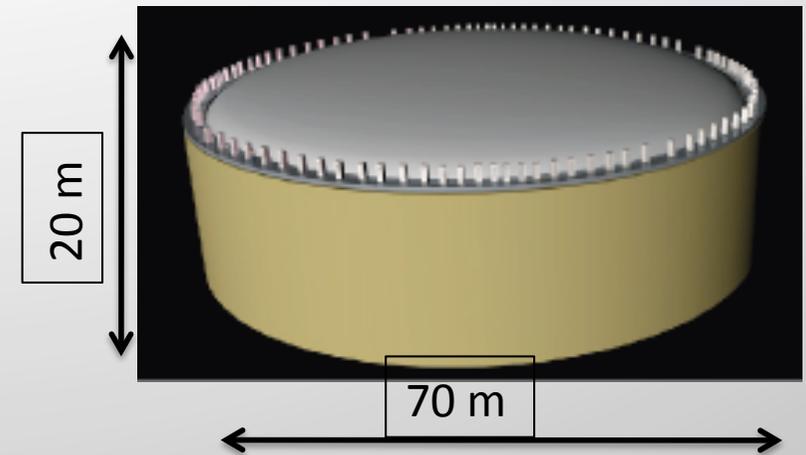
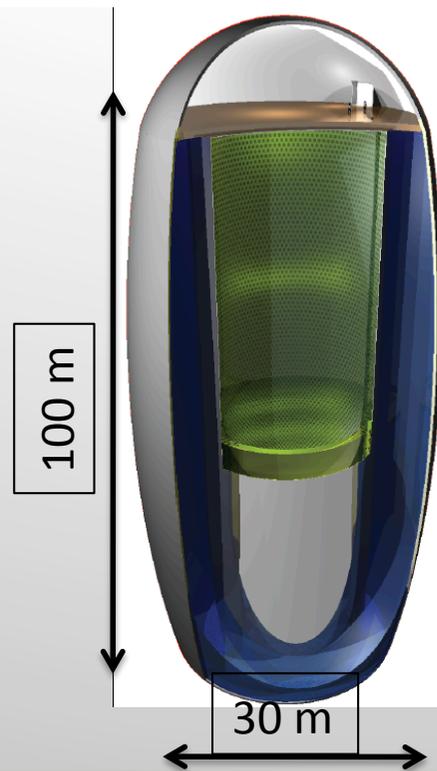
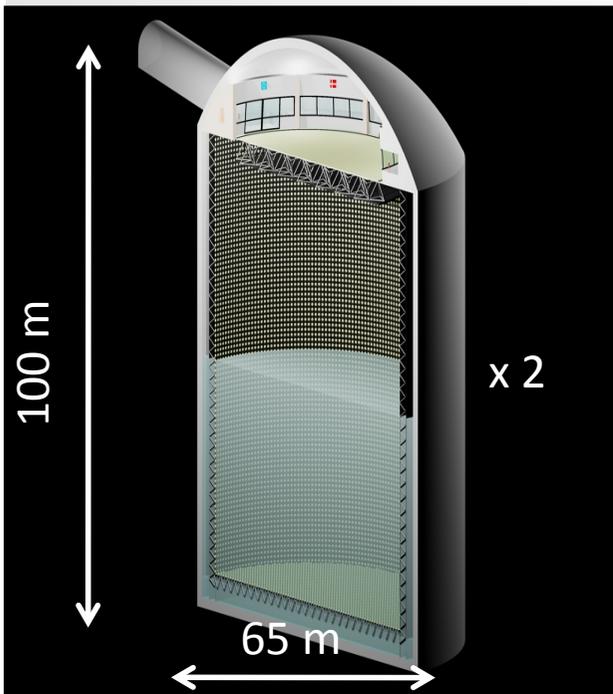
250 participants:

- Universities & nat. labs
- CERN
- Industrial partners



Focus on 3 options:

1. Shortest baseline (130 km), CERN -> Fréjus: no matter effects; clean measurement of LCPV
2. Longest baseline (2300 km), CERN -> Pyhhäsalmi: matter effect; mass hierarchy, LPCV
3. (Existing CNGS beam (650 km), CERN -> Umbria)



