

Présentation du prix Nobel de Physique 2015



Julien Quéva
13/10/2015

Le prix Nobel 2015 est attribué à ...



Takaaki Kajita (b.1959)

Université de Tokyo

Japon



Arthur McDonald
(b.1943)

Université du Queen

Canada

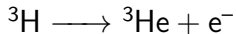
« la découverte des oscillations de neutrinos, qui démontre que les neutrinos ont une masse »

« la découverte des *oscillations* de *neutrinos*, qui démontre que les neutrinos ont une *masse* »

Avant tout (une brève pré-histoire)

- 1879 Découverte de l'électron par William Crookes.
- 1908 Mise en évidence, par Jean Perrin, indirecte mais indéniable, de l'existence des atomes (discontinuité de la matière).
- 1909 Mesure de la charge électrique de l'électron par Robert Millikan et Harvey Fletcher.
- 1909 Découverte du noyau par Hans Geiger et Ernest Marsden, sous la direction d'Ernest Rutherford, par diffusion de particules α (noyau d'hélium).
- 1918 Découverte du proton p (noyau d'hydrogène) par Ernest Rutherford.

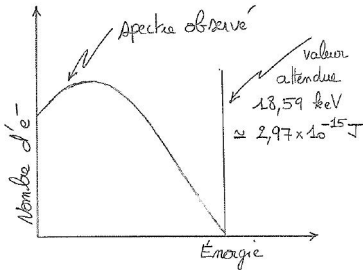
1914 : Désintégration β du tritium



James Chadwick
1891–1974
U. Liverpool
(Nobel 1935,
« découverte du
neutron »)

La conservation du moment (impulsion) et de l'énergie détermine l'énergie cinétique de l'électron émis.

Mesures \neq Prédictions :



1930 : Dear radioactive Ladies and Gentlemen



Wolfgang Pauli

1900–1958

ETH Zurich

U. Princeton

(Nobel 1945,

« principe
d'exclusion »)

Pour :

- sauver la conservation de l'énergie,
- pallier à des *mauvaises* statistiques,
- expliquer le spectre β continu,

il propose une nouvelle particule : le neutron.

« *J'ai fait une chose terrible, j'ai postulé une particule qui ne peut pas être détectée.* »

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Des. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,

Pendant ce temps à Vera Cruz

La masse de la particule de Pauli est au plus $\sim 1\%$ de celle du proton. Sa masse n'est pas, particulièrement, importante.

Les quatre interactions :

- gravitationnelle (insensible en physique des particules)
- électromagnétique (entre charge électrique)
- forte (de courte portée, assure la cohésion du noyau) (1921)
- faible (désintégration β)

Meilleure image **quantique** de la physique.

1932 : découverte du neutron (Chadwick).

1934 : Théorie de la désintégration β



Enrico Fermi

1901–1954

U. Roma

U. Chicago

(Nobel 1938,
« nucléaire »)

Il renomme la particule de Pauli *neutrino*.

Présente une image satisfaisante de la désintégration β où le neutrino n'est pas là que pour « sauver les meubles ».

Le neutrino doit avoir une masse très petite, voire nulle.

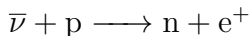
Problème : le neutrino n'interagit qu'au travers de l'**interaction faible**, qu'introduit cette théorie.

→ Quasiment indétectable, il est *élusif*.

1951 : Project Poltergeist

Première expérience en physique du neutrino (Los Alamos), menée par Frederick Reines et Clyde Cowan (encouragés par Bruno Pontecorvo).

Principe de toutes les expériences : désintégration β -inverse :

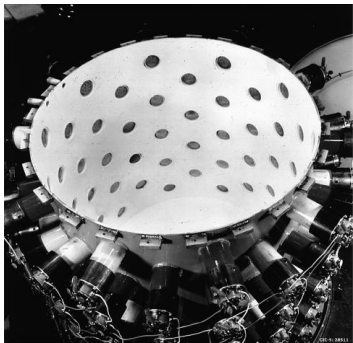


Utilisation des (nouveaux) liquides scintillateurs : émission de lumière au passage d'une particule chargée ou de rayons γ .

Idée : faire détonner une bombe nucléaire (source de neutrino). Le détecteur aurait été à 40 m de la fournaise, sous terre.

