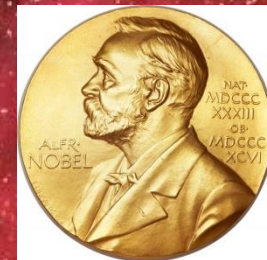


L'oscillation des neutrinos: de Bruno Pontecorvo au Prix Nobel 2015

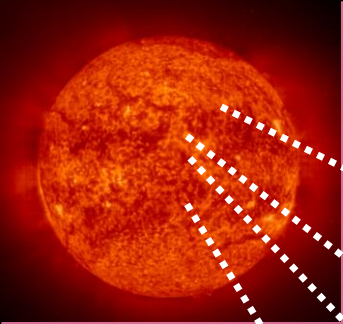


L'oscillation des neutrinos: de Bruno Pontecorvo au prix Nobel 2015

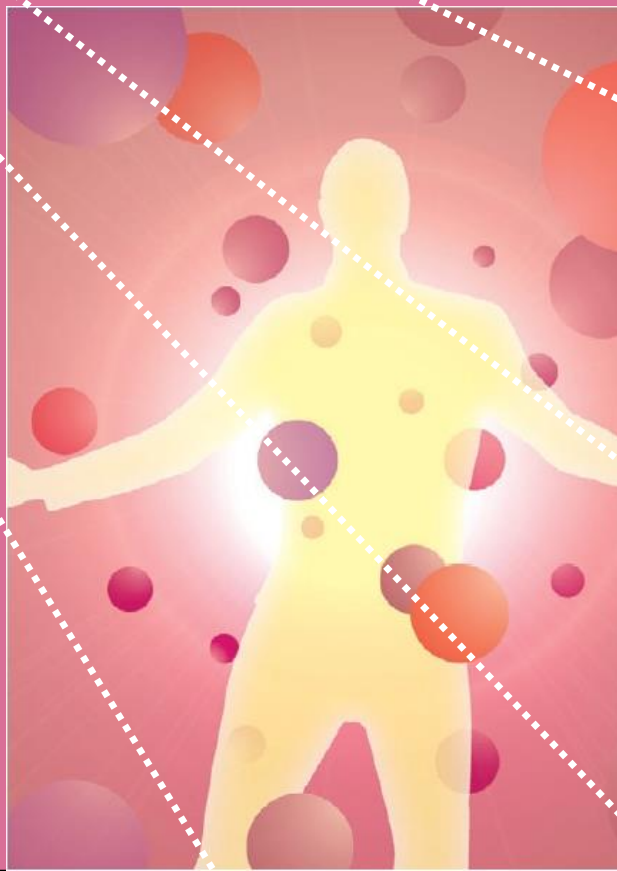
- Les neutrinos : histoire et propriétés
- L'oscillation des neutrinos : Pontecorvo (1957-1968)
- Les neutrinos solaires (1968-2001)
- Les neutrinos « atmosphériques » (1980-1998)
- Le prix Nobel 2015
- En guise de conclusion

L'oscillation des neutrinos: de Bruno Pontecorvo au prix Nobel 2015

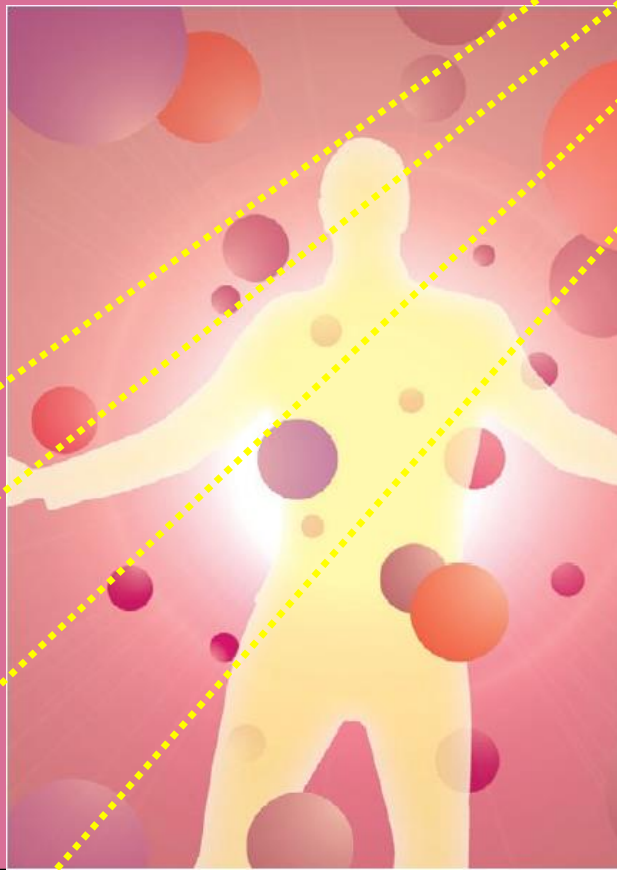
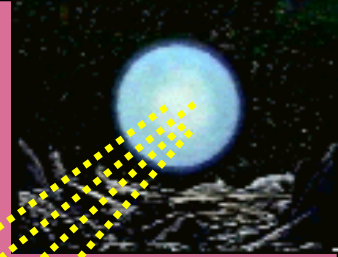
- **Les neutrinos : histoire et propriétés**
- L'oscillation des neutrinos : Pontecorvo (1957-1968)
- Les neutrinos solaires (1968-2001)
- Les neutrinos « atmosphériques » (1980-1998)
- Le prix Nobel 2015
- En guise de conclusion



65 milliards ν par cm^2 par seconde



23 février 1987
7h35 T.U.

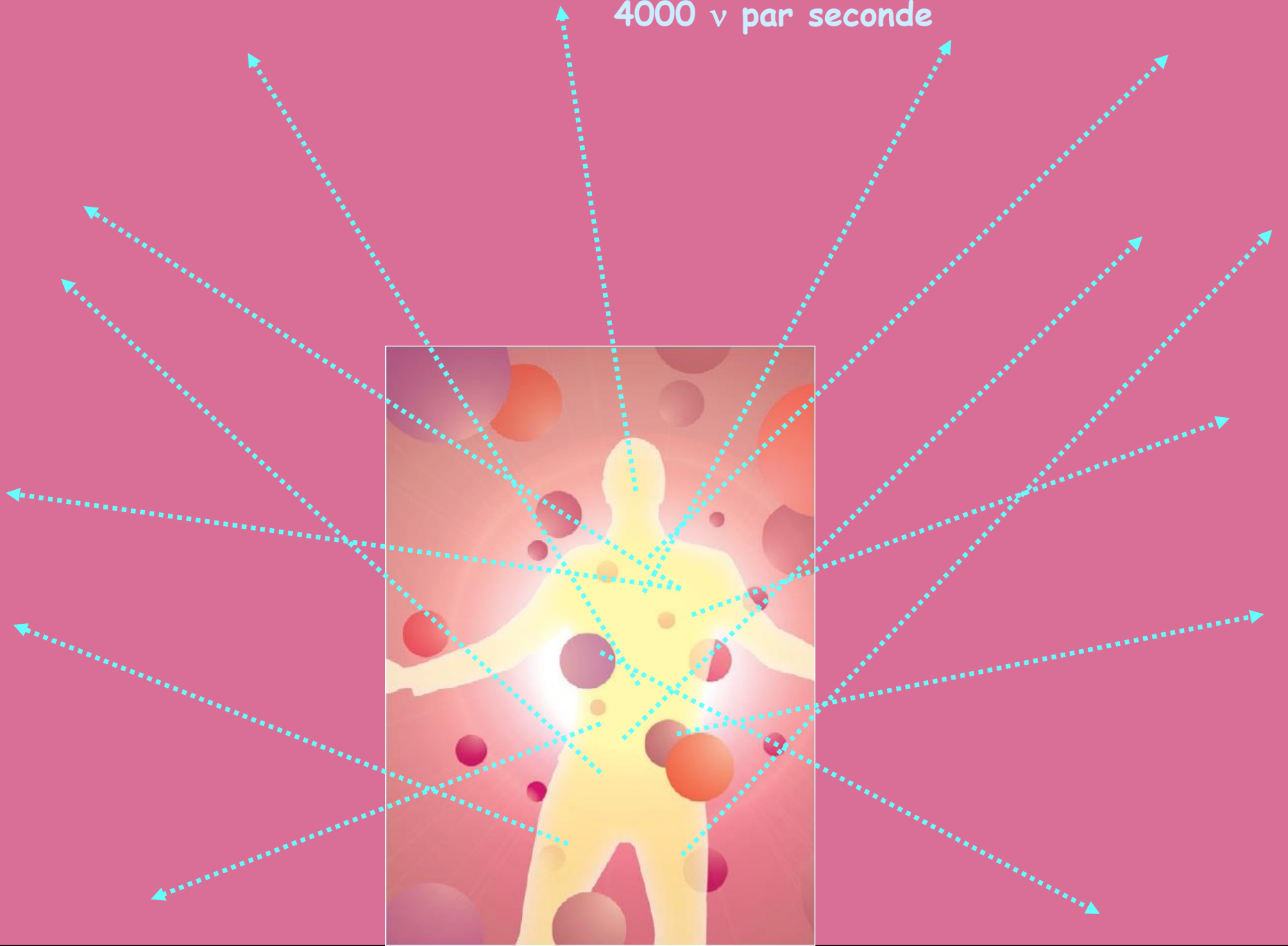


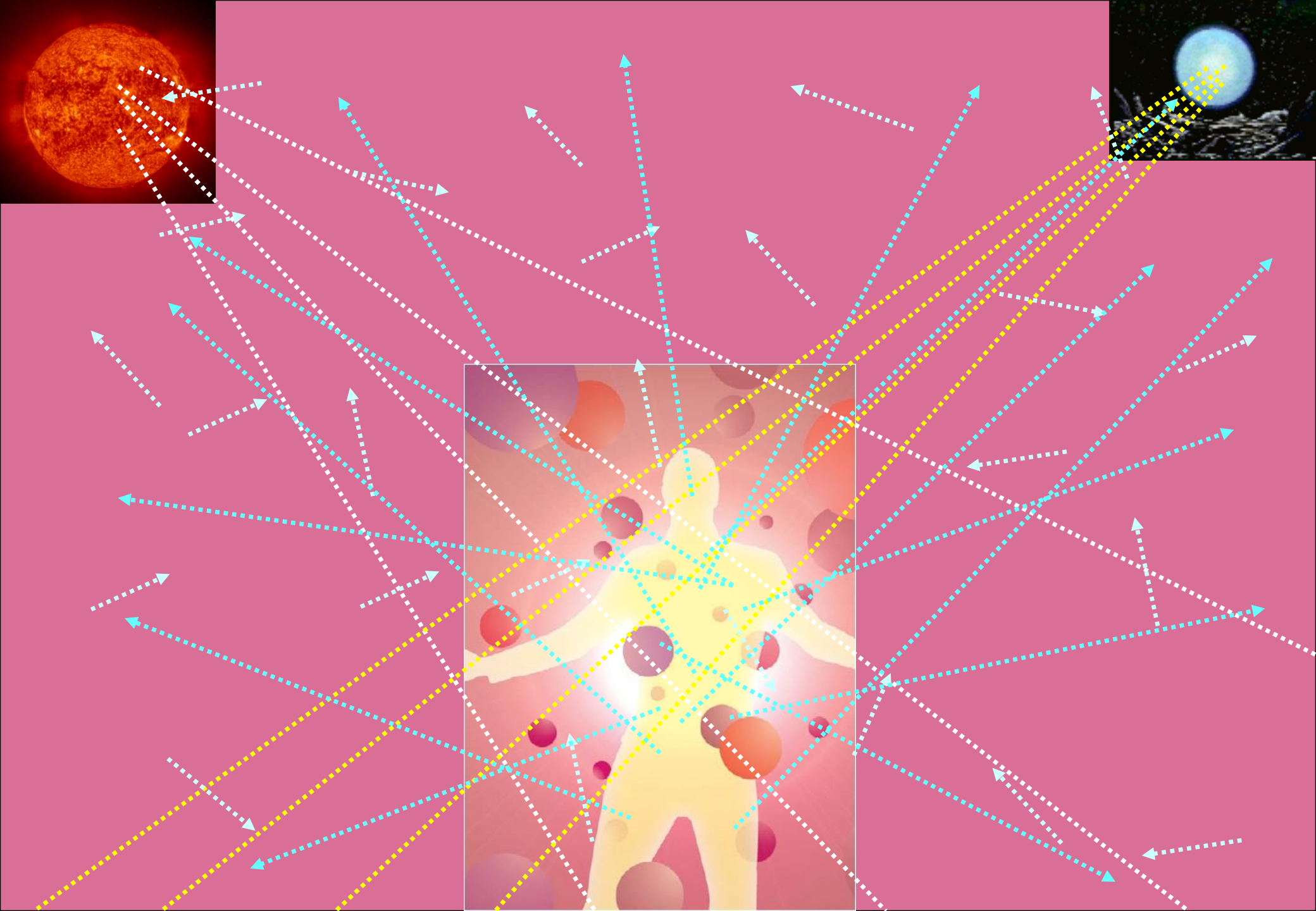
quelques millions
de milliards
de ν en 10 s

