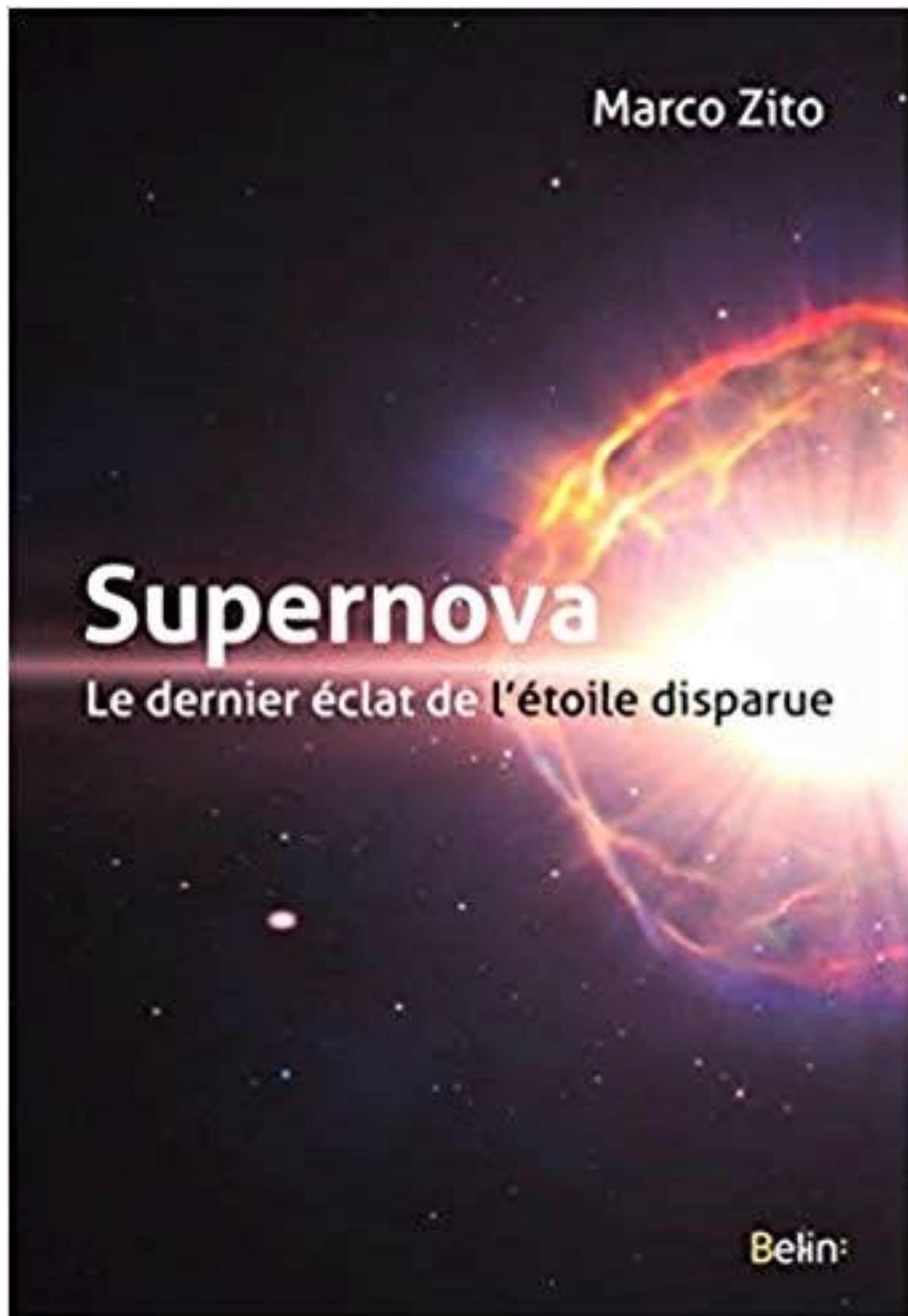


Conférence sur les neutrinos, le 23 Novembre 2019, à
Montgeron, par Marco Zito, physicien, directeur du
LPNHE, CNRS-IN2P3-Sorbonne-université



Pour en savoir plus : Le livre de Marco Zito



Marco Zito

Supernova

Le dernier éclat de l'étoile disparue

Belin:

Les neutrinos dévoilent les secrets de la matière et des étoiles

Marco Zito

LPNHE/IN2P3 CNRS et Sorbonne Université

(et IRFU/DPhP CEA Saclay)