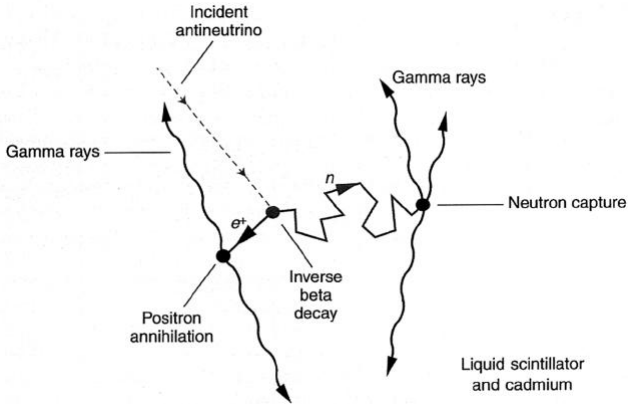
Proposition validée, mais (ouf!) ils changent de source en se plaçant à côté d'un réacteur nucléaire (qu'on peut maîtriser).

1953 : L'expérience de Hanford



- au complexe nucléaire d'Hanford (état de Washington, LIGO !)
- « contre » un réacteur à plutonium
- 71 cm de diamètre, haut de 76 cm
- 300 L de liquide scintillant
- 90 photomultiplicateurs

1953 : L'expérience de Hanford

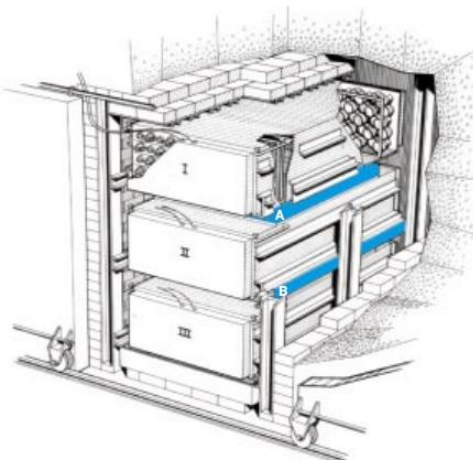


Recevoir les bons signaux (photons) dans les bons temps constitue la **signature** d'une désintégration β inverse.

Le résultat d'Hanford est un **indice** sérieux mais il ne permet pas de conclure. Il faut voir plus grand pour améliorer le rapport signal/bruit.

→ l'expérience de Savannah.

1956 : l'expérience de Savannah



À Savannah, Caroline du sud.

I, II, III : liquide scintillant et détecteurs

A, B : 200 L d'eau

→ protons : cibles

→ chlorure de Cadmium : capture de neutrons

Ils mesurent $2,88 \pm 0,22$ événements par heures et une section efficace de

$$\sigma = 6,3 \times 10^{-44} \text{cm}^2 \pm 25\%.$$

1956 : détection du neutrino !

RADIO-SCHWEIZ AG.		RADIOGRAMM - RADIOGRAMME		RADIO-SUISSE S.A.	
SBZ1311		ZHW UW1844 FM BZJ116 WH CHICAGOILL		56 14 1310	
PLC 00253					
Erhalten - Reçu		„VIA RADIOSUISSE“		Befördert - Transmis	
von - de	Stunde - Heure	NAME - NOM	nach - à	Stunde - Heure	NAME - NOM
NEWYORK	1535 11/11/56	1 ON	Brieftelegramm	7 4	15. VI. 56 --1 10
NACHLASS PROF. W. PAULI		LT PROFESSOR W PAULI ZURICH UNIVERSITY ZURICH		Per Post ①	
NACHLASS PROF. W. PAULI					
WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS FREDERICK REINES AND CLYDE COWN BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO					
Nr. 20 6500 x 100 3/54					

(Nobel 1995 [Reines], « détection du neutrino »)

ca. 1970 : Le problème des neutrinos solaires

Le soleil produit constamment des neutrinos électroniques.

L'expérience de Homestake (Dakota du sud), menée par Raymond Davis, Jr. et John N. Bahcall, avait pour objet la mesure du flux de neutrinos solaires, avec la réaction de capture $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \longrightarrow {}^{37}\text{Ar} + e^-$.

Le flux mesuré par Davis correspond au tiers de celui attendu par les calculs de Bahcall.