300 neutrinos fossiles par cm^3

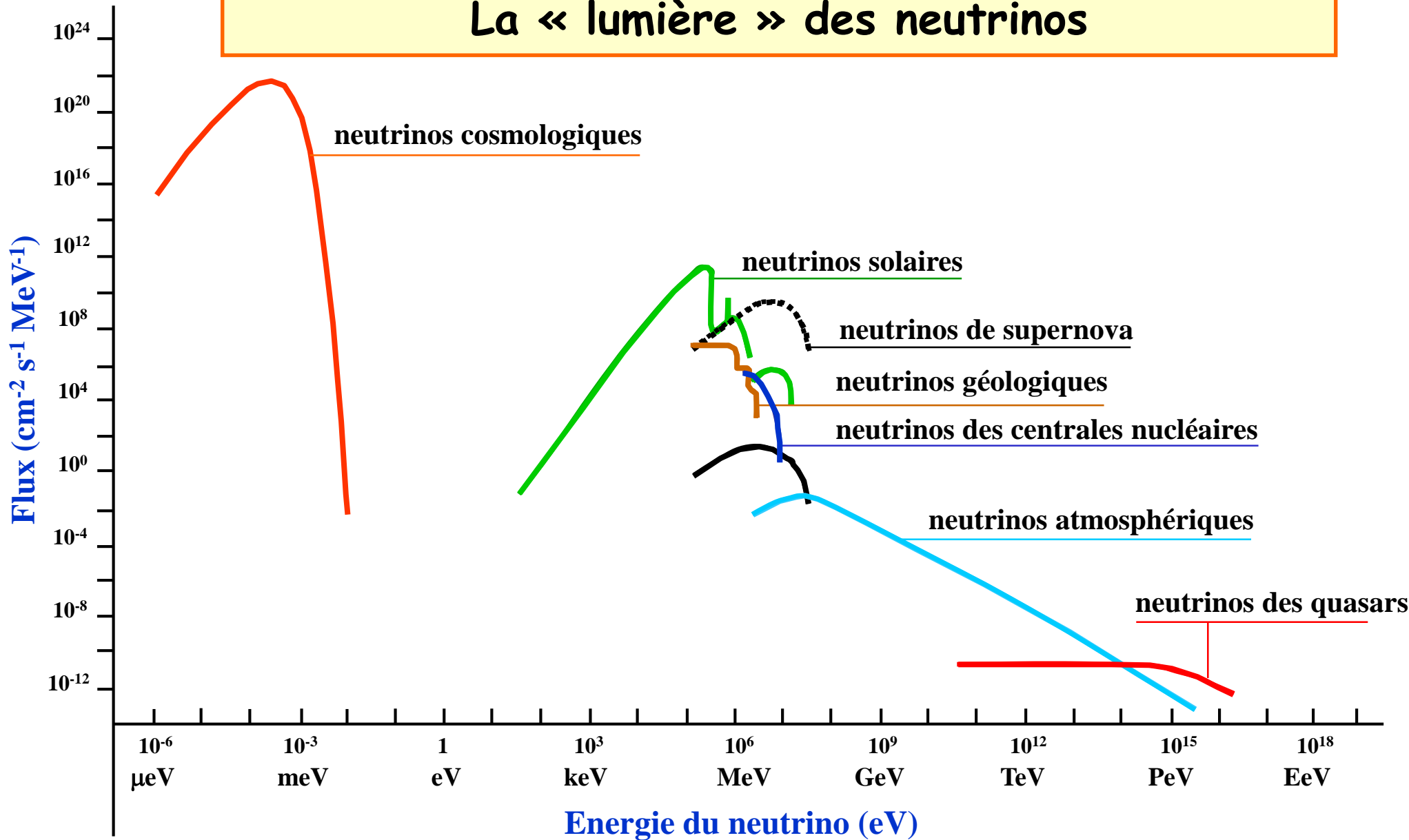


4000 v par seconde

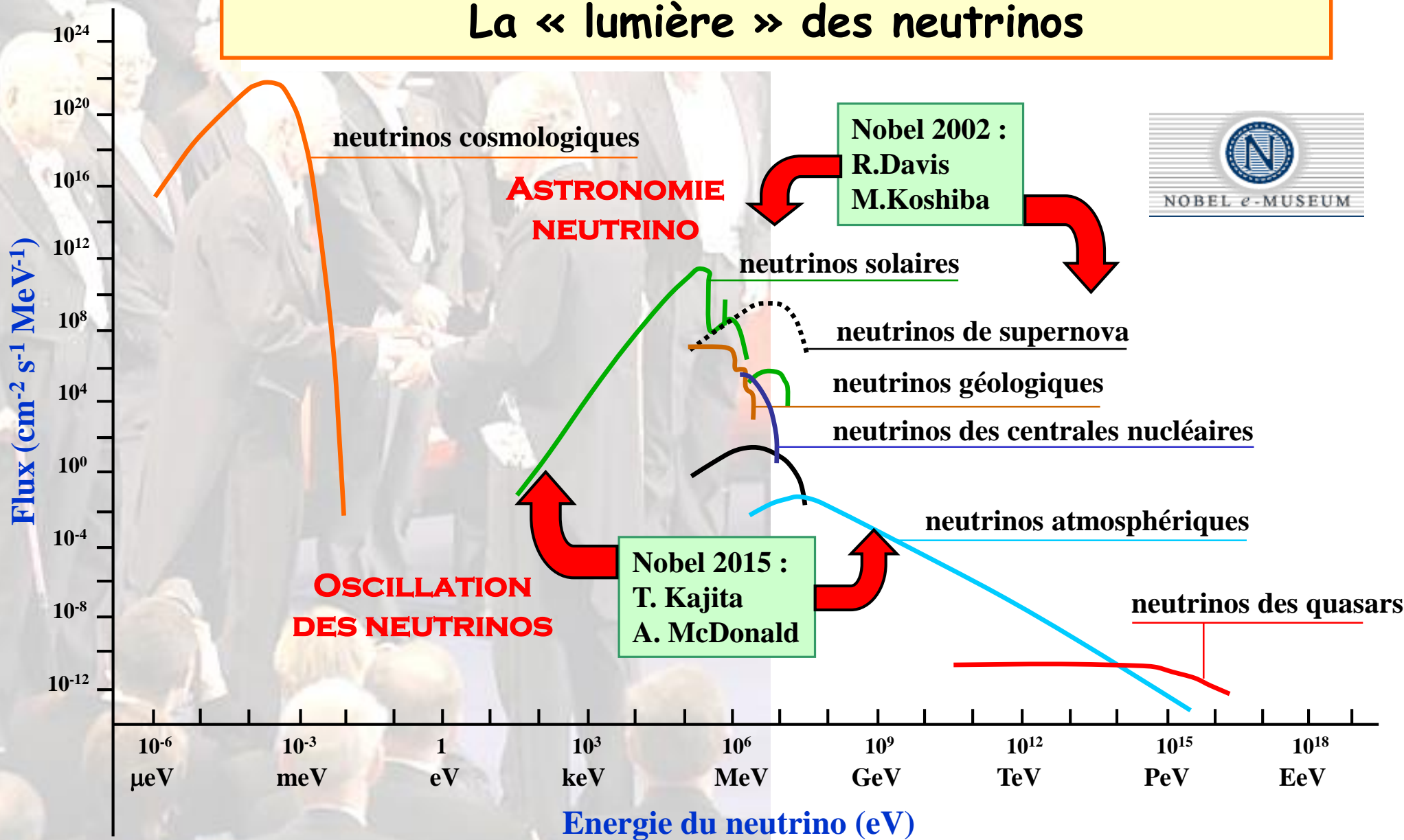




La « lumière » des neutrinos

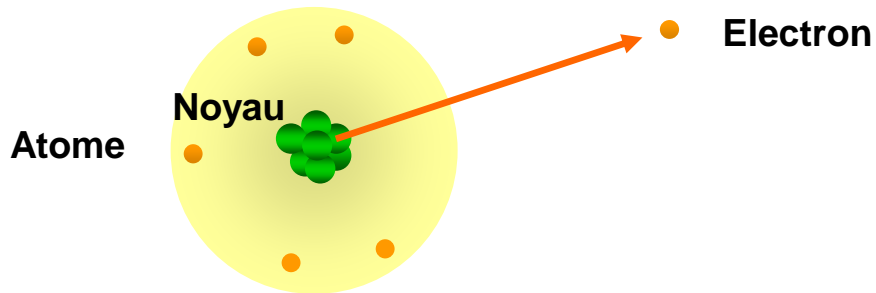


La « lumière » des neutrinos



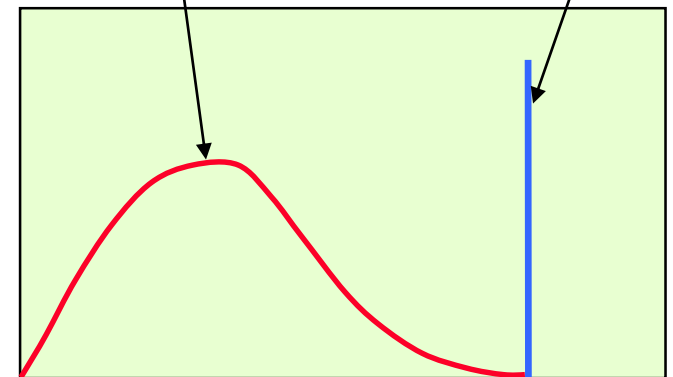
Pourquoi les neutrinos ?

1930 : La radioactivité β
présente une anomalie !



ce qui est observé
[J. Chadwick - 1914]

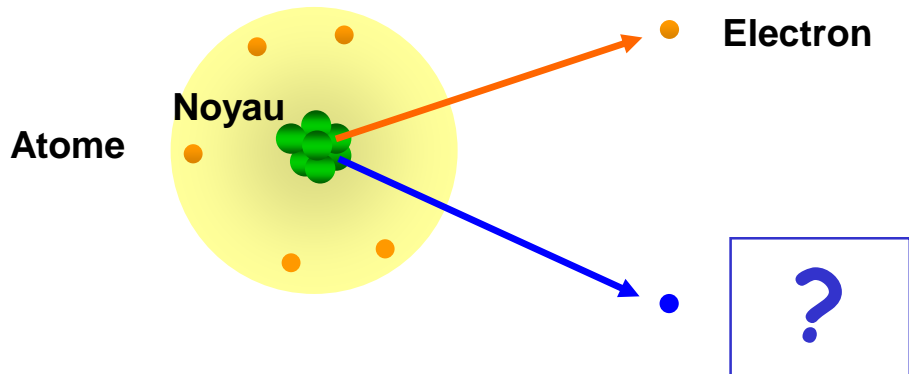
ce qui **DEVRAIT**
être observé !!!



Energie de l'électron

Pourquoi les neutrinos ?

1930 : La radioactivité β présente une anomalie !



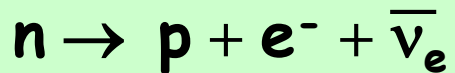
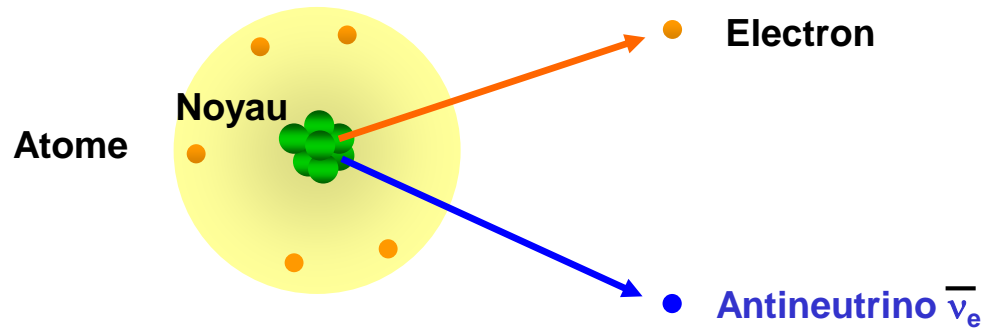
Décembre 1930 : Idée géniale de Wolfgang Pauli !



Il existe une particule inconnue qui emporte l'énergie manquante !

Pourquoi les neutrinos ?

1930 : La radioactivité β présente une anomalie !



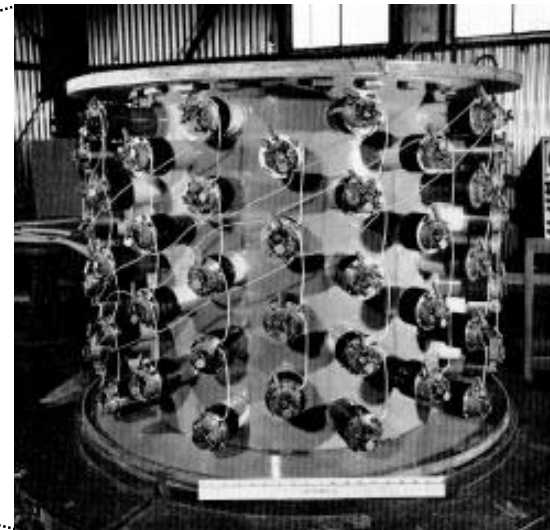
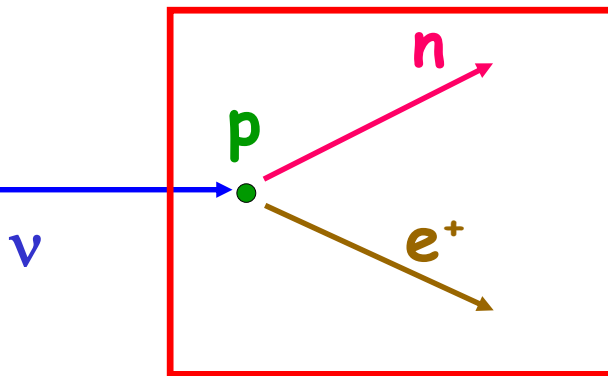
Décembre 1930 : Idée géniale de Wolfgang Pauli !



1933 : Enrico Fermi baptise cette particule neutrino (le « petit neutre »)

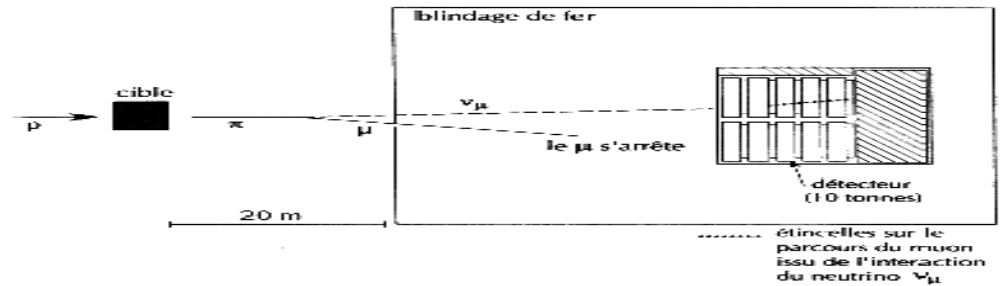
Le neutrino : un peu d'histoire (1)

- 1956 : Reines et Cowan mettent en évidence le neutrino auprès du réacteur nucléaire de Savannah River (il s'agit en fait de l'antineutrino électron $\bar{\nu}_e$)



Le neutrino : un peu d'histoire (2)

- **1962** : Brookhaven -
Découverte d'une deuxième espèce de neutrinos, les neutrinos muons ν_μ .

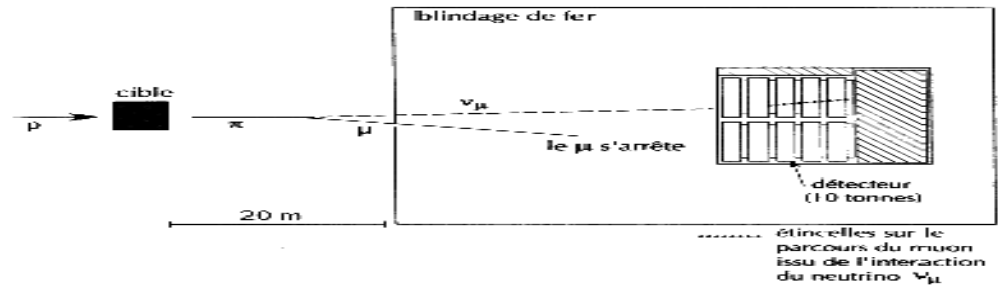


Idée de l'expérience (1960) :
Melvin Schwarz (Brookhaven)
et, un peu avant...
mais derrière le rideau de fer :
Bruno Pontecorvo (Dubna) (1959)

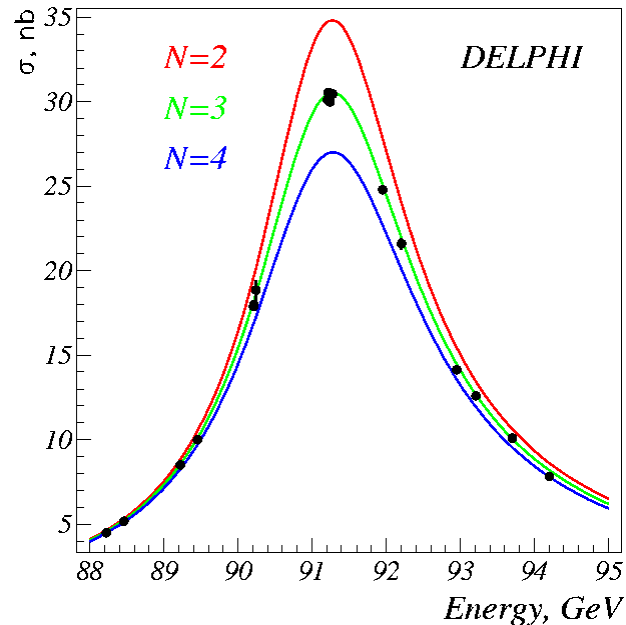


Le neutrino : un peu d'histoire (2)

- **1962** : Brookhaven -
Découverte d'une deuxième
espèce de neutrinos, les
neutrinos muons ν_μ .

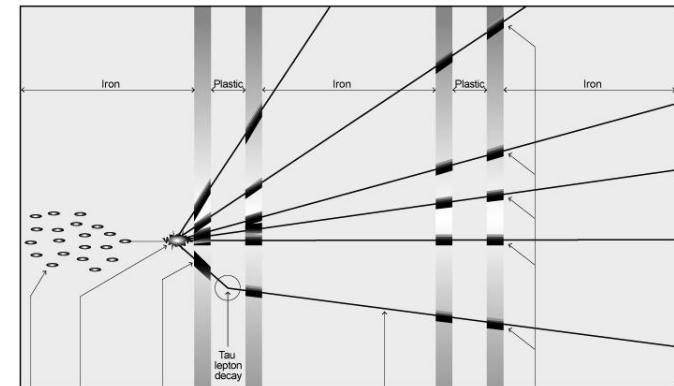


- **1990** : CERN -
Le LEP démontre
qu'il existe 3 (et
3 seulement)
familles de ν .



- **2000** : Fermilab - **Mise**
en évidence du ν_τ .

Detecting a Tau Neutrino

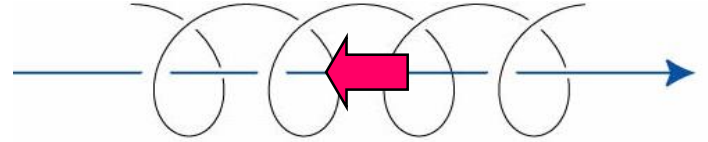




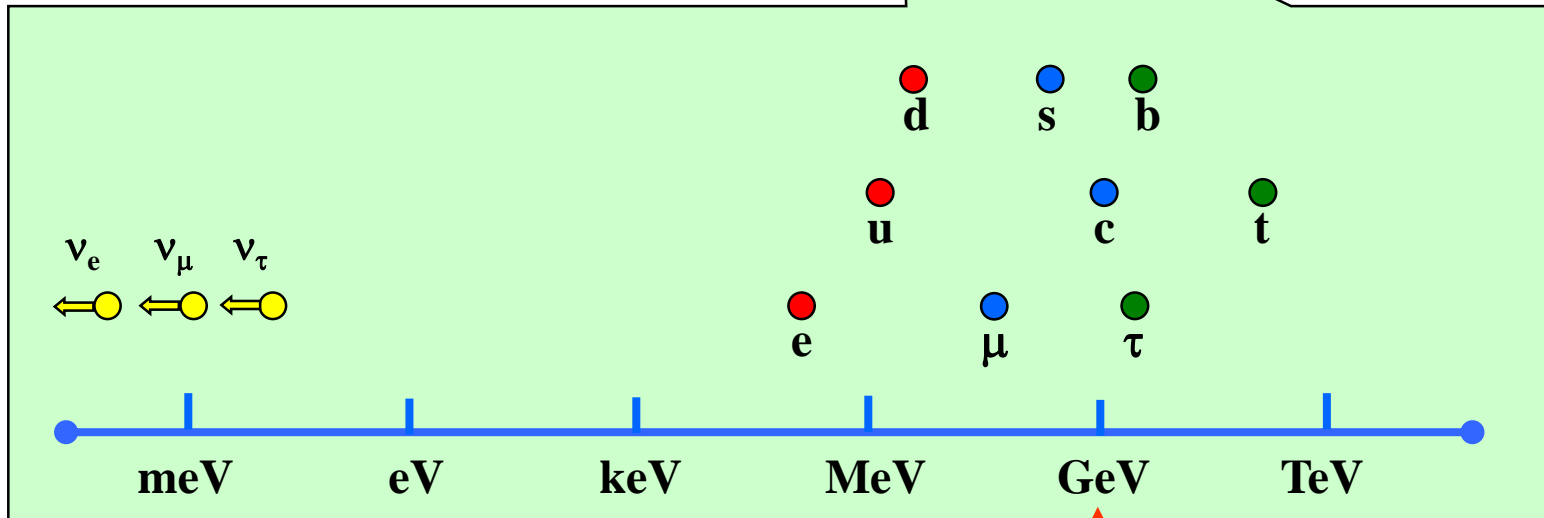
Carte d'identité

- Spin : $1/2$

- Hélicité



- Masse : $0 ?$

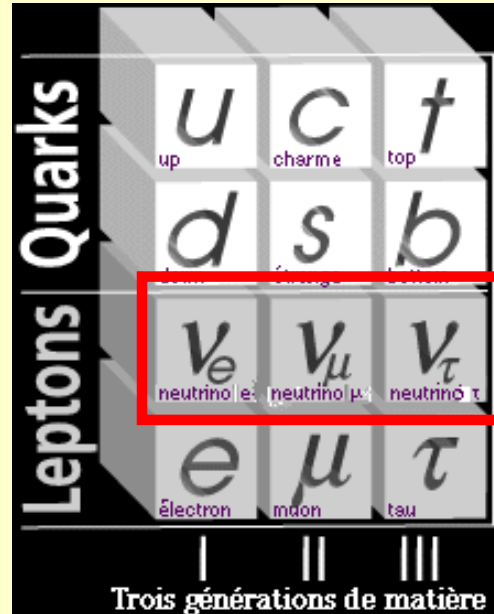


Masse du proton

1 GeV
 $1,6 \cdot 10^{-27}$ kg

Les particules élémentaires

Particules de matière



interaction

FORTE

faible

électromagnétique

Particules de force

- photon γ (i. électromagnétique)
- W et Z (i. faible)
- gluon (i. FORTE)

Comment les ν interagissent ?

Très faiblement !

proton de 1 GeV

10^{-26} cm^2

INTERACTION
FORTE

électron de 1 GeV

10^{-28} cm^2

INTERACTION
électromagnétique

⇒ Pour les piéger, il faut

1. Beaucoup de neutrinos
2. Des gros détecteurs
3. Des laboratoires souterrains

neutrino de 1 GeV

10^{-40} cm^2

INTERACTION
faible

L'oscillation des neutrinos: de Bruno Pontecorvo au prix Nobel 2015

- Les neutrinos : histoire et propriétés
- **L'oscillation des neutrinos : Pontecorvo (1957-1968)**
- Les neutrinos solaires (1968-2001)
- Les neutrinos « atmosphériques » (1980-1998)
- Le prix Nobel 2015
- En guise de conclusion

L'oscillation des neutrinos

1957 : On ne connaît alors qu'une seule famille de neutrinos. B. Pontecorvo prédit que **les neutrinos peuvent osciller entre « neutrino et antineutrino »** !

1967 : Pontecorvo discute la possibilité que **les neutrinos puissent osciller entre les familles** (2 familles, ν_e et ν_μ , connues à l'époque).

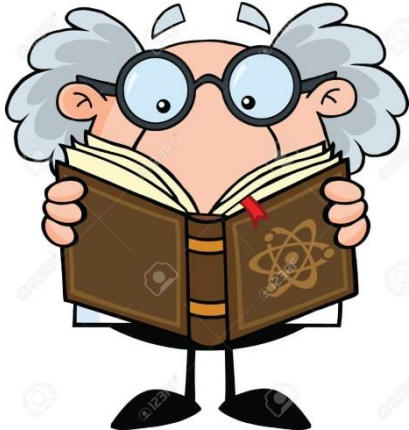
1969 : **Formalisation phénoménologique** du mécanisme d'oscillation, avec V. Gribov. **Implique que les neutrinos aient une masse!**

Mais qui est Pontecorvo ?