Société Astronomique de Montgeron

Montgeron

23 novembre 2018

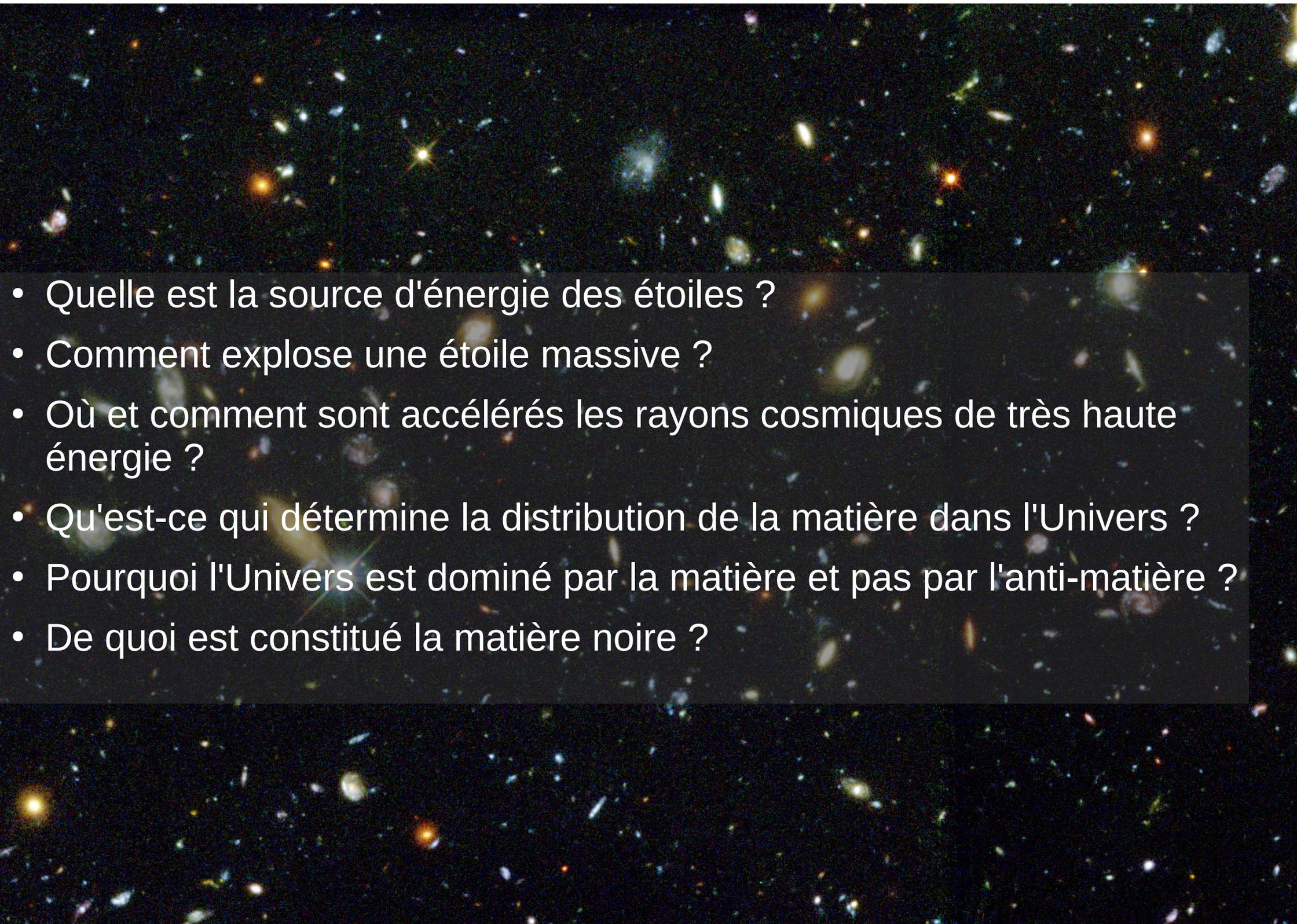


Pour approfondir

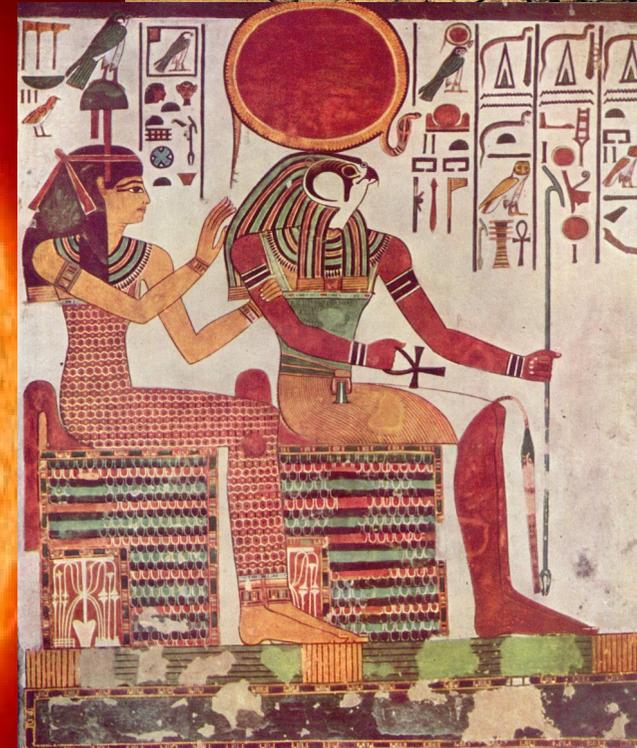
Marco Zito *Supernova* Belin 2018





- 
- Quelle est la source d'énergie des étoiles ?
 - Comment explose une étoile massive ?
 - Où et comment sont accélérés les rayons cosmiques de très haute énergie ?
 - Qu'est-ce qui détermine la distribution de la matière dans l'Univers ?
 - Pourquoi l'Univers est dominé par la matière et pas par l'anti-matière ?
 - De quoi est constitué la matière noire ?

Le Soleil beaucoup de questions
l'aube de l'humanité !



Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies

CNRS/IN2P3 Sorbonne Université

Sur le campus de Jussieu
Possibilité de le visiter à
l'occasion de la Fête de la
Science
100 permanents, dont 50
ingénieurs