Deux possibilités :

- la modélisation des réactions nucléaires solaires est fautive,
- il se passe quelque chose d'autre.

ca. 1970 : Le modèle standard

La physique des particules trouve son cadre théorique dans la théorie quantique des champs. Celle-ci avec les mécanismes spécifiques (invariance de jauge, SSB, Higgs, anomalies) forme le modèle standard (SM).

Les régularités observées dans les mesures sont justifiées par des symétries du SM. Ces symétries prédisent de nouvelles particules **qui seront toutes observées**, avec les propriétés attendues.

La dernière particule prédite et observée est, bien sûr, le boson de Higgs. Ou boson de Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble. Et puis Anderson, avant tous les autres (s'il avait ..).

Trop de succès (théoriques & expérimentaux), trop de Nobels, pour les énumérer.

Le contenu en particules du SM

Fermions

matter particles

Quarks



Leptons



Gauge bosons

force carriers



photon



gluon



Z boson



W boson

Higgs boson

origin of mass



Les neutrinos **doivent** être de masse nulle.

The most successful theory, ever

Une observable du modèle standard est le *moment magnétique anormal* du muon $a_\mu = (g_\mu - 2)/2$ où

$$a_\mu^{\text{SM}} = (11\,659\,180,3 \pm 0,1 \pm 4,2 \pm 2,6) \times 10^{-10},$$

$$a_\mu^{\text{exp}} = (11\,659\,209,1 \pm 5,4 \pm 3,3) \times 10^{-10}.$$

Soit un écart de

$$\Delta a_\mu = a_\mu^{\text{exp}} - a_\mu^{\text{SM}} = (288 \pm 63 \pm 49) \times 10^{-11}.$$

Cela fonctionne plutôt (trop) bien, malheureusement (a_μ est un candidat pour des mesures au-delà du modèle standard).

1957 : les métamorphoses du neutrino



Бруно Понтекорво

Bruno Pontecorvo

1913–1993

U. Roma

JINR Dubna

Inspiré des transmutations $K^0 \longleftrightarrow \bar{K}^0$ il propose $\nu \longleftrightarrow \bar{\nu}$.

En 1962, après la découverte du muon μ , il propose le mélange/oscillations $\nu_e \longleftrightarrow \nu_\mu$.

Ce modèle d'oscillation de saveur est amélioré avec Gribov

Les métamorphoses du neutrino

La probabilité de transition d'une *saveur* α à une saveur β est :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \delta_{\alpha\beta} + A_{\alpha\beta} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{\alpha\beta}^2 L}{4E}\right) + B_{\alpha\beta} \sin\left(\frac{\Delta m_{\alpha\beta}^2 L}{4E}\right),$$

où $\Delta m_{\alpha\beta}^2 = m_\alpha^2 - m_\beta^2$, A et B s'obtiennent d'une matrice, unitaire, de mélange U , δ est le symbole de Kronecker avec $\delta_{\alpha\beta} = 1$ si $\alpha = \beta$ et 0 sinon. [Noter le L/E !]

Pour que les neutrinos puissent **osciller**, entre leur différentes saveurs, ils **doivent** avoir une masse.

1983 : avant d'être super, Kamiokande

Construit pour détecter la désintégration du proton (prédiction générique des modèles de grande unification [supersymétriques])

Avec un temps de demi-vie d'au moins 10^{34} années, si un tel processus existe il serait ultra-rare. Rappel, neutron ~ 600 s.

Un tel processus n'a jamais été observé.

Il suit, en direct, les neutrinos issus de l'explosion d'une supernova du grand nuage de Magellan en 1987 (SN 1987A).

En 1988 il est suffisamment précis pour détecter la **direction** des neutrinos. Il établit, sans doutes et pour la première fois, que le soleil est une source de neutrino.