L'oscillation des neutrinos

Qui est Bruno Pontecorvo ?

En 2015 est paru un livre de Frank Close:
« The divided life of Bruno Pontecorvo, physicist or spy »



L'oscillation des neutrinos



Qui est Bruno Pontecorvo ?



1913 : naissance à Pise (famille juive)

1931 : intègre le laboratoire de Fermi à Rome

1936 : émigre à Paris - labo de Joliot-Curie (devient communiste)

1940 : émigre aux USA - prospection pétrolière

1943 : Canada : Montreal & Chalk River - premiers travaux sur les neutrinos

1948 : Angleterre (Harwell)

Août 1950 : disparaît mystérieusement avec sa famille lors de vacances à

Rome : aucune nouvelle à l'Ouest pendant 5 ans!

Mars 1955 : réapparaît à Moscou lors d'une conférence de presse

1957, 1967, 1969, 1976 : formalisation de l'oscillation des neutrinos

1978 : première autorisation de voyager en Italie

1993 : décès à Dubna (Russie)



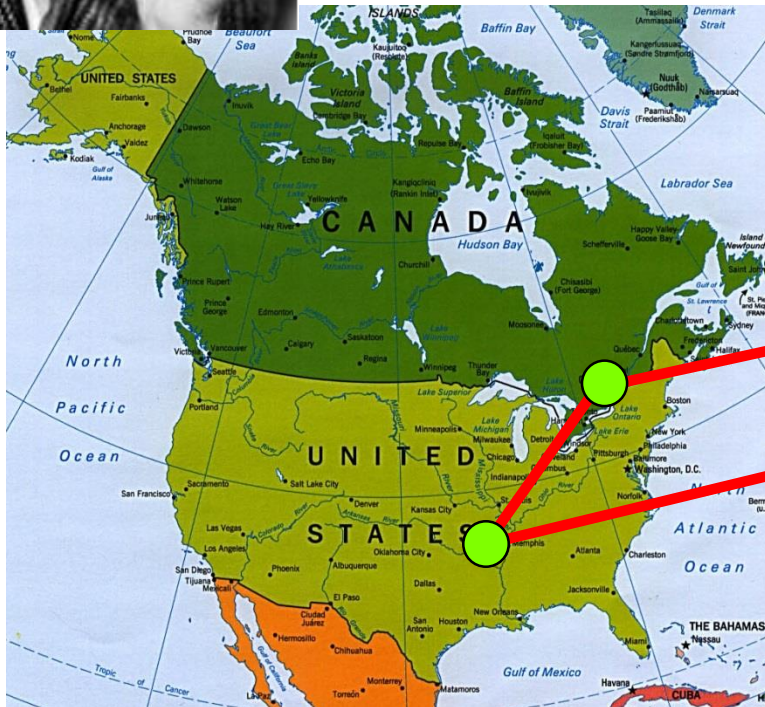


D'ouest en est !

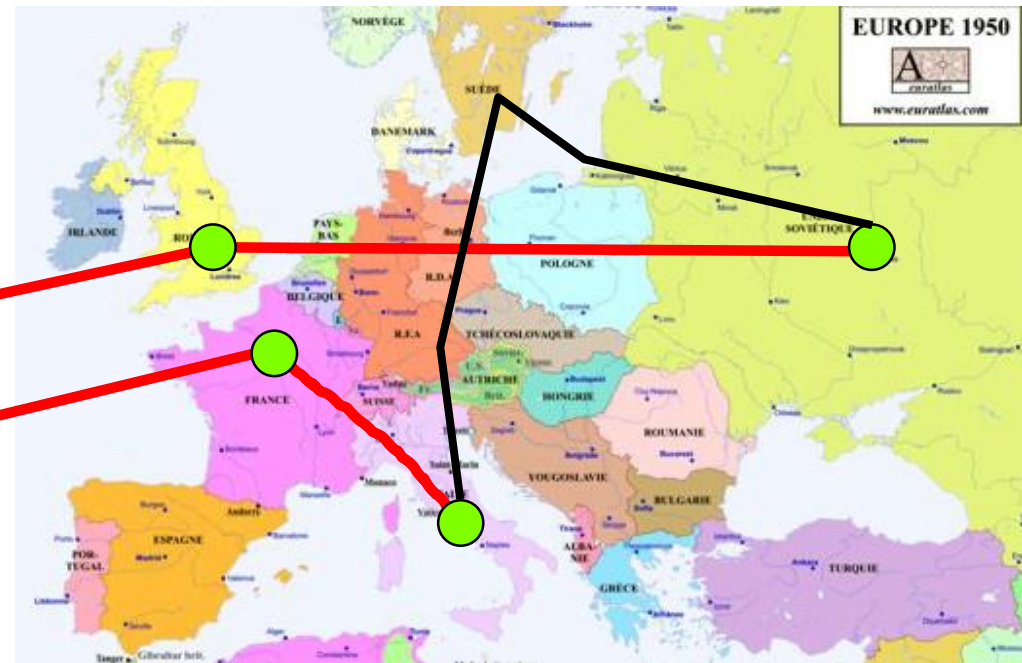
4. Montreal (1943-1948)

5. Harwell - Oxford (1949-1950)

6. Moscou - Dubna (1950-1993)

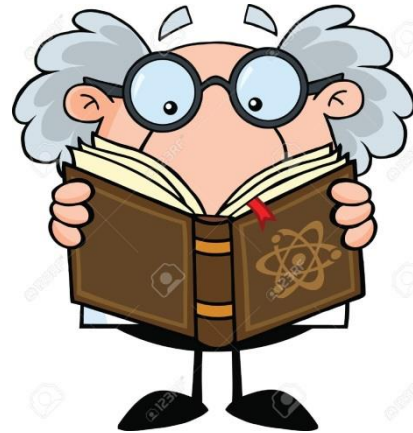


3. Tennessee (1941-1942)



2. Paris (1936-1940)

1. Rome (1932-1936)



PHYSICIEN ?

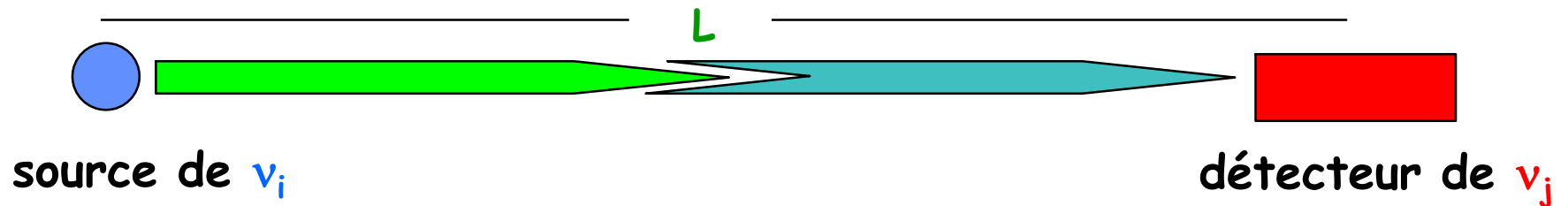
**TRÈS GRAND PHYSICIEN!
NOBÉLISABLE!**



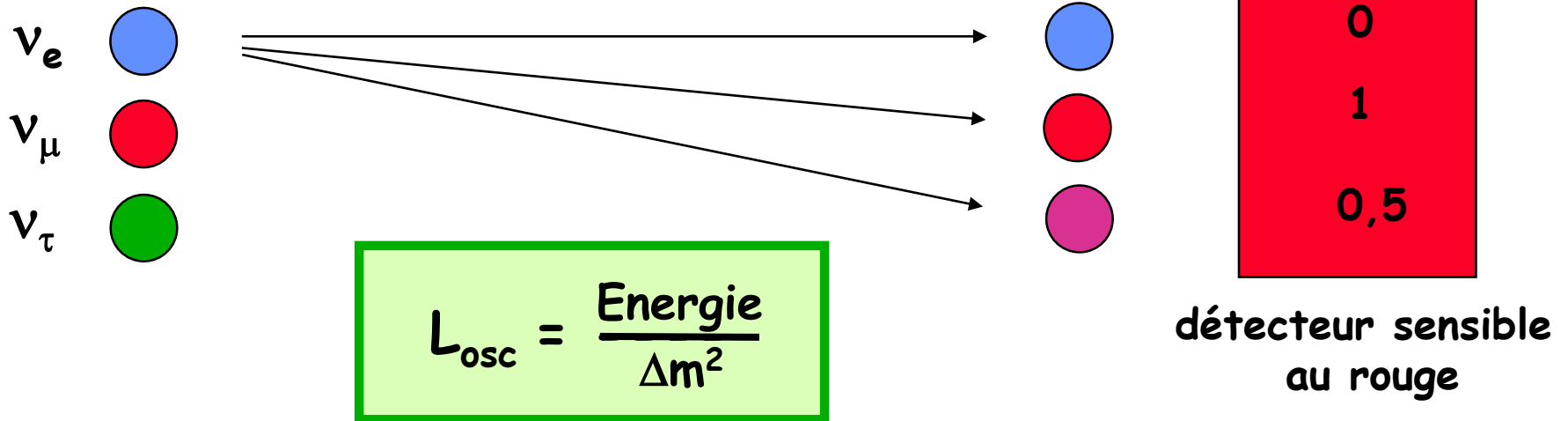
ESPION ?



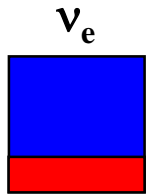
L'oscillation des neutrinos



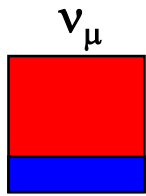
Si les neutrinos ont une masse, lorsqu'ils se déplacent, ils peuvent se transformer (plus ou moins totalement) d'une espèce dans une autre. Le phénomène est périodique en fonction de la distance L entre la source et le détecteur et prend le nom d'oscillations



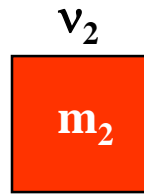
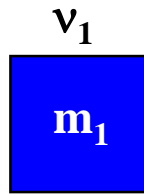
L'oscillation des neutrinos



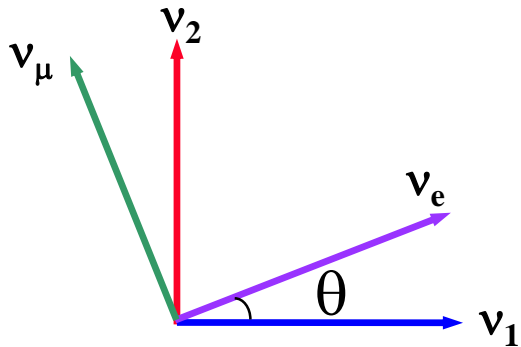
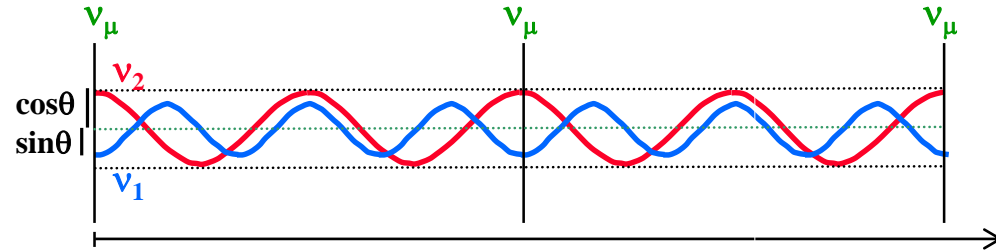
Etats propres de saveur



Etats propres de la masse

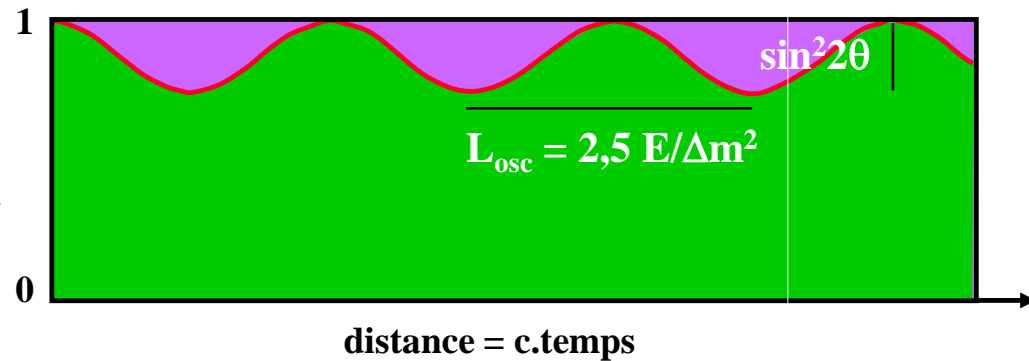


$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$



Apparition
 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e)$

Disparition
 $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu)$



$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = \sin^2 2\theta \sin^2 \pi \frac{L}{L_{osc}}$$

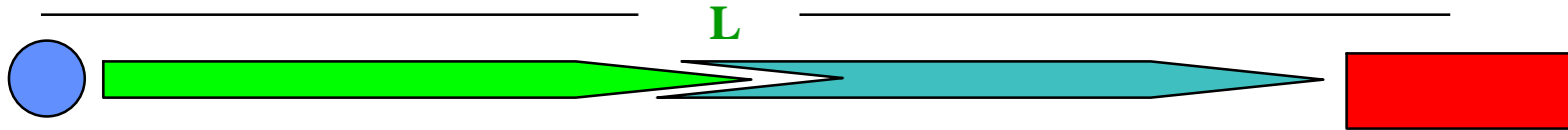
L'oscillation des neutrinos

Formalisme à
2 neutrinos :

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

m_1
 m_2

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



source de ν_i

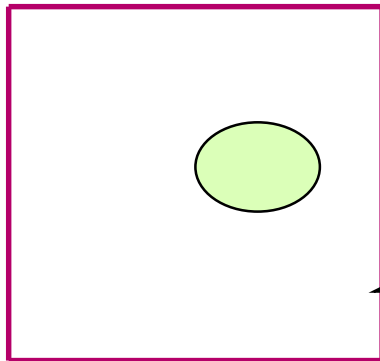
détecteur de ν_j

$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = \sin^2 2\theta \sin^2 \pi \frac{L}{L_{\text{osc}}}$$

angle de mélange

$$L_{\text{osc}} (\text{m}) = \frac{2.5 E_\nu (\text{MeV})}{\Delta m^2 (\text{eV}^2)}$$

Δm^2



mélange θ

En jouant sur les sources de ν d'énergie E et la distance L à laquelle on place le détecteur, on dispose de plusieurs réverbères pour explorer les paramètres.

L'oscillation des neutrinos

Il y a 3 saveurs de neutrinos,
mais RIEN n'impose que les neutrinos d'une saveur donnée
soient états propres de la masse (ou états propres de propagation)

Etats propres
de la saveur

$$\nu_l = \sum_m U_{lm} \nu_m$$

Etats propres
de la masse

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

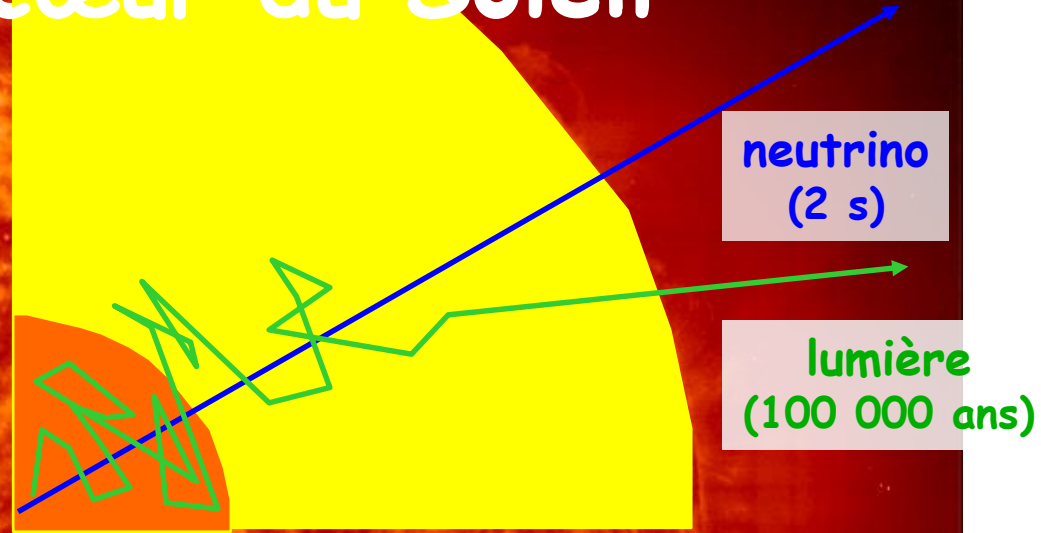
Matrice PMNS

Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata

L'oscillation des neutrinos: de Bruno Pontecorvo au prix Nobel 2015

- Les neutrinos : histoire et propriétés
- L'oscillation des neutrinos : Pontecorvo (1957-1968)
- **Les neutrinos solaires (1968-2001)**
- Les neutrinos « atmosphériques » (1980-1998)
- Le prix Nobel 2015
- En guise de conclusion

Voyage au cœur du Soleil



$T = 5800 \text{ K}$

Cœur

$T = 15 \text{ millions de K}$



Masse : $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

Diamètre : $1\,400\,000 \text{ km}$

150 millions km de la Terre
(8 minutes pour la lumière)

Composition :
74% hydrogène
24% hélium
2% autres éléments

Voyage au cœur du Soleil

Cœur

T = 15 millions de K

proton



+



deutérium

positron

e^+

+



+



neutrino

ν_e

proton



Réaction de fusion primordiale

Cycle compliqué de réactions nucléaires
Transformation d'hydrogène en hélium
... et production d'énergie