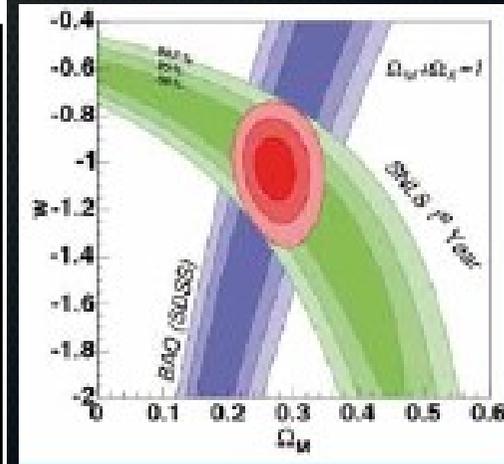
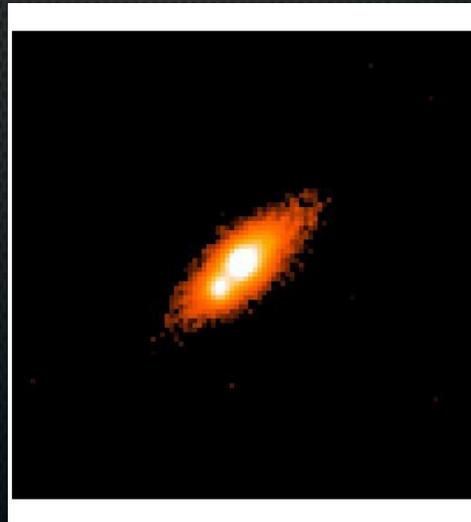
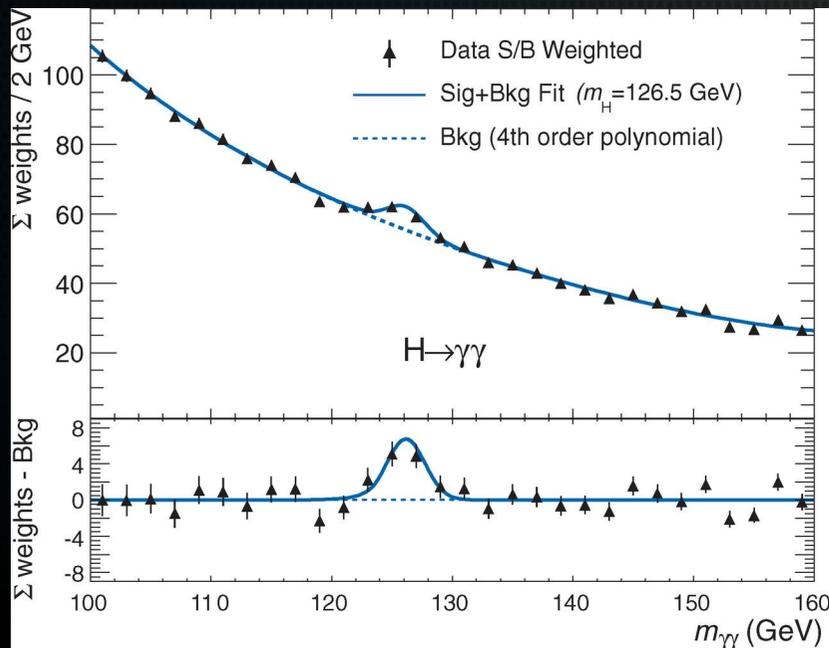


De grandes collaborations internationales



Des découvertes récentes

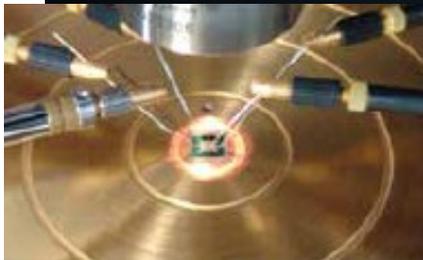
- Découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers (Prix Nobel 2011) : mesures avec les Supernovas Ia
- Découverte du boson de Higgs au CERN (2012)



LPNHE : réalisations et compétences techniques

- Quelques points forts des compétences : mécatronique, CCD, capteurs silicium, photométrie, électronique, instrumentation, DAQ et calcul, ...
- Grâce à des plateaux de haute technicité (salles blanches, atelier de montage, cluster de calcul Tier2)

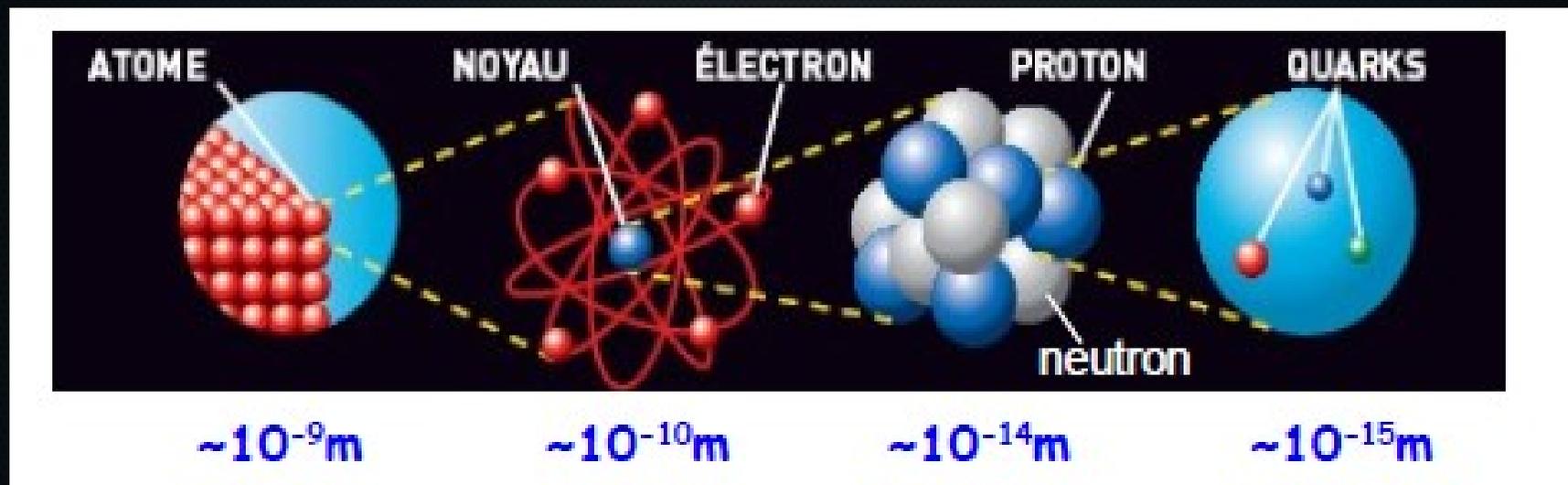
L'échangeur de filtres de LSST : une des réalisations phare du LPNHE !