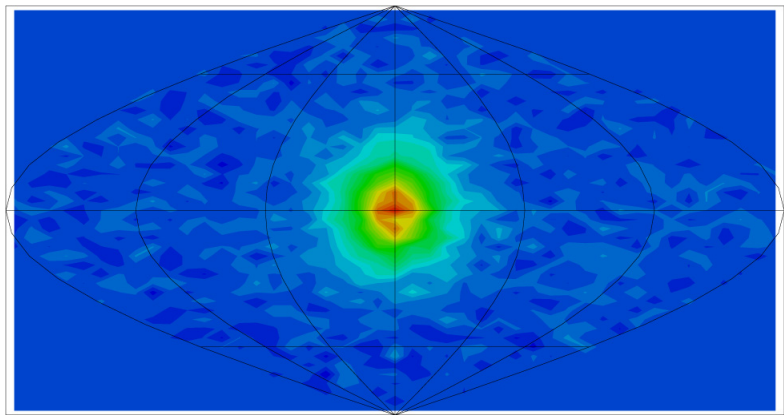


Image du soleil en neutrino (obtenue par Super-Kamiokande)

L'astronomie en neutrino



Raymond Davis Jr.
1914-2006
U. Pennsylvania



Masatoshi Koshiwa
1926-
U. Tokyo

Se partagent la moitié du prix Nobel 2002 pour « leur contribution en astrophysique, en particulier pour la détection des neutrinos cosmiques ». L'autre moitié est attribuée à Riccardo Giacconi, pour les sources cosmiques de rayons-X.

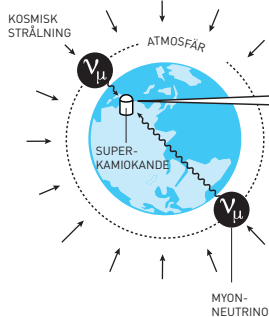
1996 : Super-Kamiokande



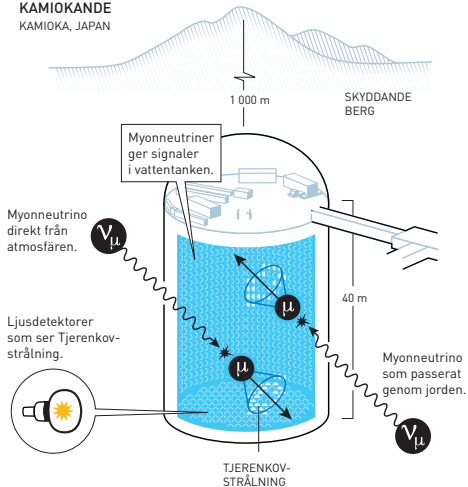
- Gifu au Japon
- 1 km sous terre dans la mine de Kamioka
- 39,3 m de diamètre, haut de 41,4 m
- 50 000 tonnes d'eau ultra-pure
- 11 000⁺ photomultiplicateurs
- Détecte la lumière Cherenkov des muons et électrons produits par réaction inverse.
- Est directionnel.
- Recherche à détecter les neutrinos muoniques ν_{μ} dûs aux interactions des rayons cosmiques avec l'atmosphère terrestre.