$3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$

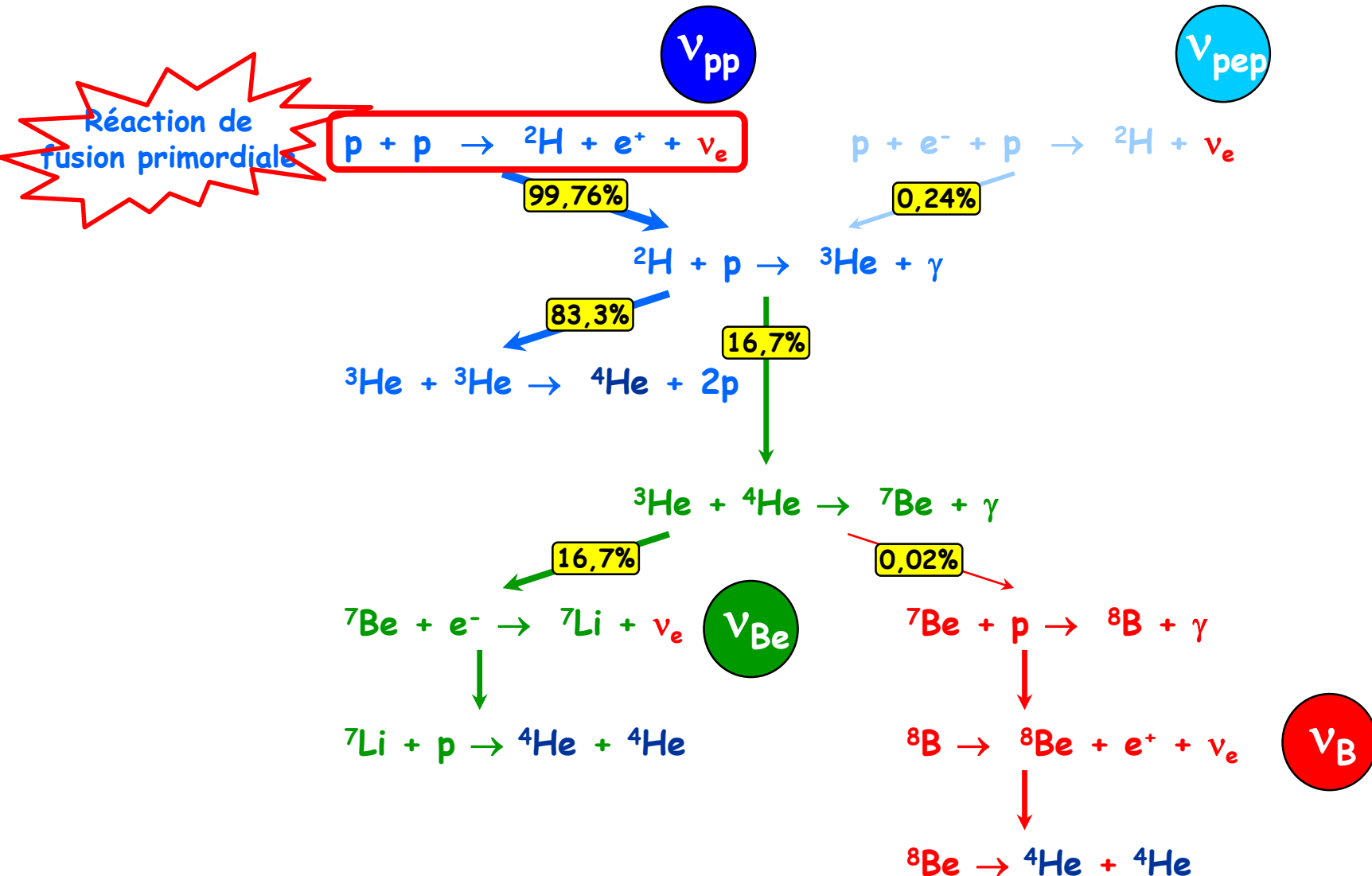
$$\Phi_{\nu} = 2 \frac{\text{Luminosité du Soleil}}{\text{Energie par réaction}} \frac{1}{4\pi d^2}$$

$4 \cdot 10^{-12} \text{ W}$

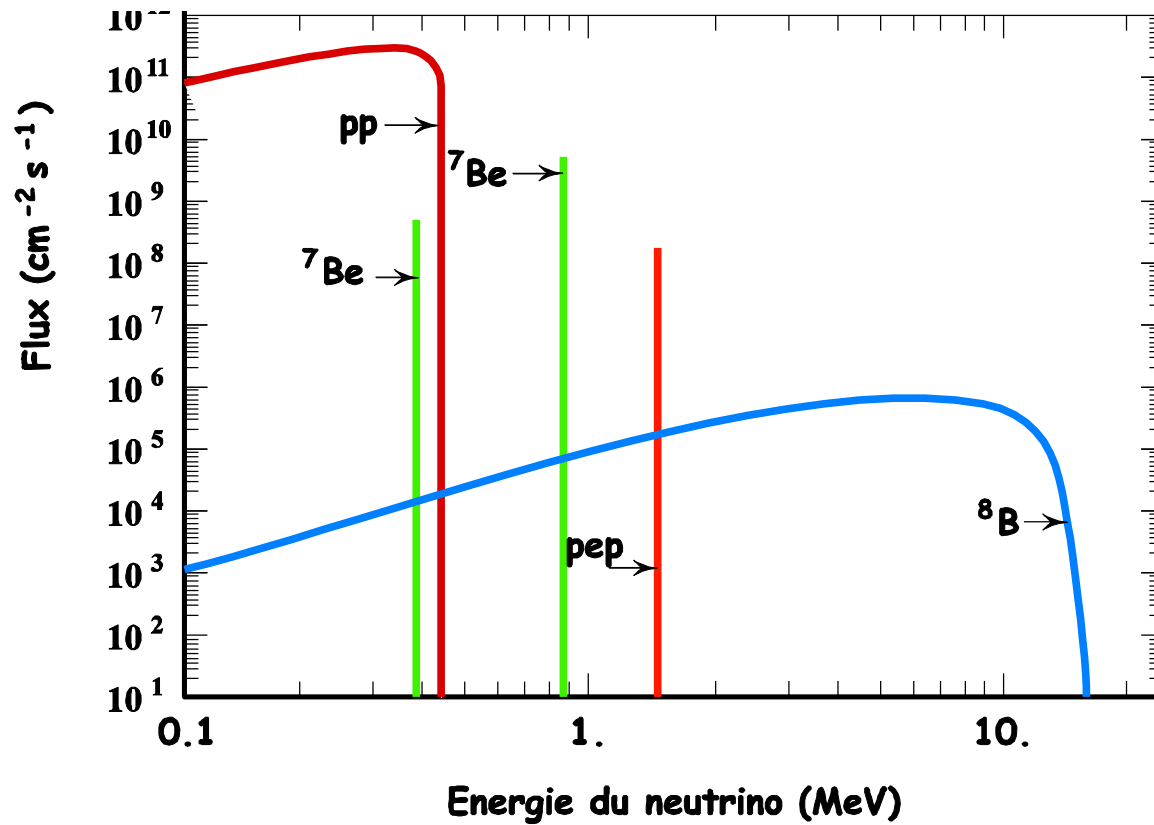
$1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$

65 milliards ν par cm^2 par seconde

Réactions nucléaires dans le Soleil



Flux de neutrinos solaires sur Terre

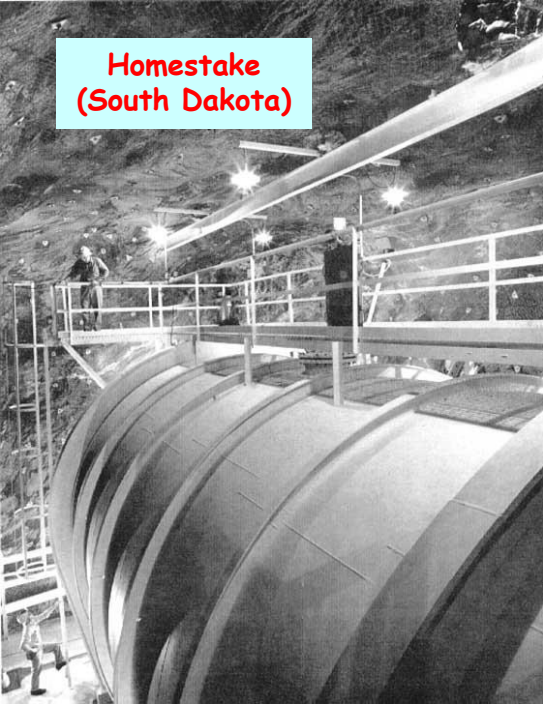




**L'énigme des
neutrinos solaires
1968-2001**



Homestake
(South Dakota)



Les pièges à neutrinos (< 2001)

Chlore (>1968)



35% des neutrinos
solaires attendus !

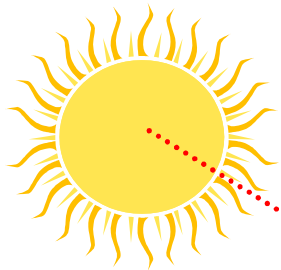
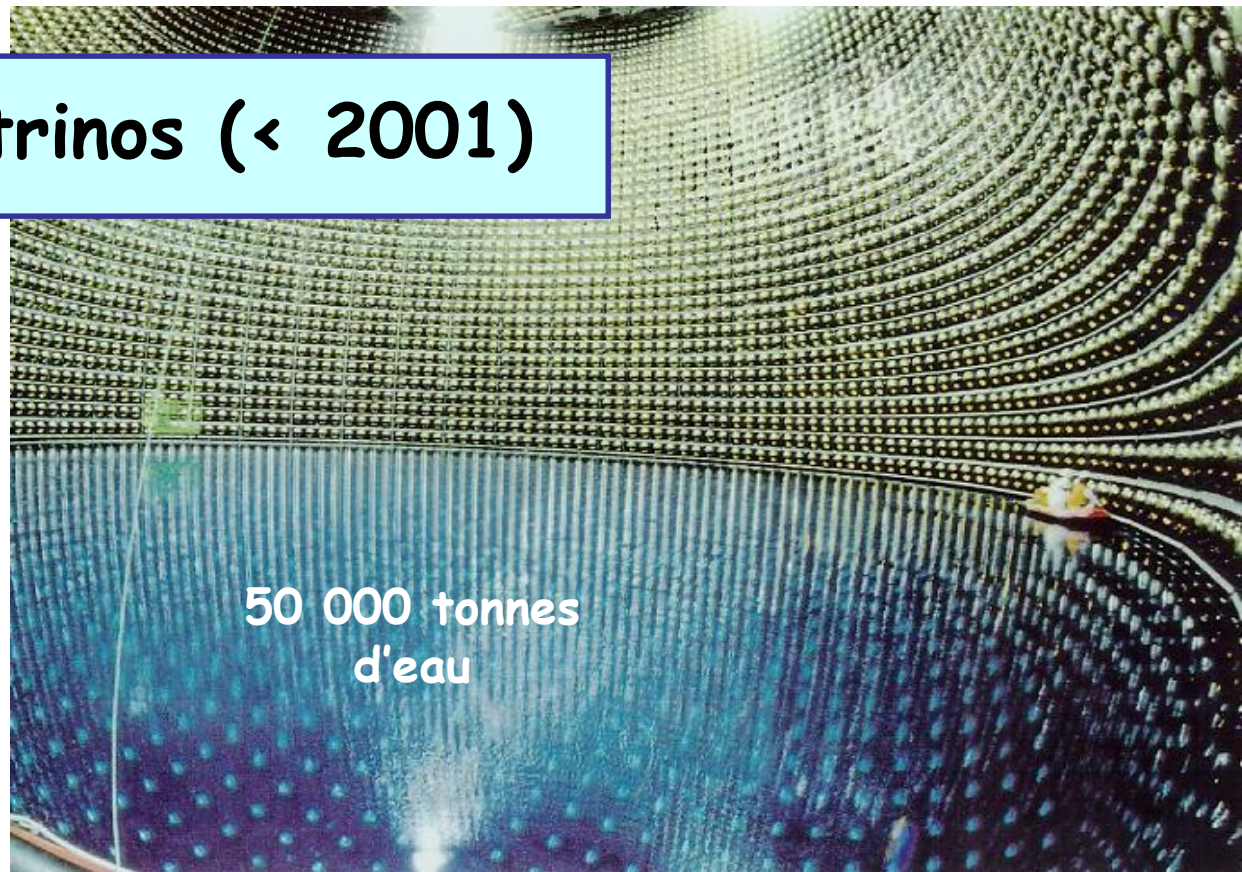
R. Davis, prix Nobel
2002 pour
la première détection
des neutrinos solaires

Basé sur une idée de
Pontecorvo (1946) !

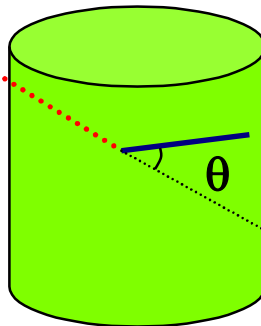


Les pièges à neutrinos (< 2001)

Détecteur japonais
SuperKamiokande



neutrino

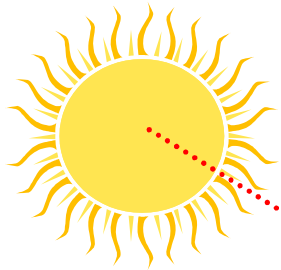
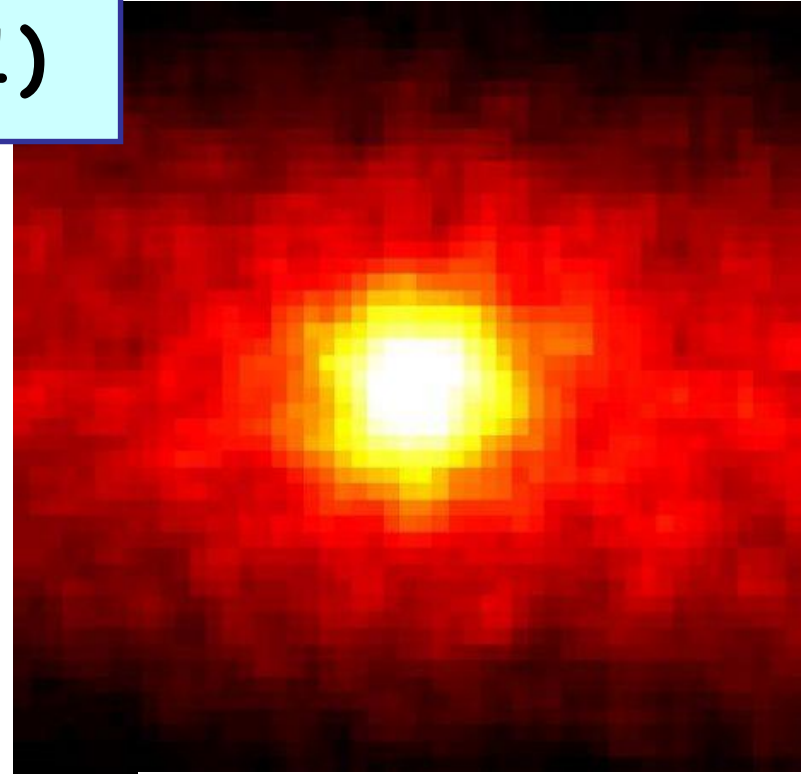


électron

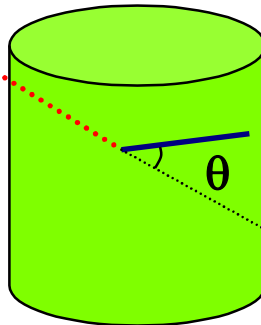
45% des neutrinos
solaires attendus !

Les pièges à neutrinos (< 2001)

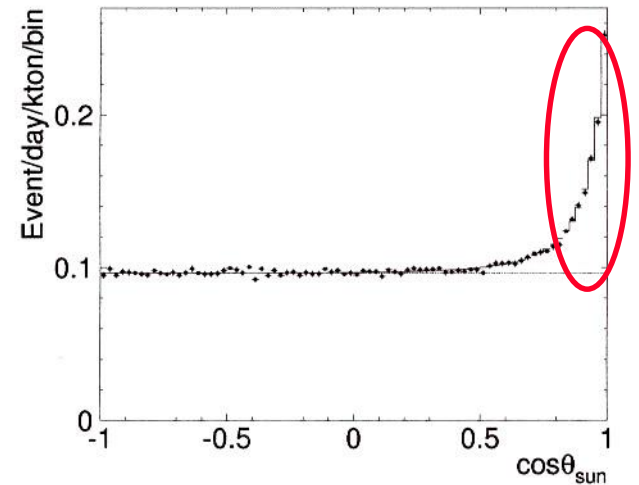
Image du Soleil
en neutrinos vue
par SuperKamiokande



neutrino



électron



Les pièges à neutrinos (2001)

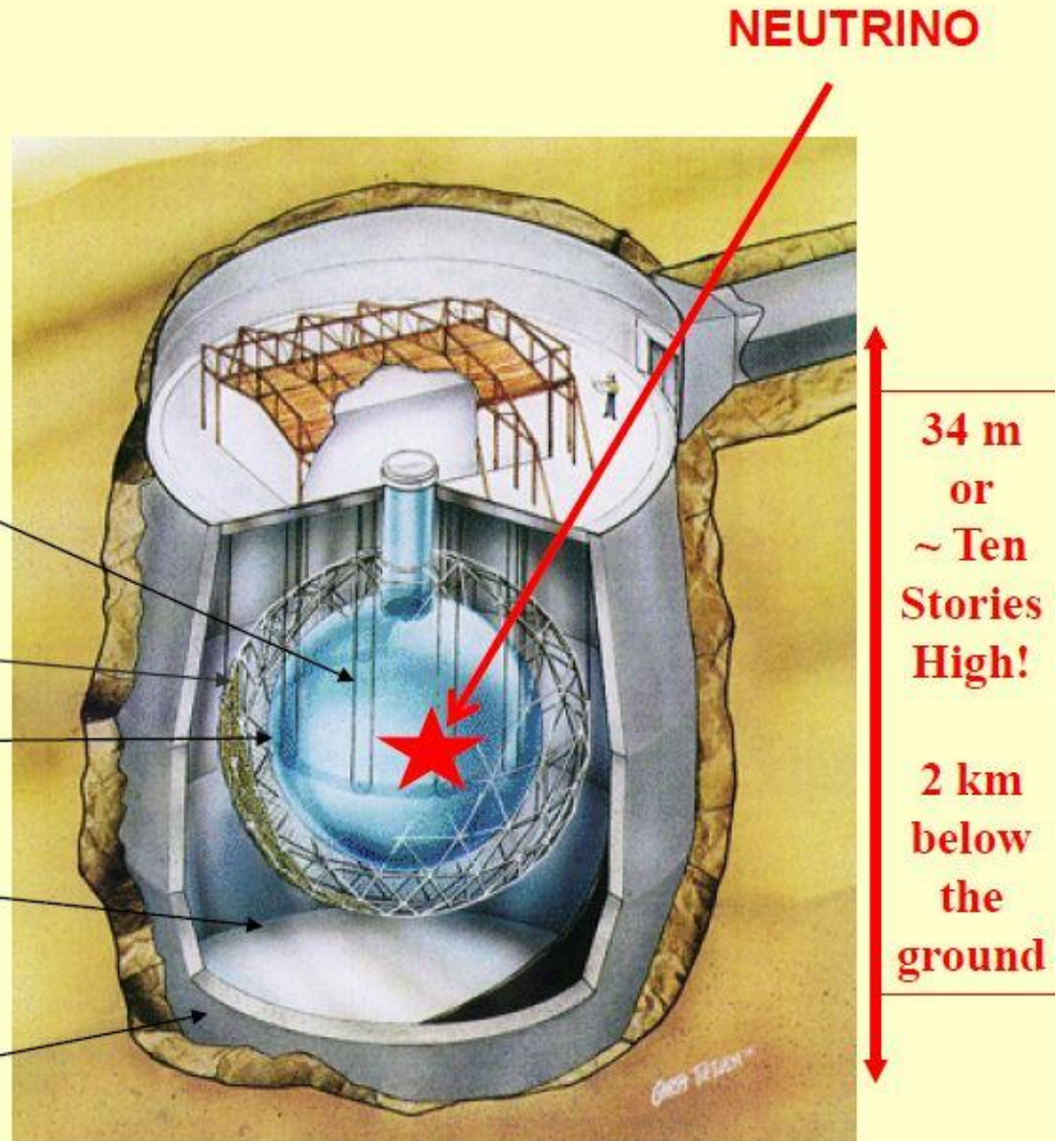
**Sudbury Neutrino Observatory
(SNO)
Canada**