Sommaire

- Le Modèle Standard : la théorie des particules élémentaires
- La découverte du neutrino
- L'énigme des neutrinos du Soleil
- Les oscillations des neutrinos
- Les neutrinos comme sondes des systèmes astrophysiques denses et de l'Univers lointain

Le monde des particules élémentaires

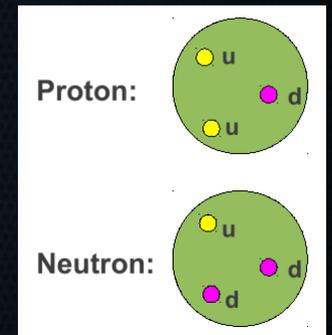
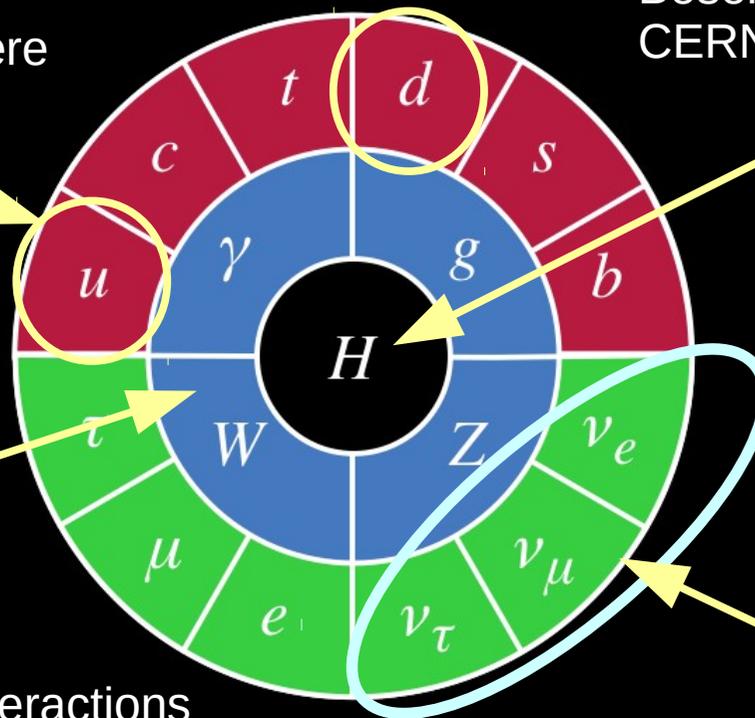


Les neutrinos font partie des particules élémentaires comme l'électron ou les quarks

Les particules élémentaires selon le Modèle Standard

Cercle externe
Particules qui forment la matière

Boson de Higgs, découvert au CERN de Genève en 2012



Cercle interne
Particules responsables des interactions

Neutrinos : il y a trois types de neutrinos

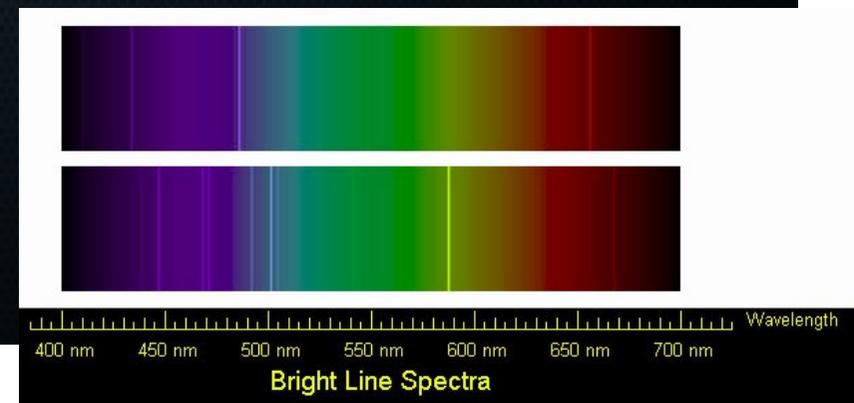
Les particules W et Z sont très massives (80 fois plus qu'un proton) : ce qui explique la faiblesse de l'interaction faible

Les interactions fondamentales

- Interaction gravitationnelle : chute des corps, Système Solaire
- Interaction électromagnétique : lie les électrons au noyau dans l'atome
- Interaction forte : lie les protons et les neutrons dans le noyau
- Interaction faible : « cousine » de l'interaction électromagnétique. Elle est responsable des interactions des neutrinos. (C'est l'étude de ces interactions qui a entre autre permis de valider le Modèle Standard)

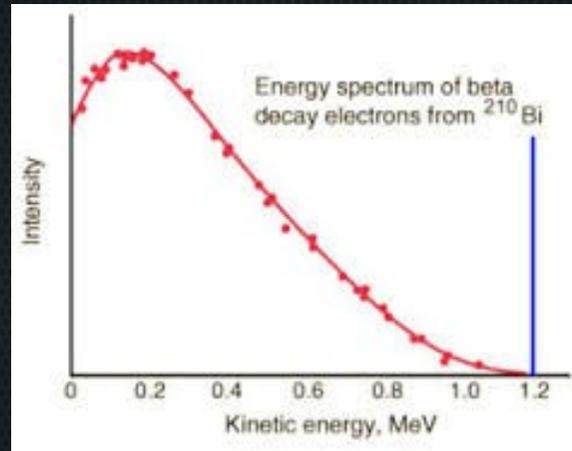
La matière et la lumière

- La lumière (photon) peut être émise dans les transitions d'un atome entre deux niveaux d'énergie
- Le principe de conservation de l'énergie impose que le photon ait une énergie déterminée E_{ph}
- $E(\text{état initial}) = E(\text{état final}) + E_{ph}$
- A un photon d'énergie donnée E_{ph} correspond une fréquence fixe f (longueur d'onde fixe) : $E_{ph} = h f$
- C'est l'origine des raies dans le spectre des éléments