1996 : Super-Kamiokande

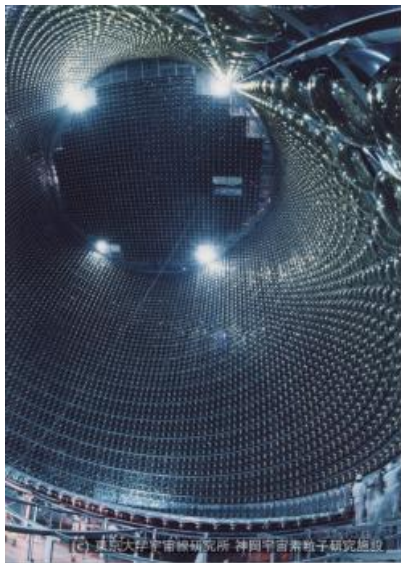
NEUTRINER FRÅN
KOSMISK STRÅLNING



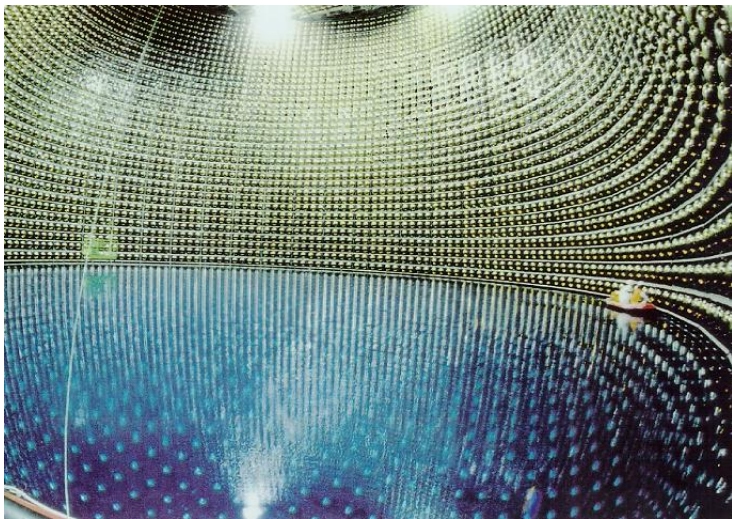
SUPER-KAMIOKANDE
KAMIOKA, JAPAN



1996 : Super-Kamiokande

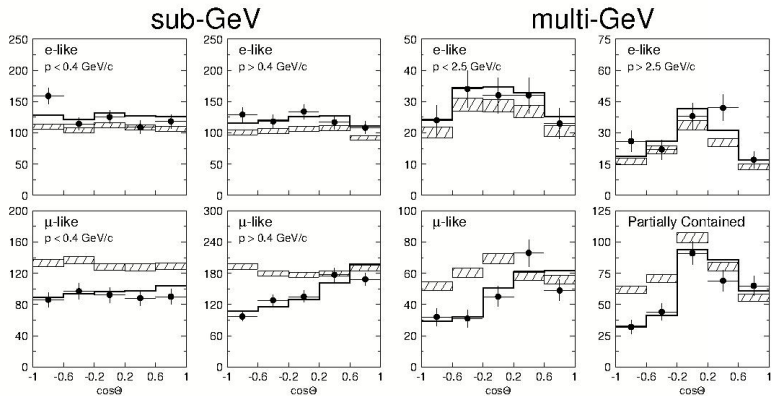


1996 : Super-Kamiokande



Détecteur à moitié rempli d'eau (remarquer : barque, pureté)

1998 : Super-Kamiokande, les résultats



d'événements en fonction de $\cos\Theta$, $\Theta \equiv$ angle zénithal.

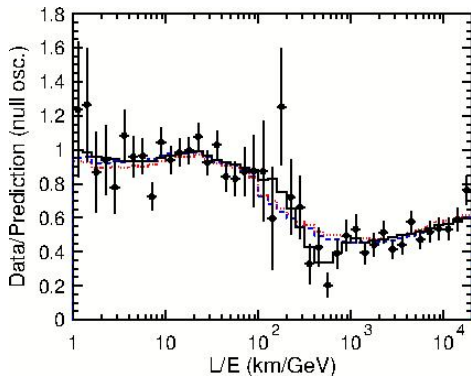
Plus de ν_μ venant de l'atm. « au dessus » ($\cos\Theta = 1$) que de l'atm. « en dessous » ($\cos\theta = -1$) (point antipodal).

Y. Fukuda *et al.*, Physical Review Letters **81**, 1562 (1998)

2004 : Résultats consolidés

Le déficit en ν_μ atmosphériques est la marque d'une oscillation $\nu_\mu \longleftrightarrow \nu_\tau$ ($\# \nu_e$ indépendant de Θ).

Ceci doit s'observer par une oscillation des mesures en fonction L/E , où L distance du point d'émission et E énergie du ν_μ .

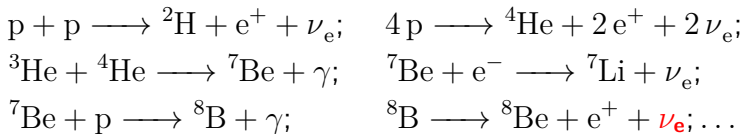


L'anomalie des neutrinos solaires (encore)

Avec le temps les *modèles standards solaires* (SSM) de Bahcall s'améliorent (toujours par Bahcall!) et prennent des noms de plus en plus ésotériques : BSB06, BPS08.

Ces modèles deviennent aussi plus « solides » avec quantités d'observations, telles qu'héliosismologiques, les confirmant.

Mais le déficit en neutrino demeure.



C'est sur ce dernier neutrino que porte le déficit.