1000 tonnes
eau lourde (D_2O)

9500 photomultiplicateurs

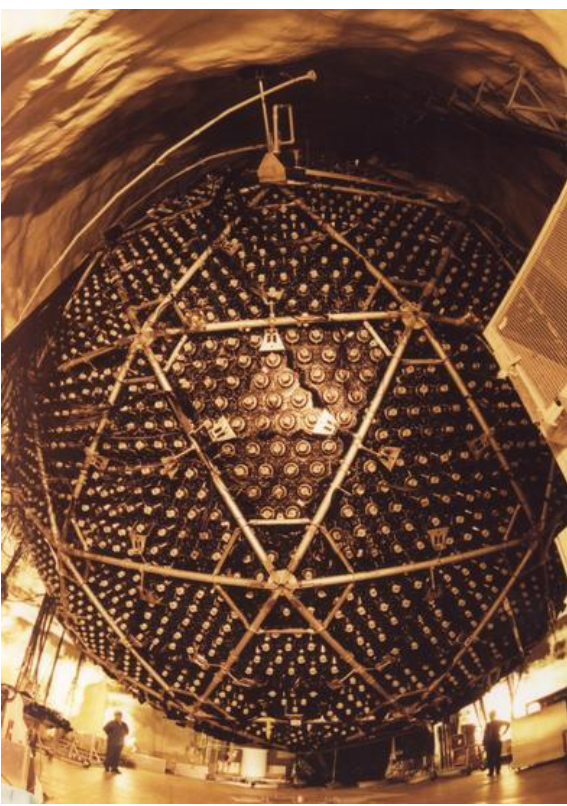
réservoir acrylique
(12 m diamètre)

eau ultra-pure (H_2O)



Les pièges à neutrinos (2001)

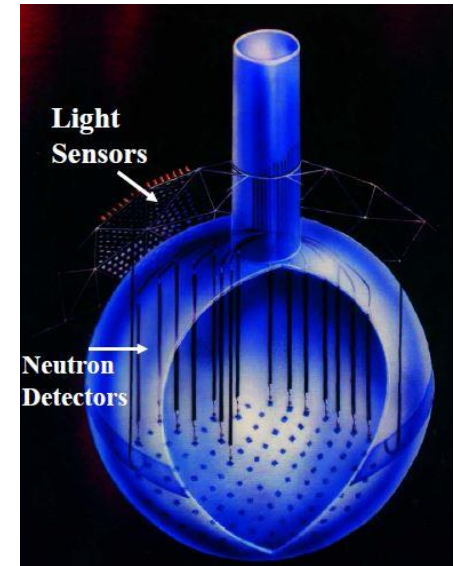
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



Sensible à toutes les familles de neutrinos !

35% des neutrinos solaires ν_e attendus !

100% des neutrinos solaires attendus !

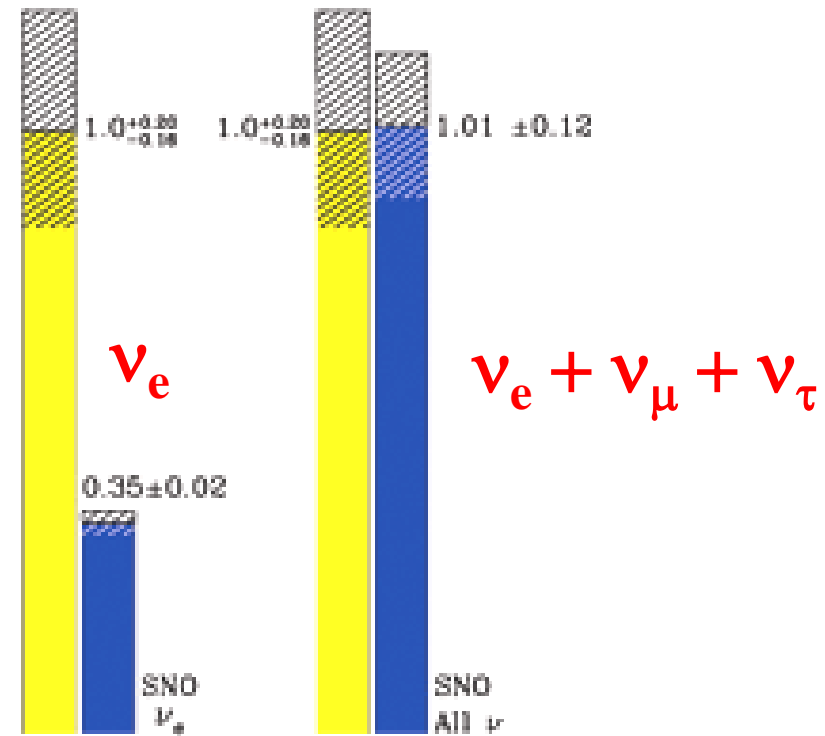


Neutrinos solaires : résultats ■ et prédictions ■

1. Preuve que les neutrinos ν_e se sont transformés en une autre espèce (ν_μ ou ν_τ) via l'oscillation

2. Preuve que le Soleil fonctionne comme prévu

oscillation $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$



SNO (2001)

Collaboration SNO (2004)

(50%)



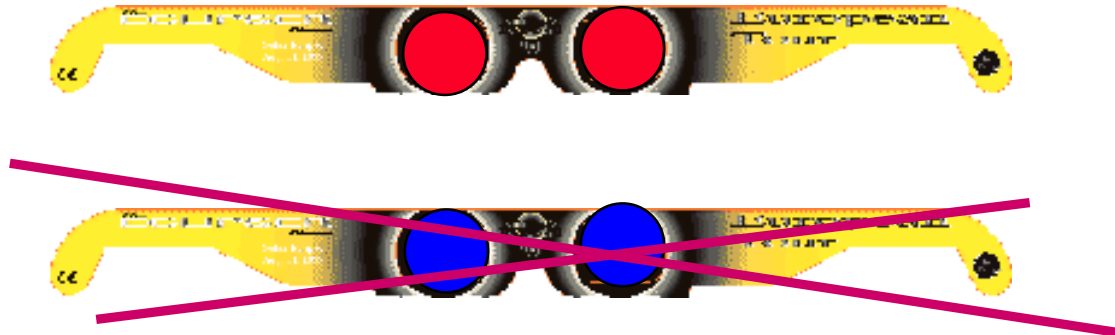
A. McDonald

L'énigme des neutrinos solaires ?

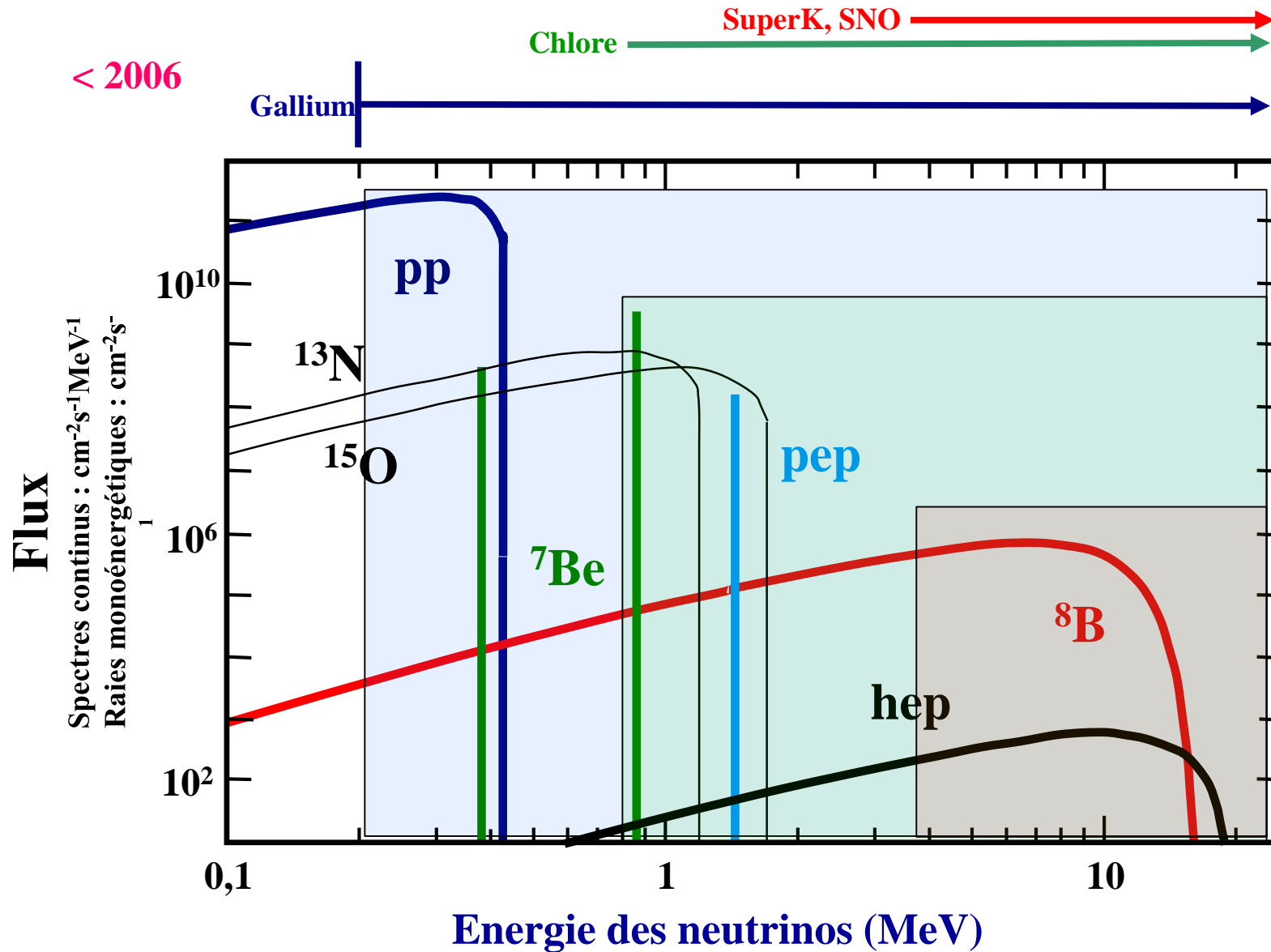
- Les neutrinos « changent de couleur » en voyageant ...



- Et, jusqu'à SNO, nos détecteurs n'étaient sensibles qu'à la couleur de départ !



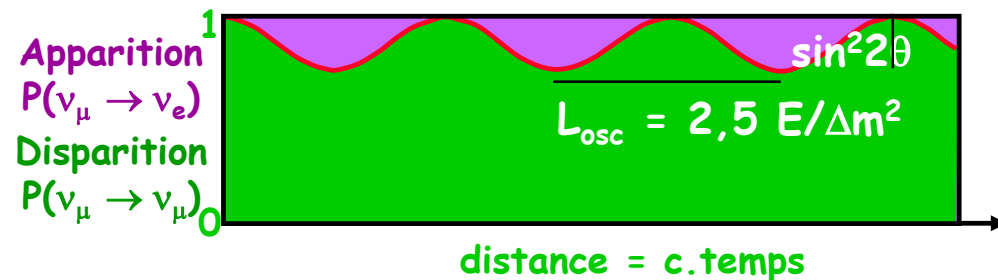
Spectre en énergie des neutrinos solaires



Comment interpréter tout ça ?

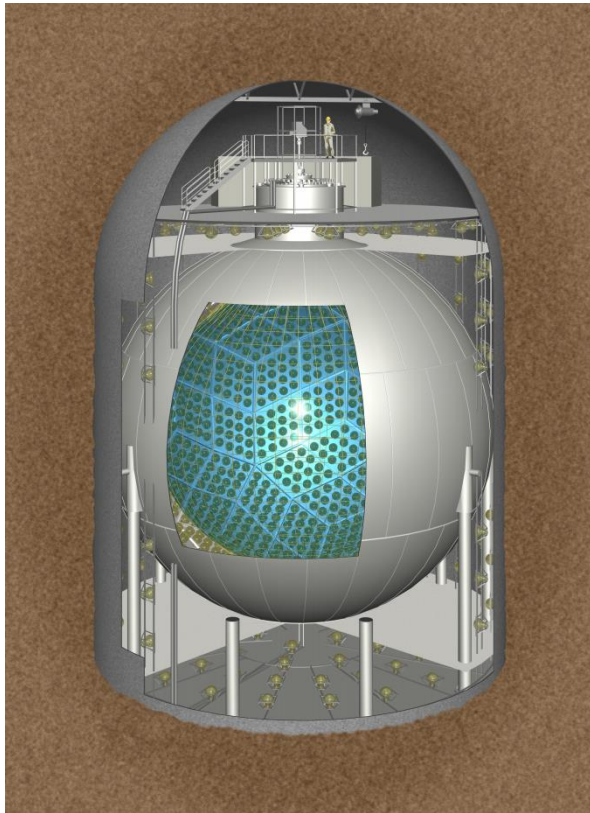
- ❶ Les réactions nucléaires dans le Soleil ne produisent que des ν_e
- ❷ Les détecteurs de neutrinos solaires étaient (jusqu'à SNO) sensibles seulement (ou principalement) aux ν_e

SNO a montré que les ν_e ont été (partiellement) transformés en ν_μ ou ν_τ et le mécanisme d'oscillation explique le déficit observé.



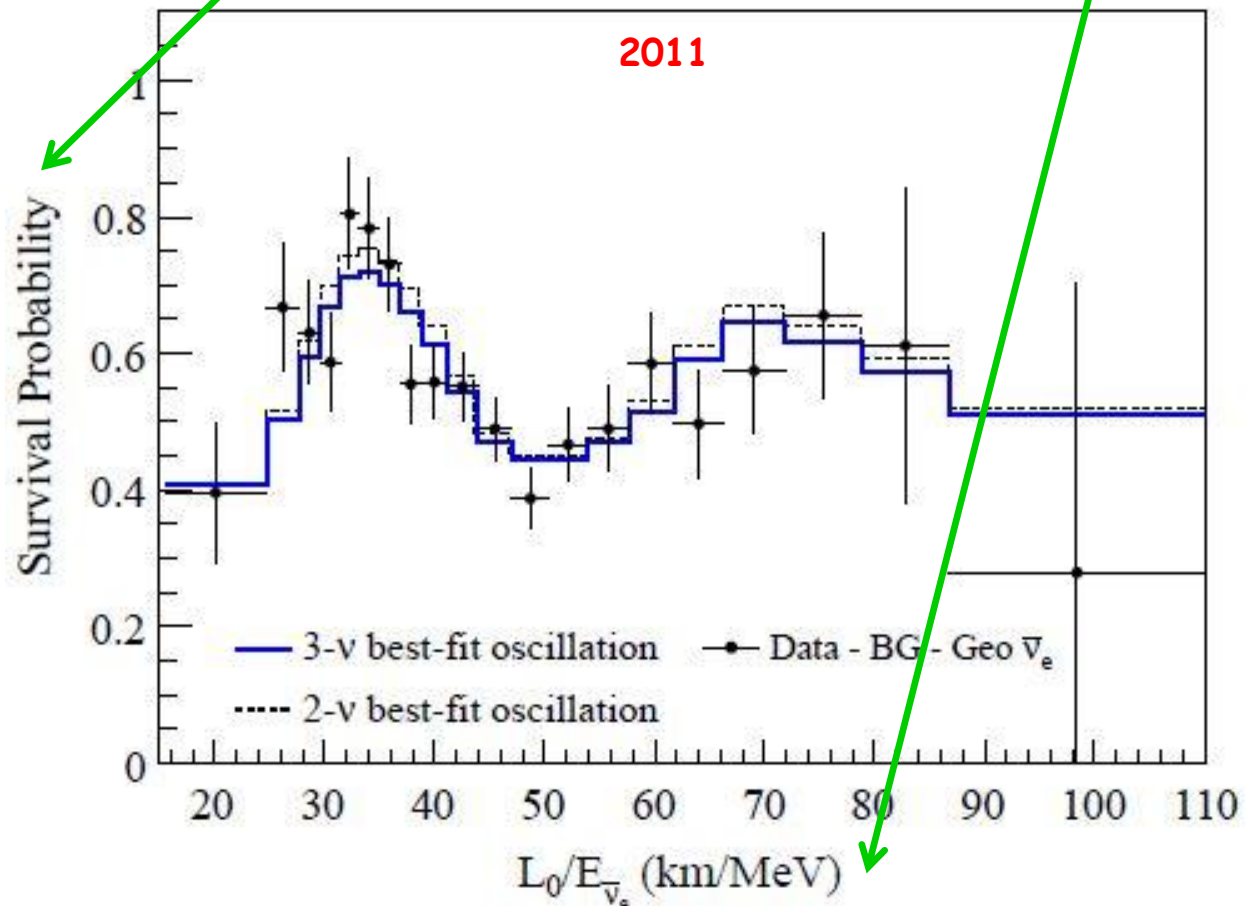
- ⊗ Pour obtenir les paramètres de l'oscillation (θ et Δm^2), on ajuste simultanément les réductions de flux de observées dans les expériences et les spectres.