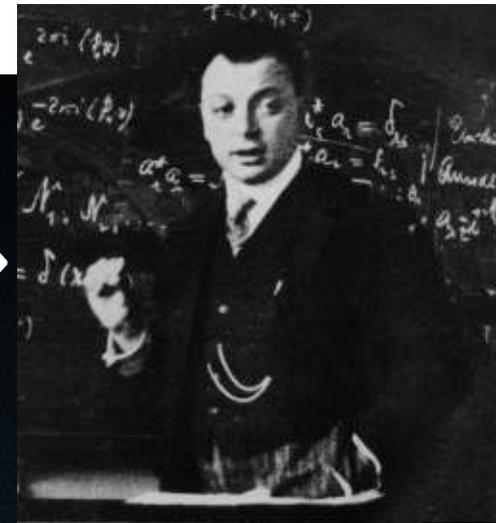
Le mystère de la radioactivité bêta

- Dans les désintégrations bêta, l'atome subit une transmutation (un neutron du noyau se transforme en proton) $n \rightarrow p + e$
- Un électron est émis et son énergie peut prendre une gamme de valeurs



- Où est passé le reste de l'énergie ?
- **Solution 1** : « Bah, il ne faut pas y penser, c'est comme les nouveaux impôts »
- **Solution 2** (Niels Bohr) : le principe de la conservation de l'énergie n'est pas valable dans le monde microscopique
- **Solution 3** (W. Pauli)

Une solution « désespérée »



Lettre du physicien W. Pauli à des physiciens allemands lors d'une réunion à Tübingen (décembre 1930).

Original - Photocopy of Pauli 0373
Abschrift/15.12.56 **PM**

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Cloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich baldvollst anzuhören bitte, Ihnen das näherem auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verwerfalten Ausweg verfallen um den "Wechselzatz" (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, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Chers Mesdames et Messieurs radioactifs, [...] concernant la nature continue du spectre bêta j'ai eu recours à une solution désespérée pour sauver le principe de conservation de l'énergie. C'est-à-dire la possibilité qu'il existe au sein du noyau des particules électriquement neutres que j'appelle « neutrons ».

Une solution désespérée

- Wolfgang Pauli propose en 1930 qu'une nouvelle particule soit produite avec l'électron

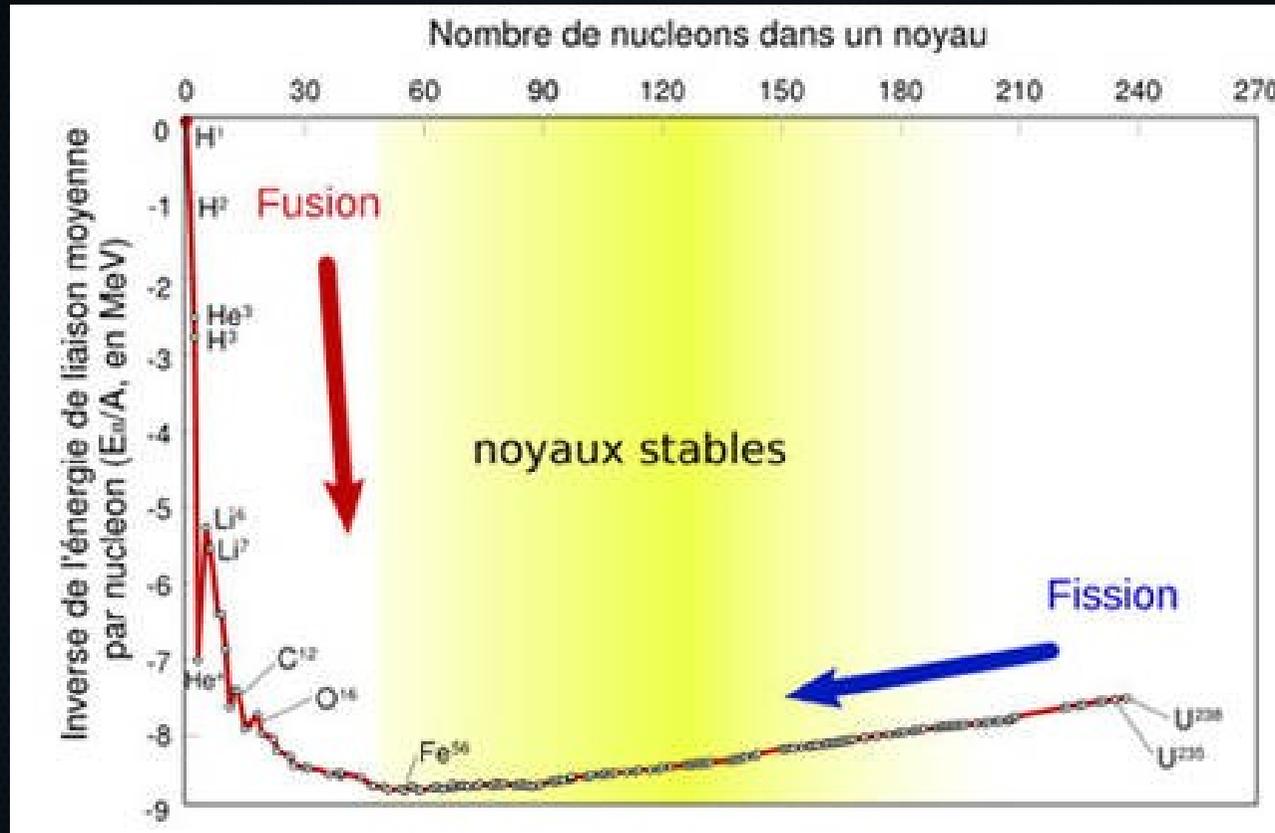


- Il doit s'agir d'une particule neutre, très légère, qui interagit de façon très faible
- Pourquoi s'agit-il d'une solution désespérée ? Les neutrinos n'interagissant quasiment pas avec la matière, cette hypothèse reste à l'état d'hypothèse pendant deux décennies
- Peut-on les observer et se convaincre de leur existence ?