Memphys

2 x 330 kt
220'000 8" or 10" PMT's

QE > 25%
DR 1 to 300 p.e.
Time resolution 1 ns
Low after pulsing
Pressure 10 bars
Lifetime > 30 y

LENA

50 kt
55'000 8" PMT's

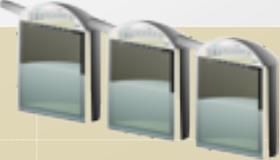
QE > 25%
DR 0.2 MeV to 10 GeV
Time resolution < ns
Low after pulsing
Pressure 15 bars
Lifetime > 30 y

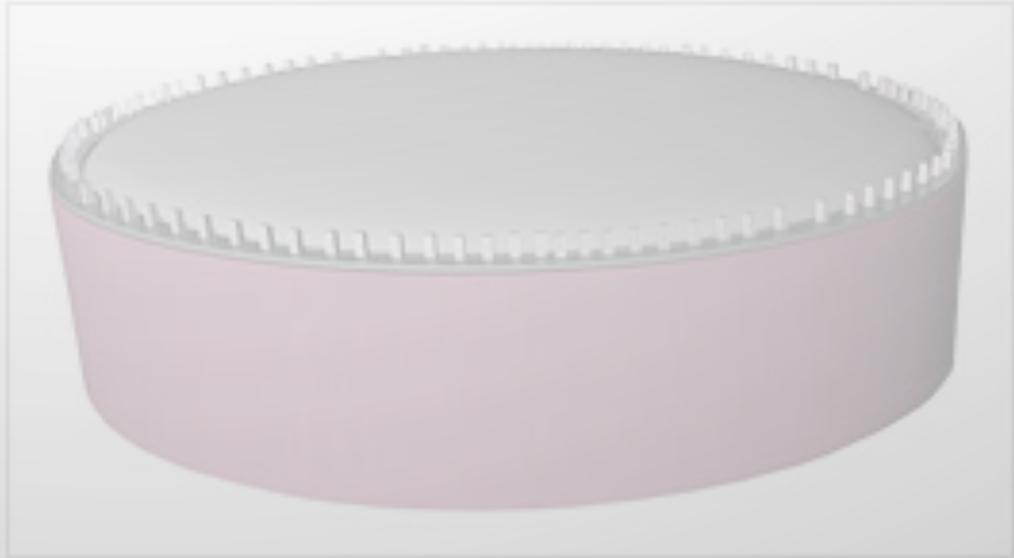
Glacier

100 kt
1'000 8" WLS-coated cryo PMT's
27'000 cryogenic PMT's

QE > 25%
Time resolution 0 ns
Lifetime > 30 y cryogenic!

Outstanding physics goals

	 GLACIER	 LENA	 MEMPHYS
Total mass	100 Kton	50 kton	500 Kton
$p \rightarrow e\pi^0$ in 10 y	0.5×10^{35} y $\epsilon = 45\%$, ~1 BG event	?	1.2×10^{35} y $\epsilon = 17\%$, ~1 BG event
$p \rightarrow \nu K$ in 10 y	1.1×10^{35} y $\epsilon = 97\%$, ~1 BG event	0.4×10^{35} y $\epsilon = 65\%$, <1 BG event	0.15×10^{35} y $\epsilon = 8.6\%$, ~30 BG events
SN cool off at 10 Kpc	38·500 (all flavors) (64·000 if NH-L mixing)	20·000 (all flavors)	194·000 (mostly $\nu_e p \rightarrow e + n$)
Sn in Andromeda	7 - (12 if NH-L mixing)	4 events	40 events
SN burst at 10 Kpc	380 ν_e CC (flavor sensitive)	~ 30 events	~ 250 ν -e elastic scattering
DSN	50	20-40	250 (2500 with Gd)
Atm. neutirnos	~1·100 events/y	5600/y	56·000 events/y
Solar neutrinos	324·000 events/y	?	91·250·000/y
Geo-neutirnos	0	~ 3·000 events/y	0



Merci!
C'est a vous!