Confirmation de l'oscillation: KamLAND



KamLAND :
Antineutrinos émis par
les réacteurs nucléaires

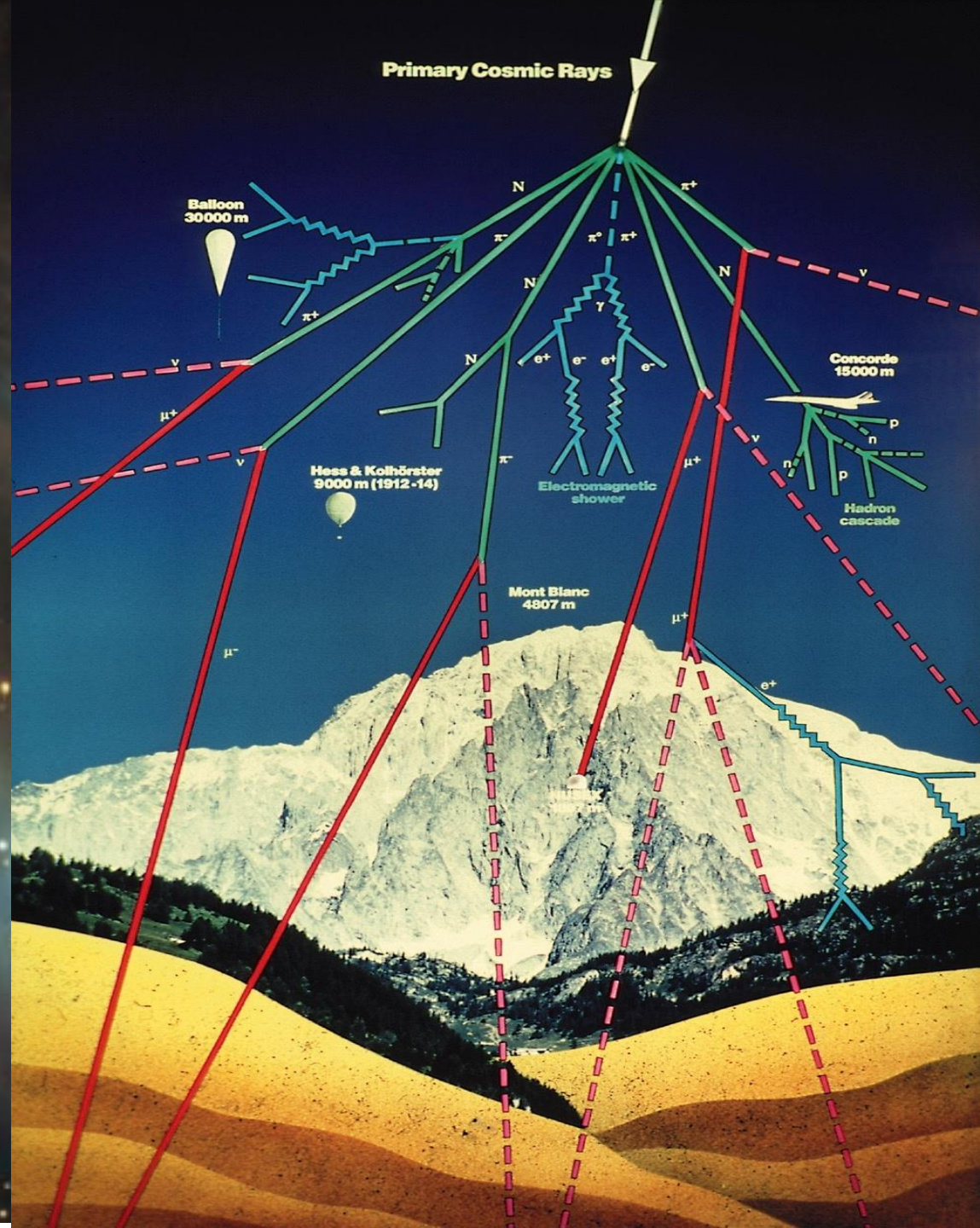
$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \pi \frac{L}{L_{\text{osc}}}$$



L'oscillation des neutrinos: de Bruno Pontecorvo au prix Nobel 2015

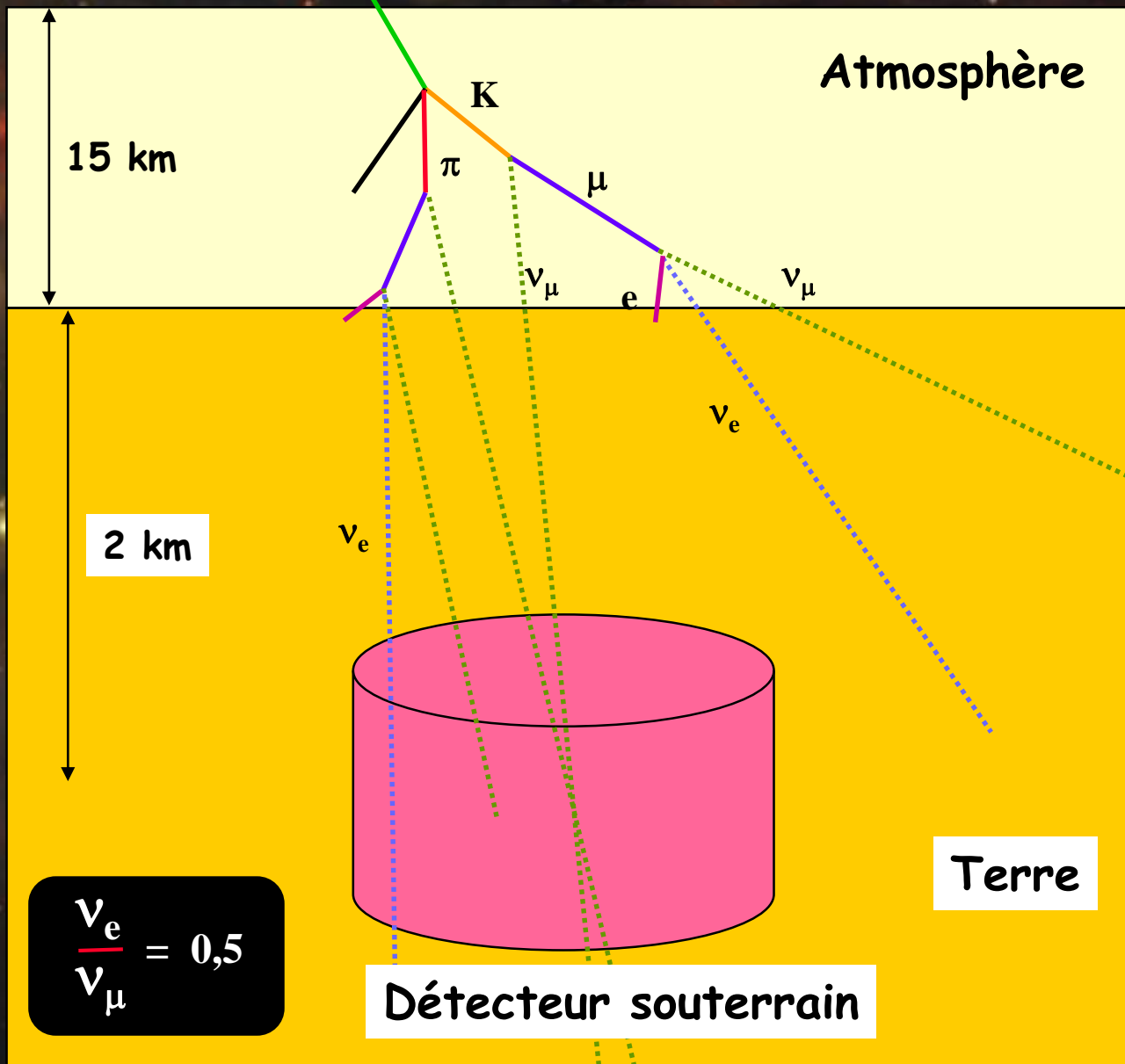
- Les neutrinos : histoire et propriétés
- L'oscillation des neutrinos : Pontecorvo (1957-1968)
- Les neutrinos solaires (1968-2001)
- **Les neutrinos « atmosphériques » (1980-1998)**
- Le prix Nobel 2015
- En guise de conclusion

La Terre est bombardée
en permanence par les
rayons cosmiques !



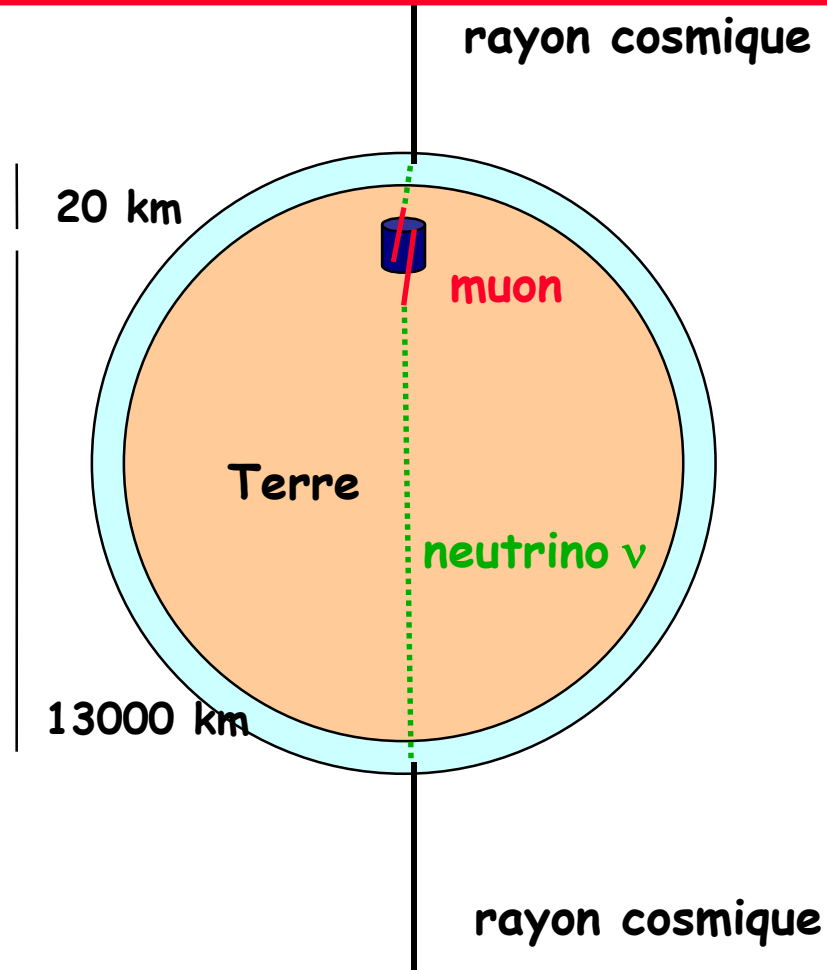
proton, noyau

La Terre est bombardée en permanence par les rayons cosmiques !

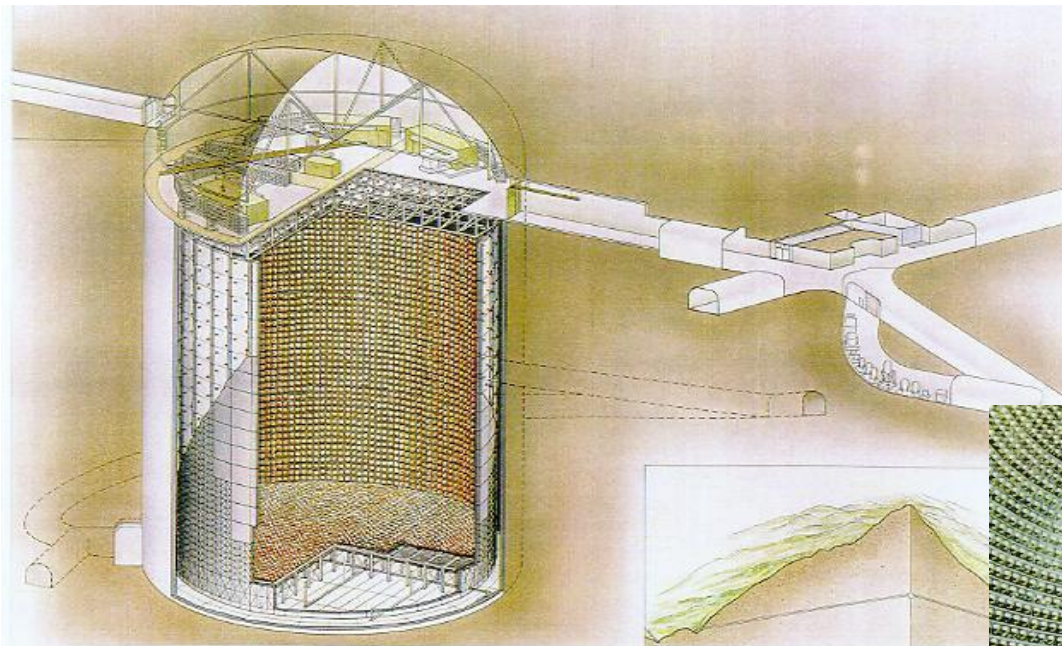


Neutrinos « atmosphériques »

$20 \text{ km} < L_\nu < 13\,000 \text{ km}$
 $E = 100 \text{ MeV} - 10 \text{ GeV}$



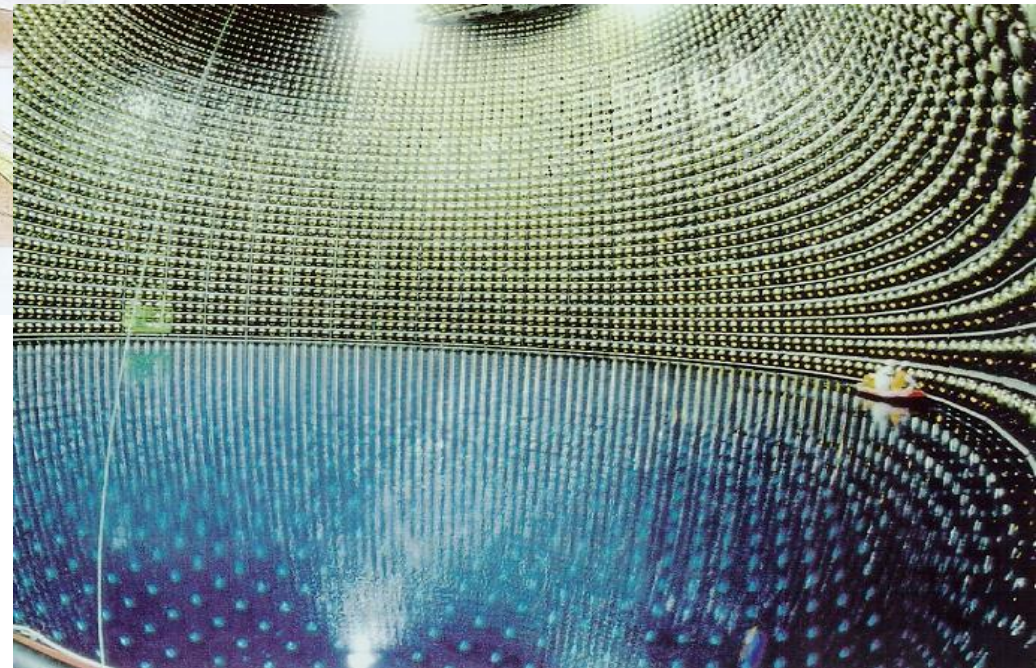
Super-Kamiokande



SUPERKAMIOKANDE INSTITUT FÜR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

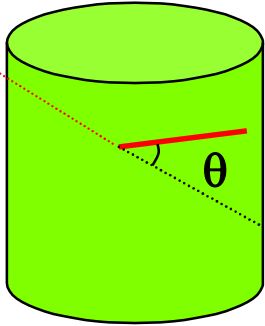
50kt d'eau (40m de Ø
40m de haut)