Quelques interactions des neutrinos

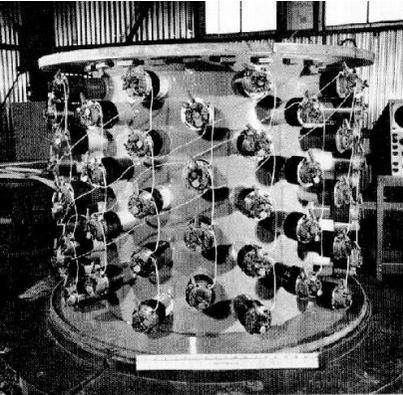
- $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ Désintégration bêta
 - $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ Désintégration bêta inverse
 - $p + p \rightarrow D (pn) + e^+ + \nu$ Fusion de deux protons (Soleil) en deutérium
 - $\nu_e + n \rightarrow p + e$ Interaction du neutrino ν_e
 - $\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu$ Interaction du neutrino ν_μ
-
- Tous ces processus sont extrêmement rares mais on peut calculer de façon très précise leur probabilité de se produire (E. Fermi, 1934) à partir des mesures de la radioactivité bêta

Énergie nucléaire



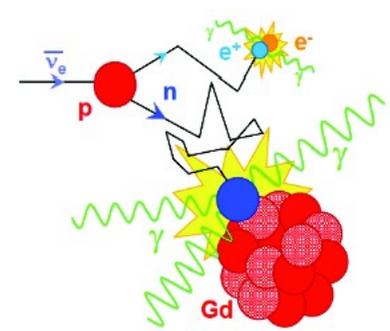
Futura-sciences.com

Dans les deux cas (fusion et fission) intervient l'interaction faible et il y a production abondante de neutrinos



Prix Nobel pour F. Reines en 1995

La découverte du neutrino

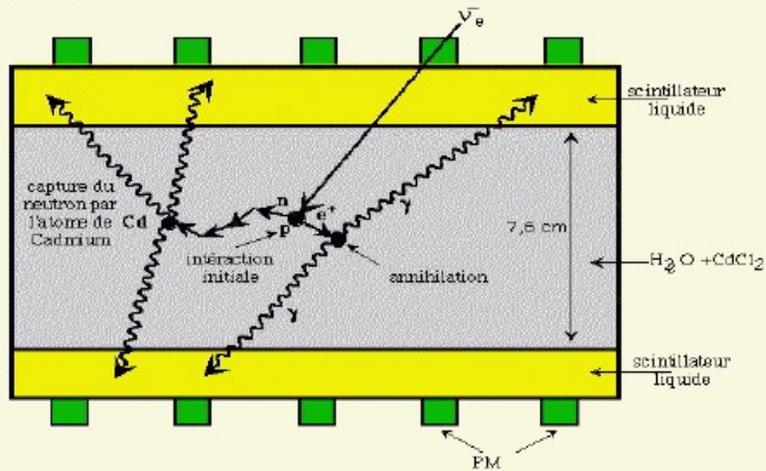


- Expérience de F. Reines et C. Cowan auprès du réacteur de Savannah River (États-Unis) en 1956

Réacteur arrêté 1 évt/h

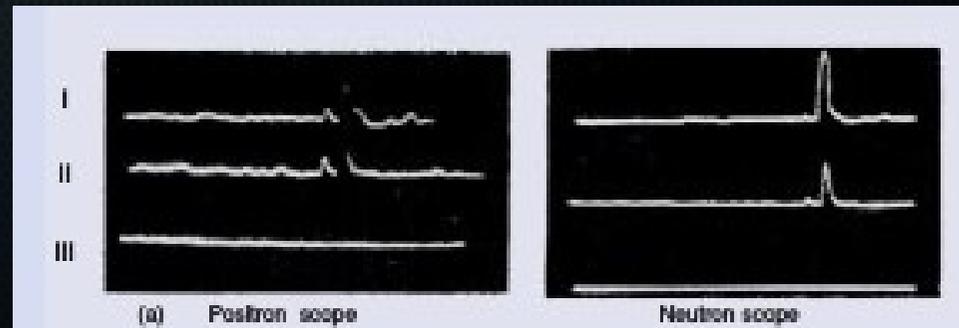
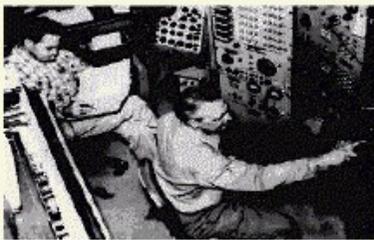
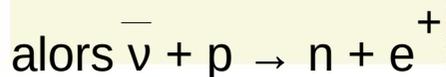
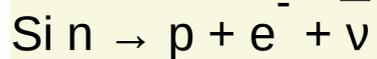
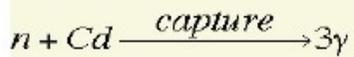
réacteur en marche 4 évt/h

SIGNAL = 3 neutrinos/heure !