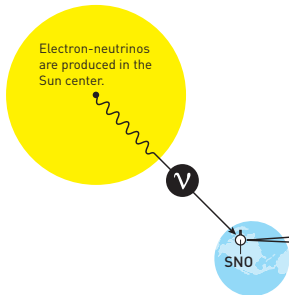
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



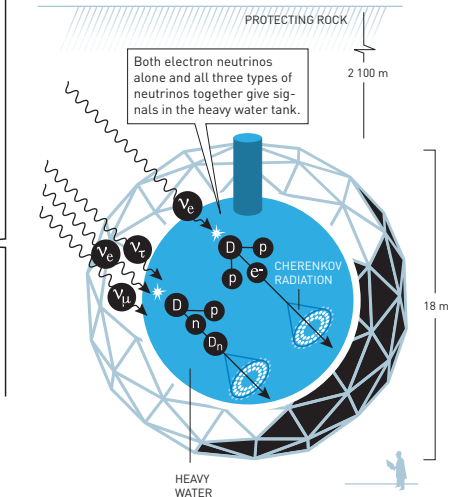
- À Sudbury dans l'Ontario
- 2,1 km sous terre
- boule de 18 m de diamètre
- 1000 tonnes d'eau lourde (deutérium)
- 9 500 photomultiplicateurs
- Distingue les trois neutrinos : ν_e , ν_μ , ν_τ !
- Est directionnel.
- Mesure les flux ϕ de neutrinos solaires.

Sudbury Neutrino Observatory (SNO)

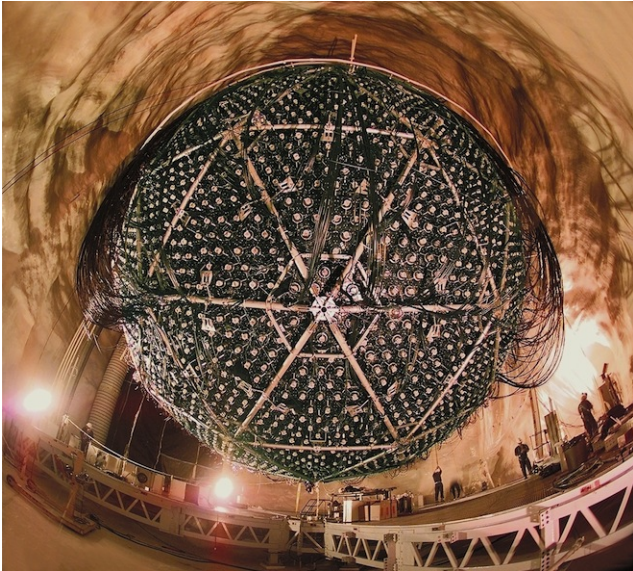
NEUTRINOS FROM
THE SUN



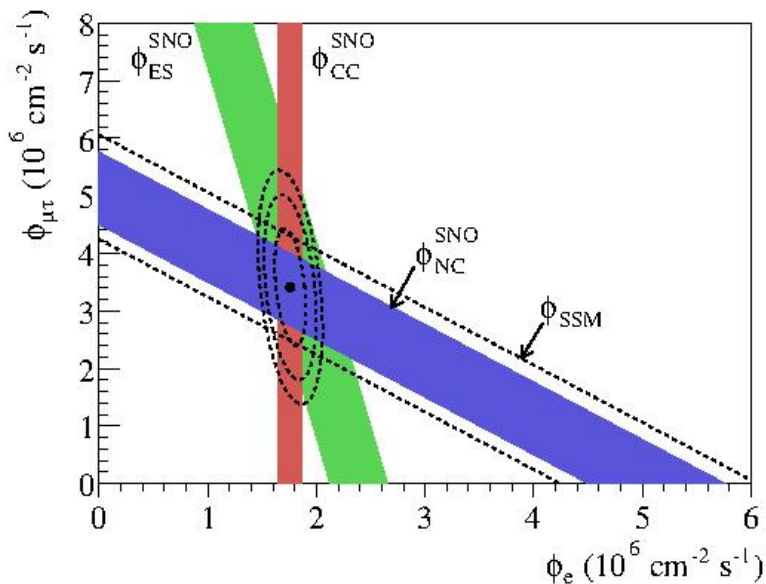
SUDBURY NEUTRINO OBSERVATORY (SNO)
ONTARIO, CANADA



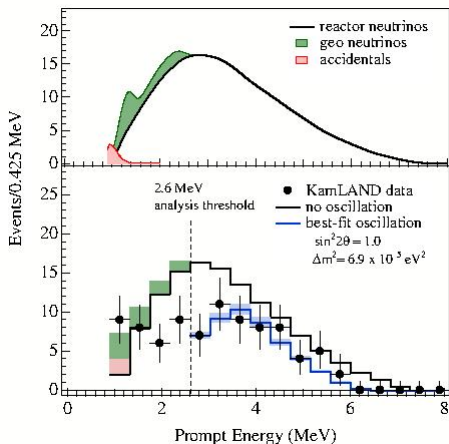
Sudbury Neutrino Observatory (SNO)



2002 : Transformation de saveur



2003 : Oscillations confirmées par KamLAND



Mesure d'anti-neutrinos électriques à Kamioka issus d'un réacteur nucléaire à proximité.