11000 photomultiplicateurs

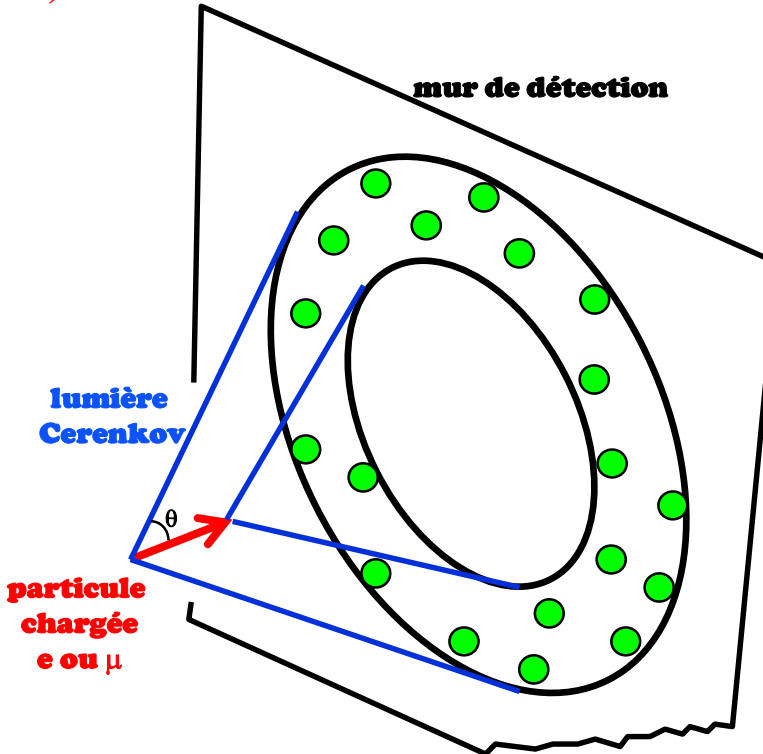


Super-Kamiokande

neutrino ν_e, ν_μ



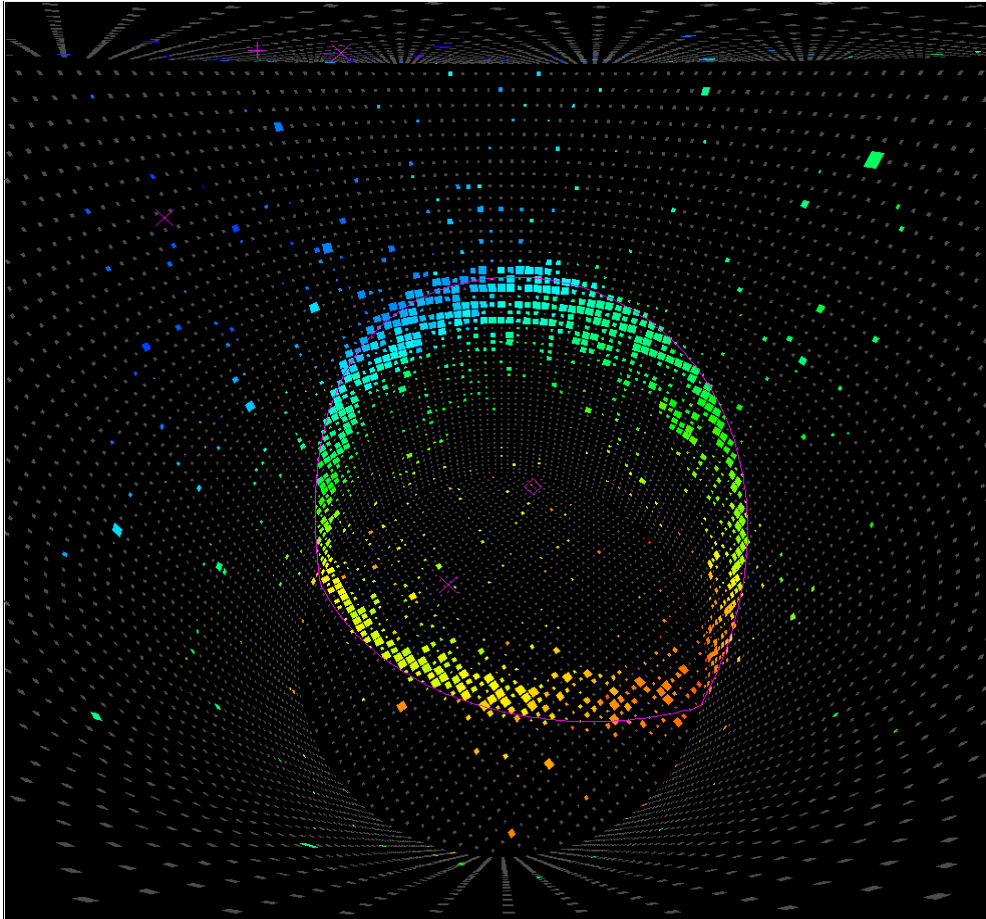
électron, muon



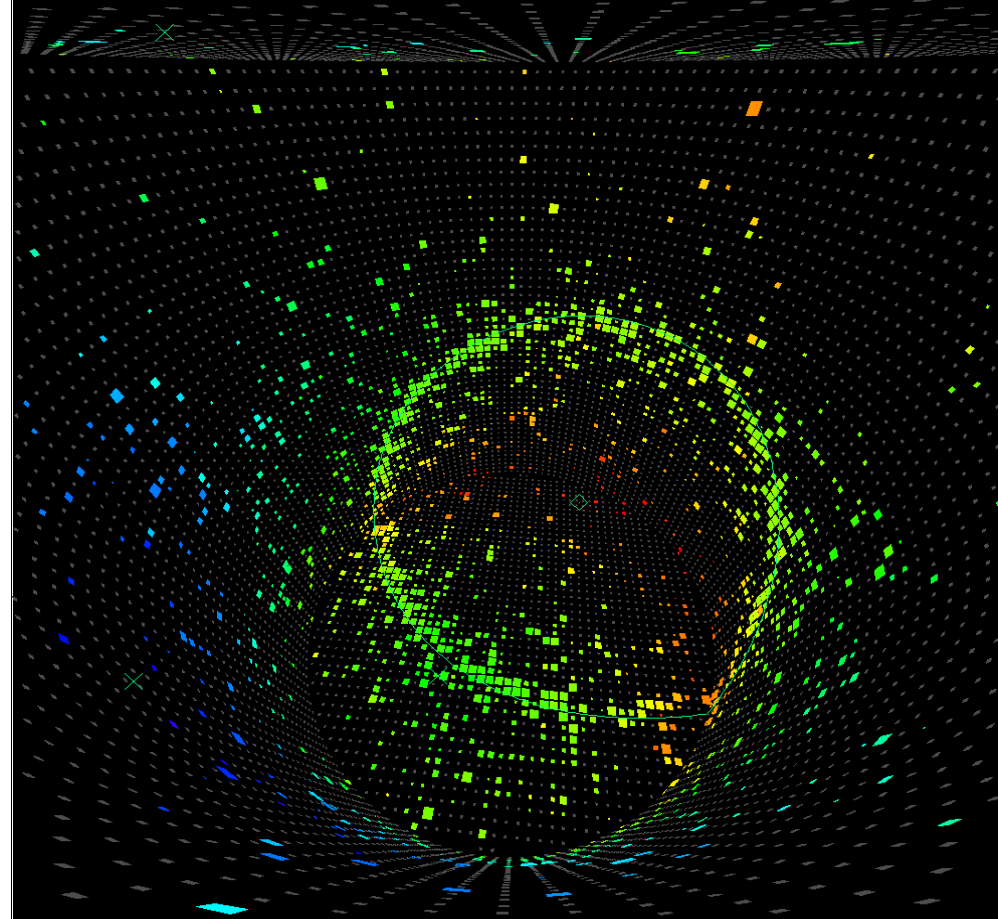
● : photomultiplicateurs

Identification des particules dans Super-K

muon de 603MeV

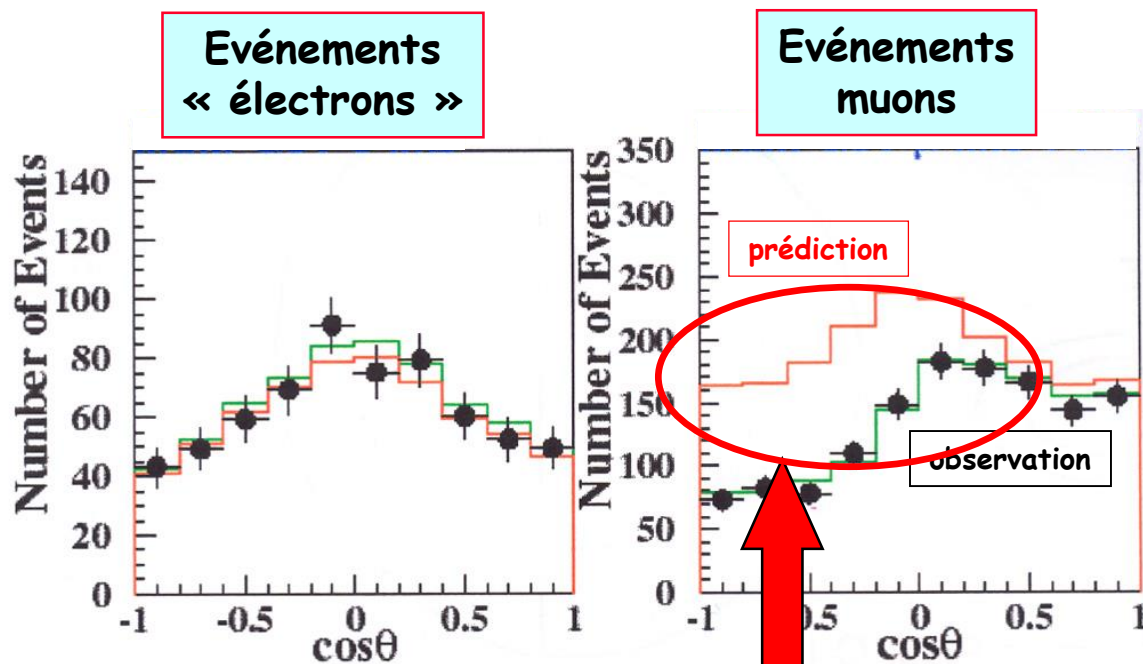
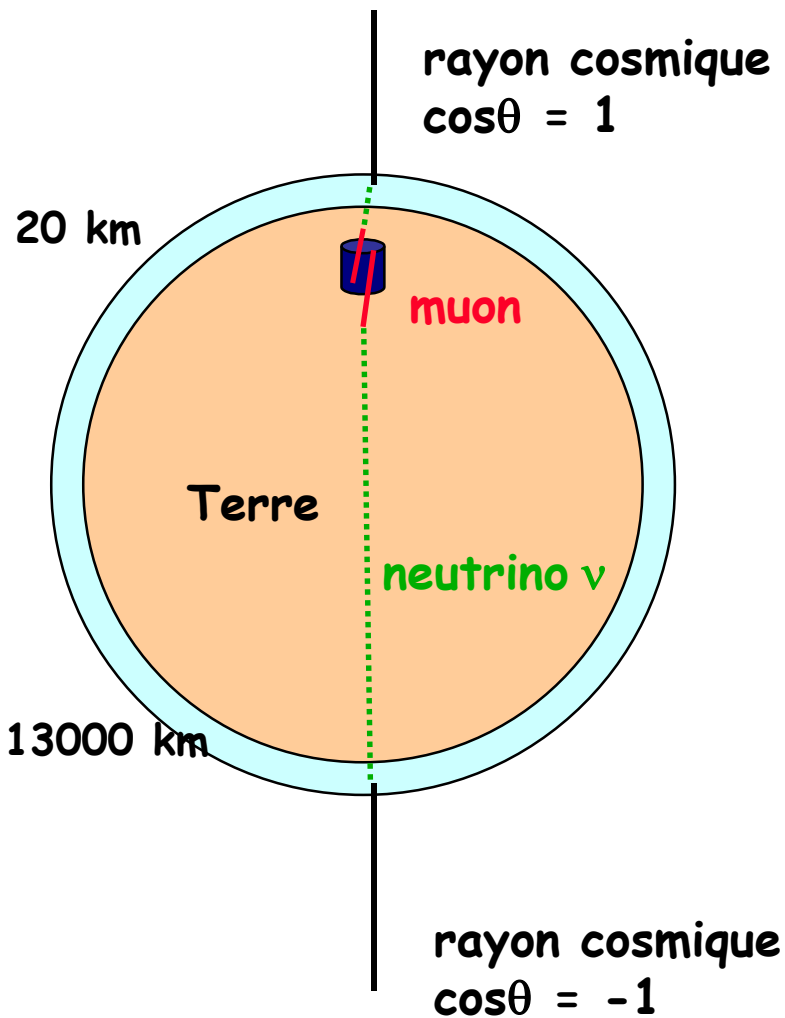


électron de 492MeV



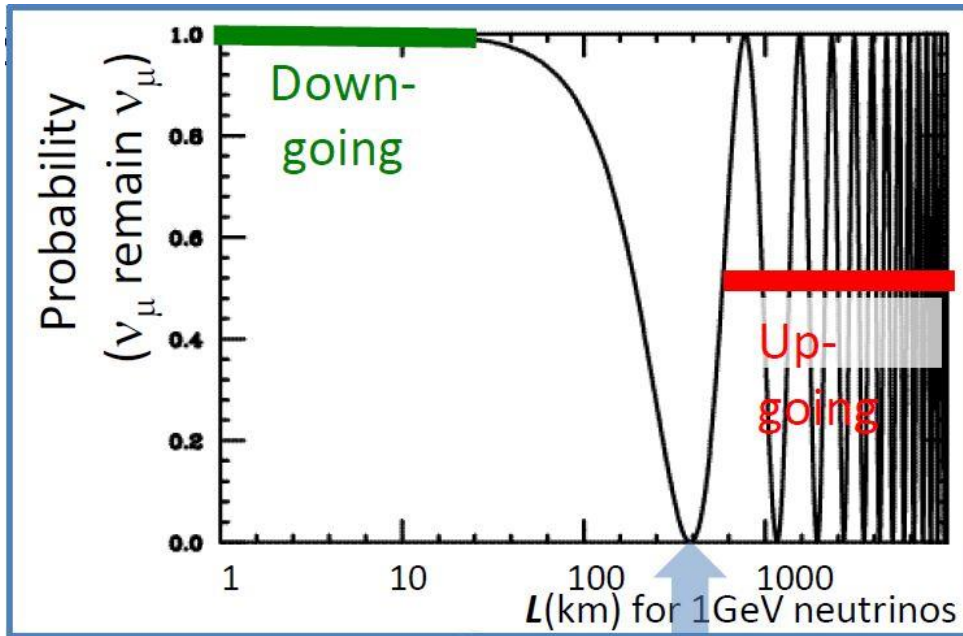
SuperKamiokande

Juin 1998

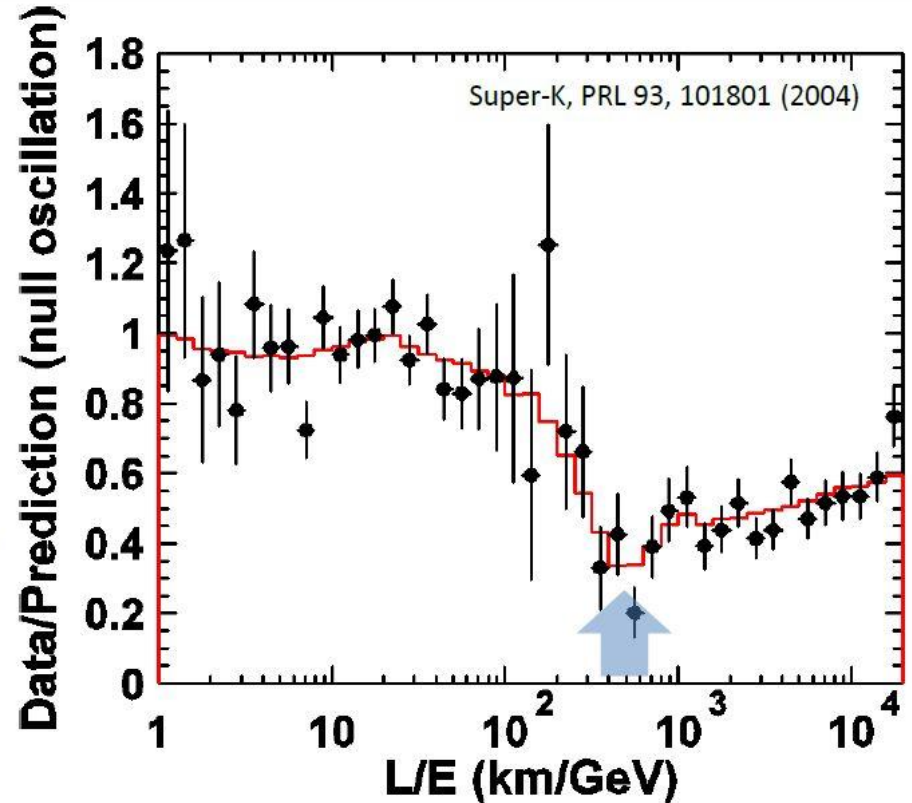


oscillation $\nu_{\mu} \leftrightarrow \nu_{\tau}$

SuperKamiokande



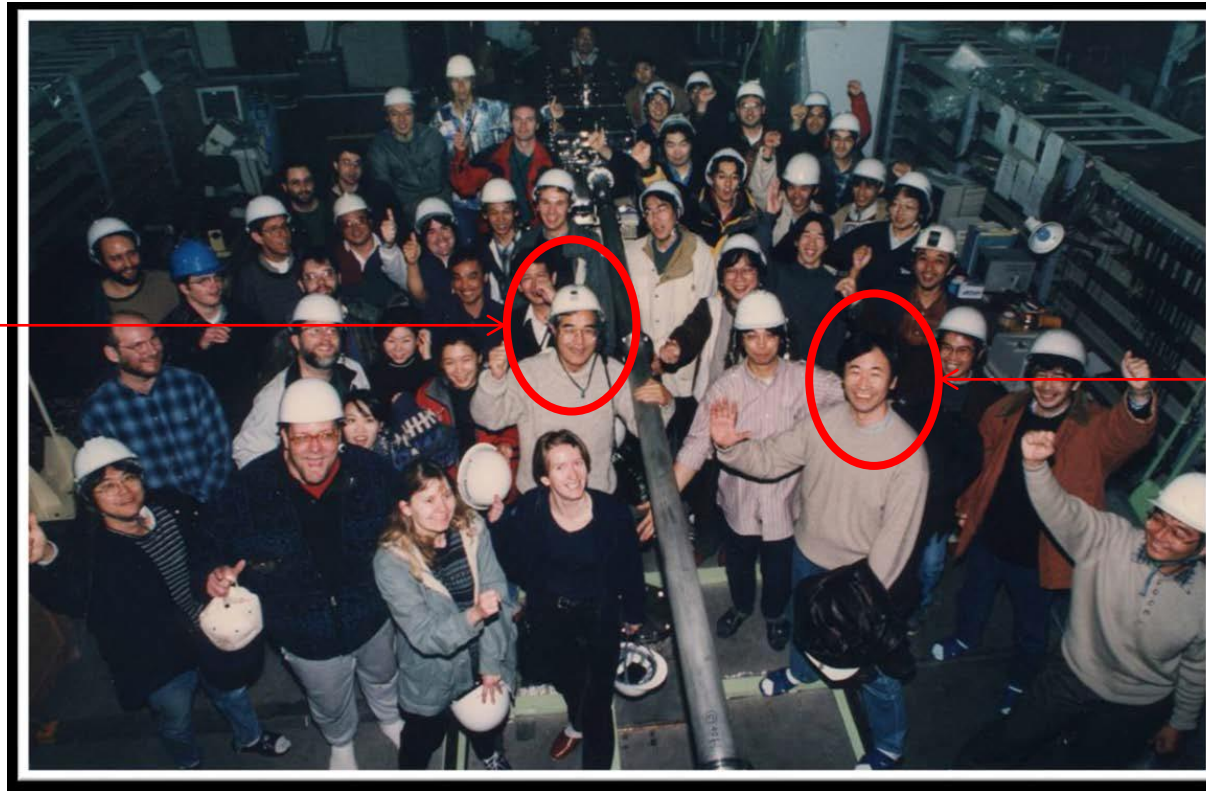
**Pour confirmer l'oscillation,
il faut observer ce « dip »!**



**2004 : le « dip » est observé pour
 $L/E = 500$ km/GeV**

SuperKamiokande

Photo de la collaboration fin 1998



Y. Totsuka

T. Kajita

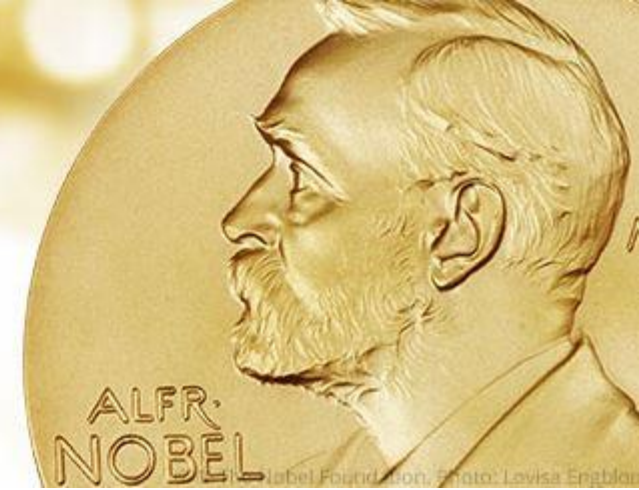
L'oscillation des neutrinos: de Bruno Pontecorvo au prix Nobel 2015

- Les neutrinos : histoire et propriétés
- L'oscillation des neutrinos : Pontecorvo (1957-1968)
- Les neutrinos solaires (1968-2001)
- Les neutrinos « atmosphériques » (1980-1998)
- **Le prix Nobel 2015**
- En guise de conclusion

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Takaaki Kajita
Arthur B. McDonald



6 October 2015

The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics for 2015 to

Takaaki Kajita
Super-Kamiokande Collaboration
University of Tokyo, Kashiwa, Japan

and

Arthur B. McDonald
Sudbury Neutrino Observatory Collaboration
Queen's University, Kingston, Canada

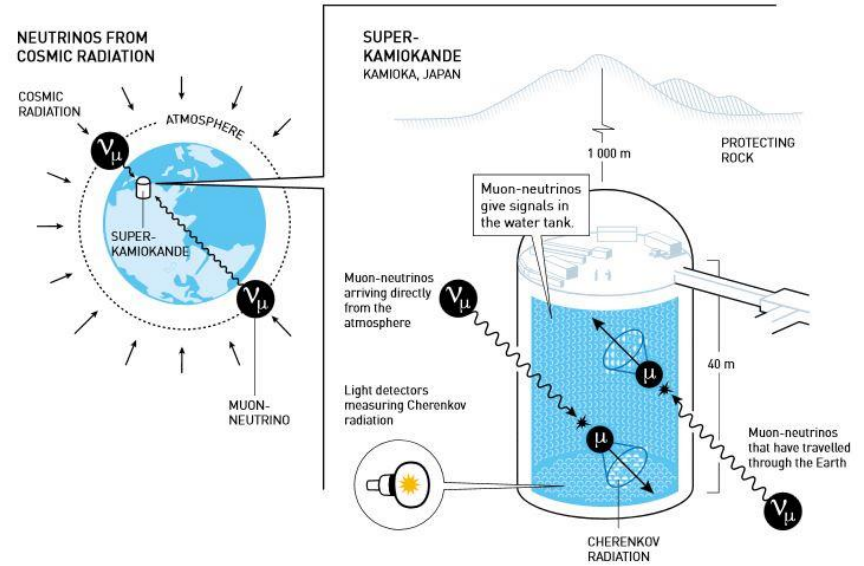
"for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"



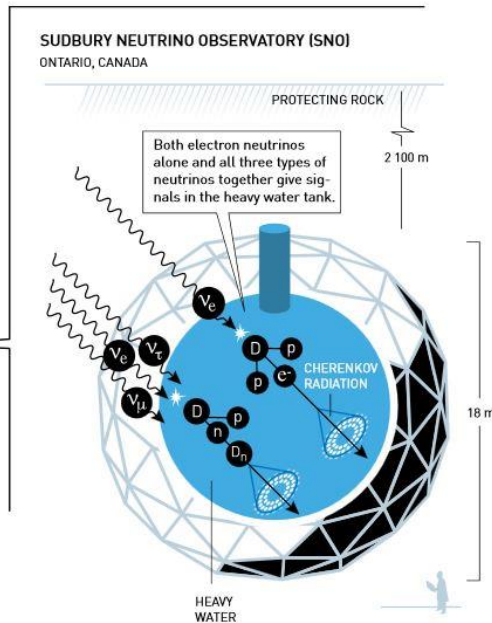
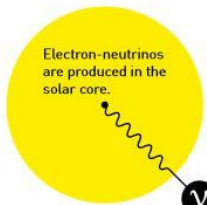
Takaaki Kajita SuperKamiokande

Oscillation des neutrinos atmosphériques

❖ Responsable de l'analyse



NEUTRINOS FROM THE SUN



Art McDonald Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

Oscillation des neutrinos solaires

❖ Responsable de l'expérience

Takaaki Kajita
Sorbonne (6 avril 2016)



Quid de Bruno Pontecorvo ?