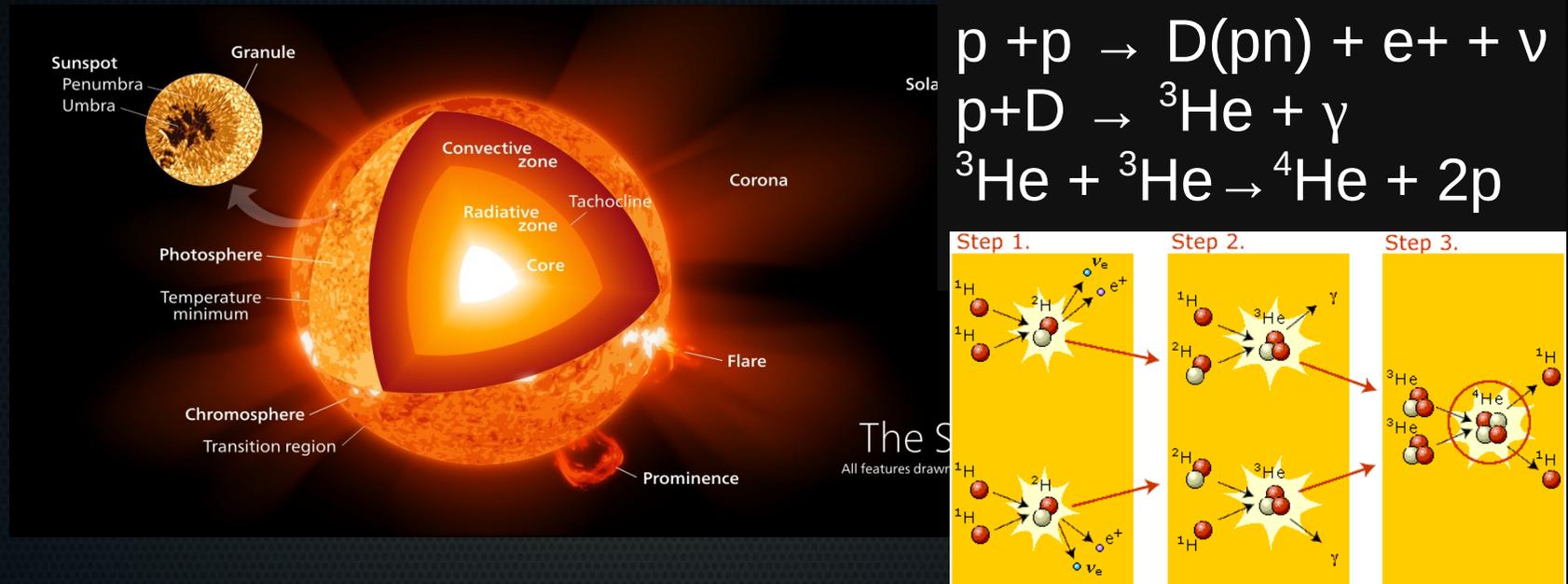


Expérience de Reines et Cowan (1953)

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

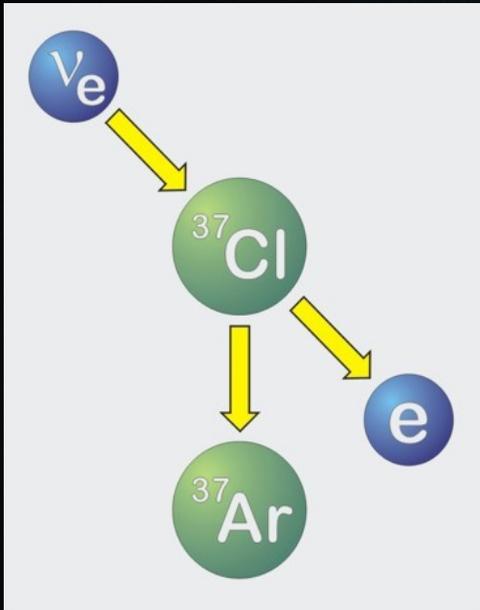


Le Soleil : une source intense de neutrinos



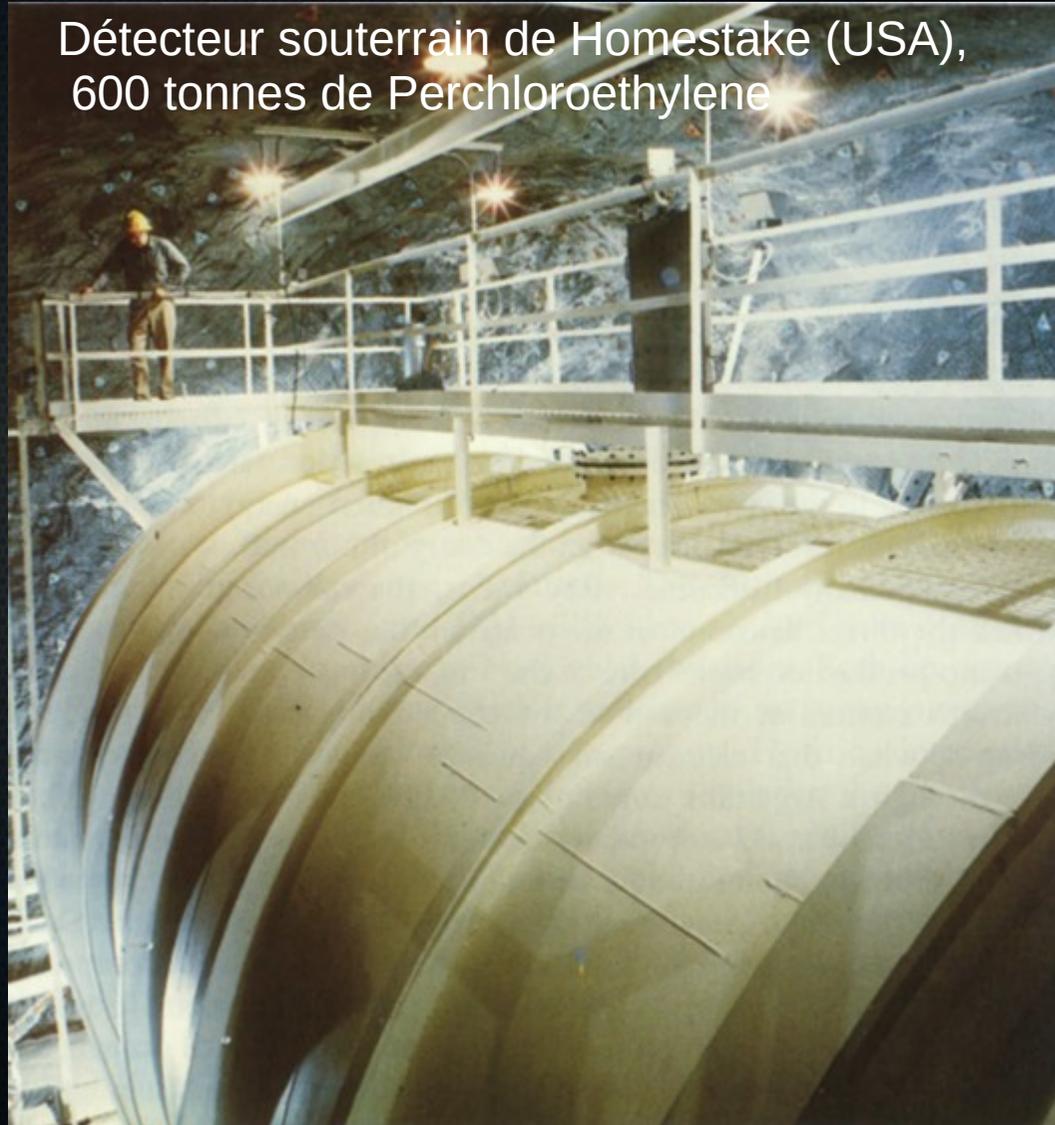
- Soleil : source de neutrinos $7 \cdot 10^{10}$ $\nu/s/cm^2$ (sur Terre)
- Ils sont produits dans les processus de fusion nucléaire et nous renseignent sur l'intérieur du Soleil : $T=14 \cdot 10^6$ degrés !
- La longévité du Soleil (~ 10 milliards d'années) est une conséquence de la faiblesse de l'interaction faible !