Panneau supérieur. Spectre en énergie attendu au niveau du réacteur.

Panneau inférieur. Ligne solide : simulation du spectre attendu mesuré (sans oscillations) Ligne bleutée : meilleur *fit* des données avec oscillations.

2013 : Résultat final

Après s'être arrêté en 2006 l'analyse des données de SNO se termine en 2013 avec :

$$\phi = \phi(\nu_e) + \phi(\nu_\mu) + \phi(\nu_\tau) = (5,25 \pm 0,16^{+0,11}_{-0,13}) \times 10^6 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}.$$

À comparer à $\phi \sim 5,94$ ou $\phi \sim 5,58$, des modèles solaires.

En particulier

$$\begin{aligned} \phi_{\mu\tau} = \phi(\nu_\mu) + \phi(\nu_\tau) &= (3,26 \pm 0,25^{+0,40}_{-0,35}) \times 10^6 \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \\ &\neq 0 \end{aligned}$$

Conclusion des deux expériences

Les neutrinos oscillent entre leurs trois saveurs → au moins deux d'entre eux possèdent une masse.

C'est un signal au delà du modèle standard de la physique des particules !

Les dernières expériences sur la décroissance β d' ^3H donnent :

$$m(\nu_e) < 2 \text{ eV}/c^2 \sim 2,2 \times 10^{-36} \text{ kg.}$$

Les observations/contraintes cosmologiques¹ donnent :

$$\sum_i m(\nu_\alpha) < 2,5 \times 10^{-37} \text{ kg.}$$

1. Une histoire pour un autre jour

Le futur c'est maintenant

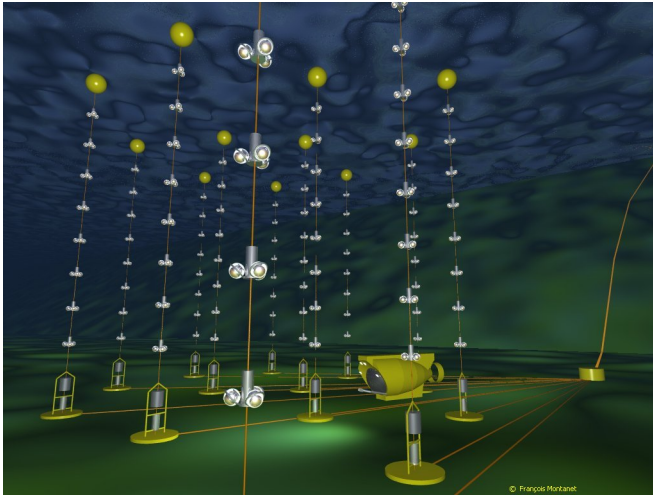
Les résultats récompensés cette année datent d'il y a 15 ans.

D'autres expériences ont été effectuées et d'autres planifiées.

Deux voix.

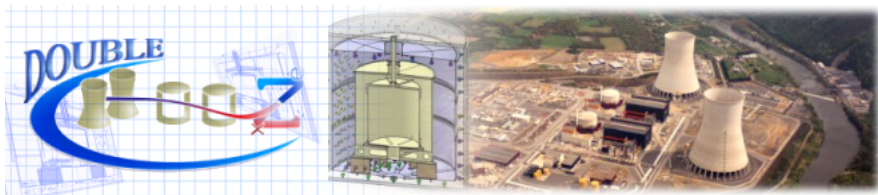
- L'étude des neutrinos en soi : chercher à en déterminer la masse, s'il n'y en a pas d'autres (neutrinos stériles), violation CP, *etc.*
- Utiliser les neutrinos comme outils d'observations : vue du soleil en neutrinos, vue de la galaxie en neutrinos, observation du fond diffus cosmologique en neutrinos ($\sim 1,9K$) [avant la transparence !], matière « noire », monopoles magnétiques, *etc.*