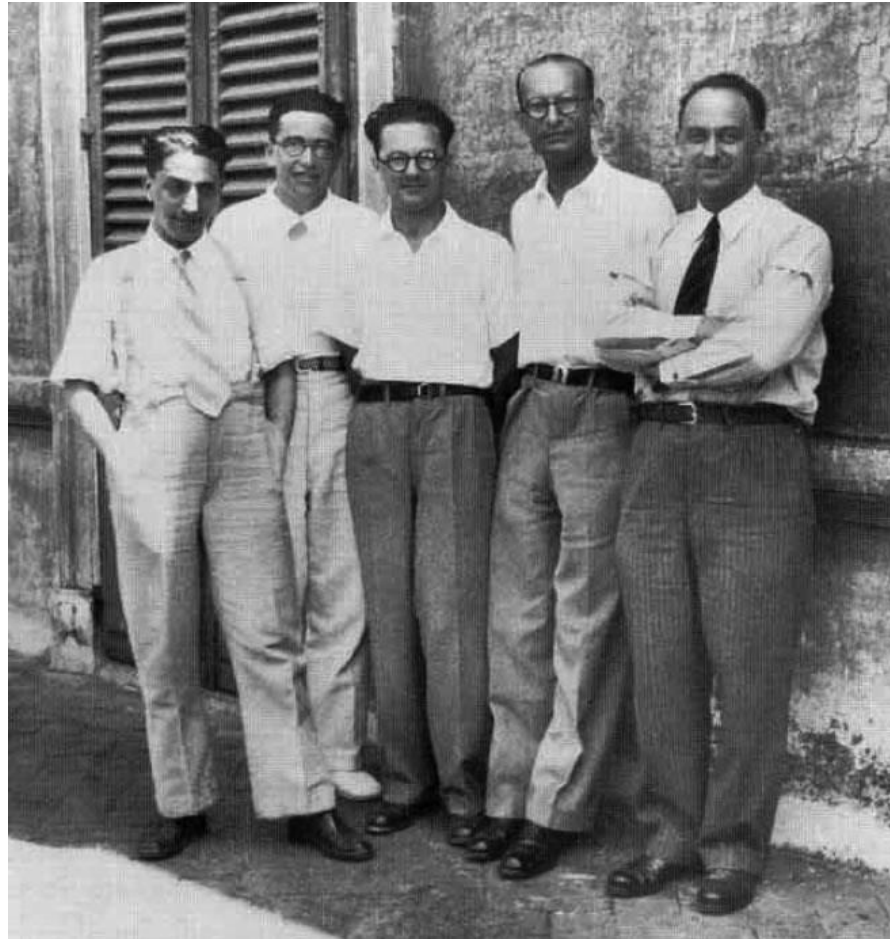
**L'inventeur de l'oscillation des neutrinos
... et de beaucoup d'autres idées géniales sur les neutrinos**



**Il ne fait aucun doute dans la communauté des
physiciens qu'il eut été associé au prix Nobel de
cette année !**

Il aura payé très cher son « exil » en URSS.

« I ragazzi della via Panisperna »
Rome 1934

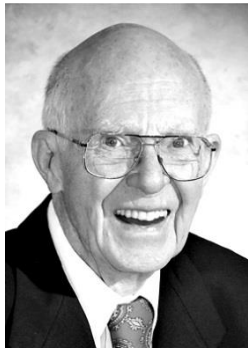


D'Agostino, Segre, Amaldi, Rasetti, Fermi

Mais où est Pontecorvo ???

● Derrière l'objectif !

AUTRES PRIX NOBEL POUR LES NEUTRINOS



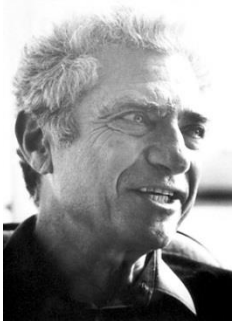
- **2002 : Ray Davis et Masatoshi Koshiya :** astronomie neutrino (neutrinos solaires en 1968 et neutrinos de supernovas en 1987)



- **1995 : Frederick Reines :** découverte du neutrino (en 1956)



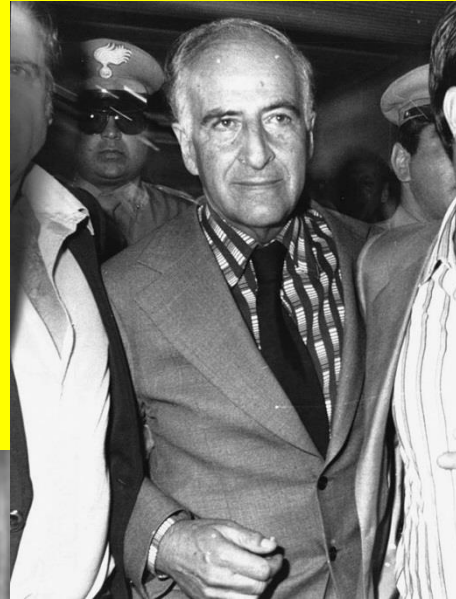
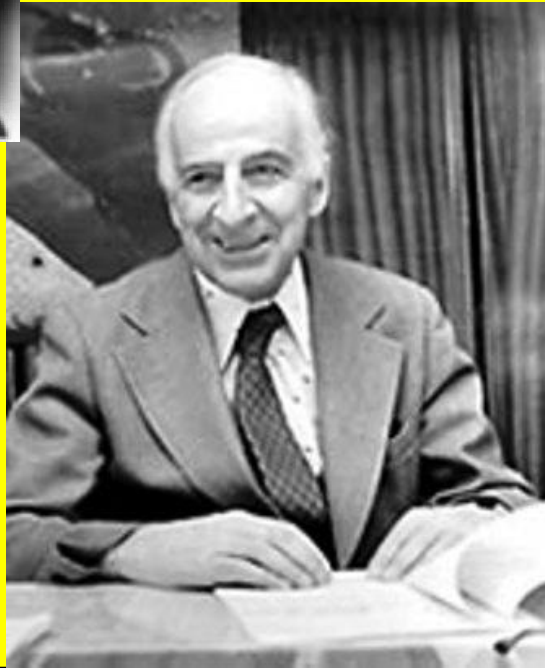
- **1988 : Leon Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger :** découverte d'une seconde famille de neutrinos, les ν_{μ} (en 1962)

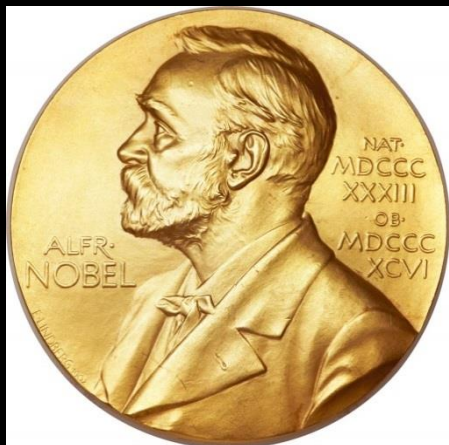


L'oscillation des neutrinos: de Bruno Pontecorvo au prix Nobel 2015

- Les neutrinos : histoire et propriétés
- L'oscillation des neutrinos : Pontecorvo (1957-1968)
- Les neutrinos solaires (1968-2001)
- Les neutrinos « atmosphériques » (1980-1998)
- Le prix Nobel 2015
- **En guise de conclusion**

**MERCI BRUNO PONTECORVO
POUR TOUTES VOS CONTRIBUTIONS !**

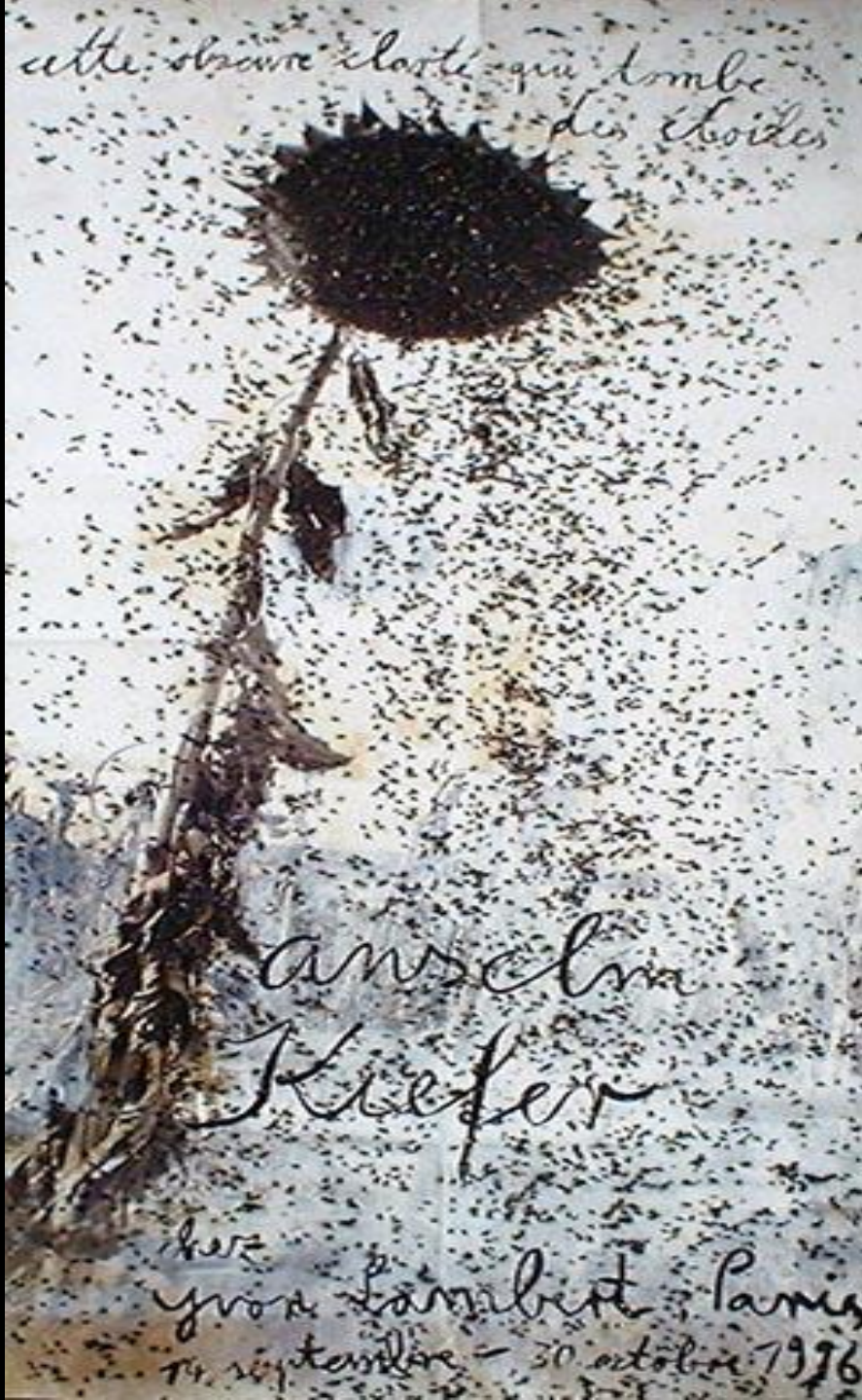




* Cette obscure clarté
qui tombe des étoiles

Pierre Corneille & Anselm Kiefer

FIN

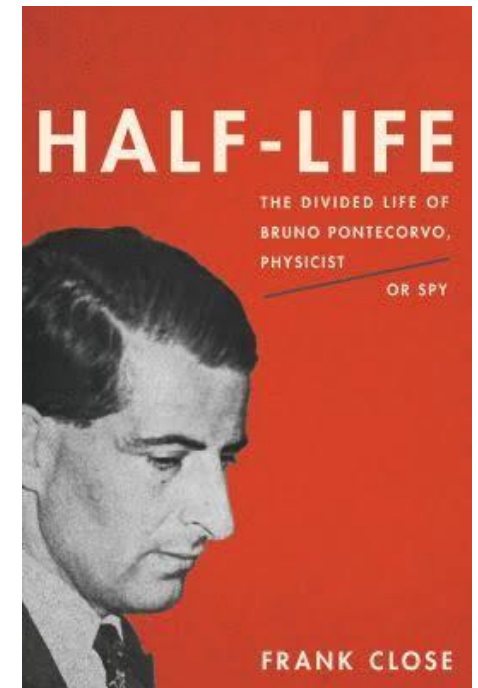




Frank Close (conférence au CERN)

<https://indico.cern.ch/event/521868/>

<http://cds.cern.ch/record/2153143>



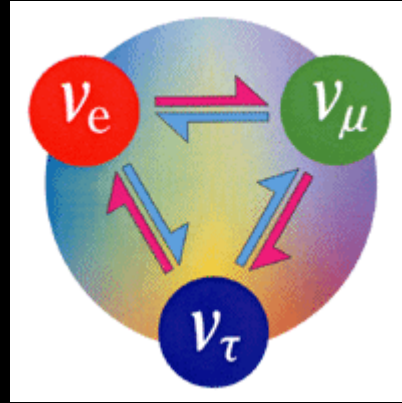
Prix Nobel de physique 2015

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/popular-physicsprize2015.pdf

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/presentation-speech.html

S.M. Bilenky

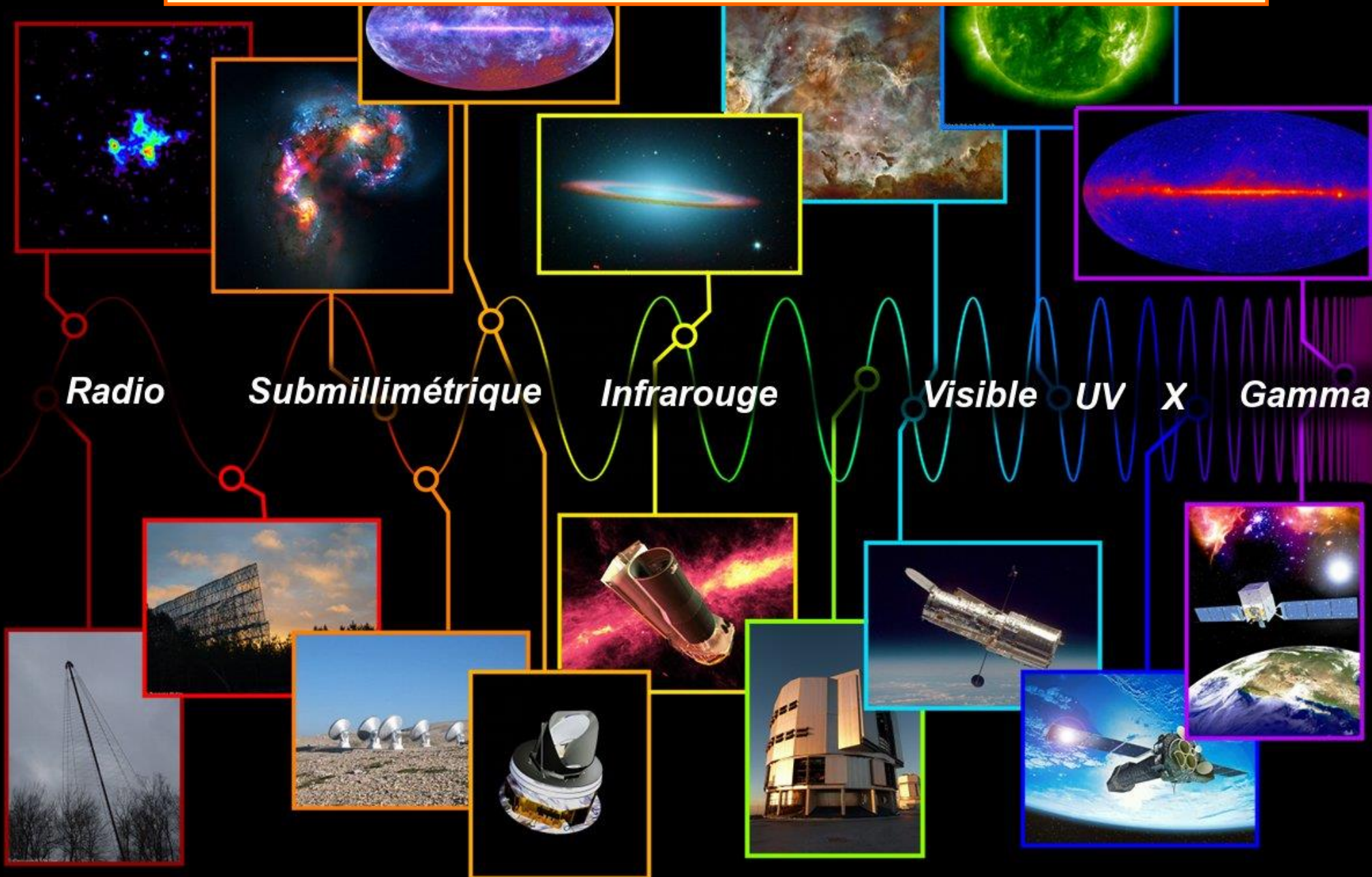
Bruno Pontecorvo: Mister Neutrino, [arXiv:physics/0603039](https://arxiv.org/abs/physics/0603039)



FIN



La « lumière » des photons



La « lumière » des photons