Observatoire à neutrinos : ANTARES (2007)



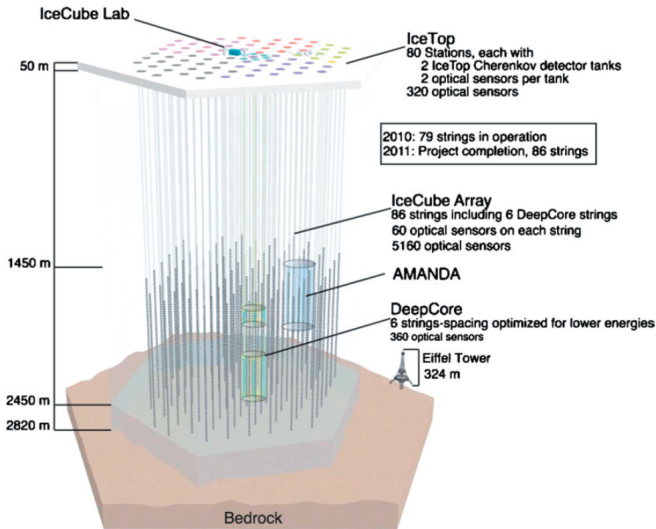
À côté de Toulon à 2500 m de profondeur.
« Regarde » vers le bas, la terre filtrant les rayons.

Mesure des oscillations : double Chooz (2011)



À Chooz dans les Ardennes

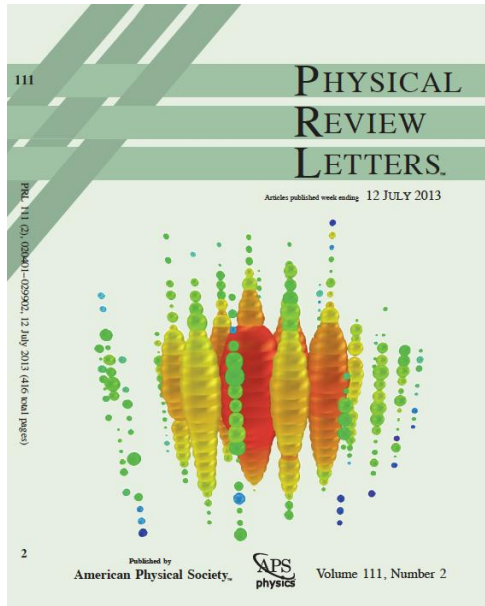
Observatoire : IceCube (pas le rappeur) (2011)



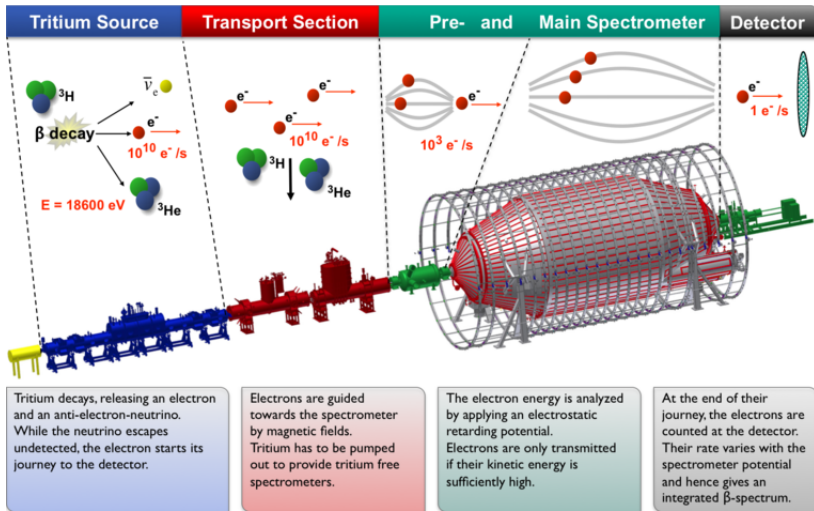
Au pôle sud.



Neutrinos d'énergie $\sim \text{PeV} \sim 10^{15} \text{ eV}$ (2013)



Masse des neutrinos : KATRIN (2015)



À Karlsruhe

KATRIN, le retour à Chadwick