A la recherche des neutrinos du Soleil



Les neutrinos devraient transformer un atome de Chlore par jour en Argon (radioactif)

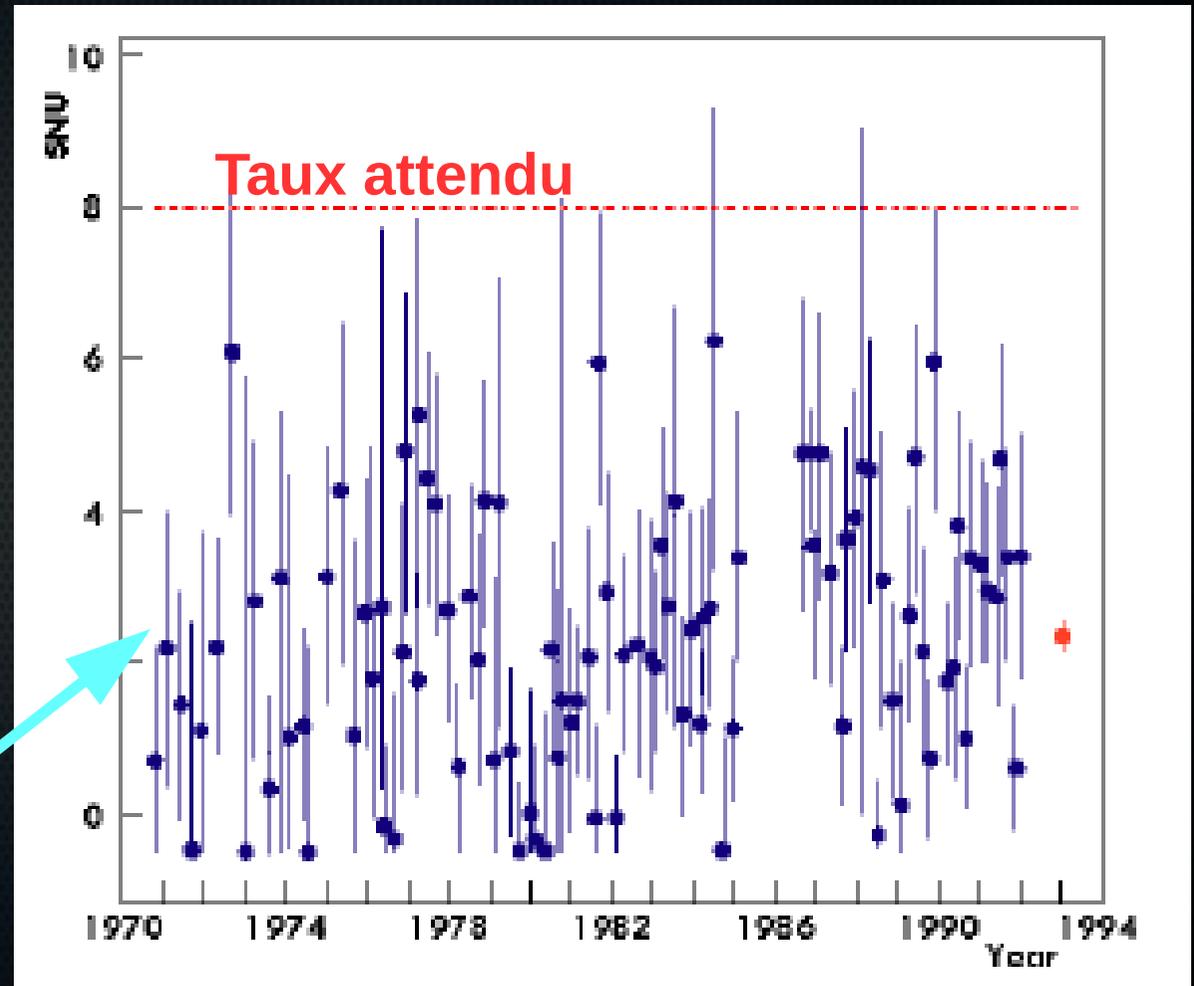
Détecteur souterrain de Homestake (USA),
600 tonnes de Perchloroethylene



Où sont passés les neutrinos ?

- Résultat surprenant : trois fois moins de neutrinos que prévu !

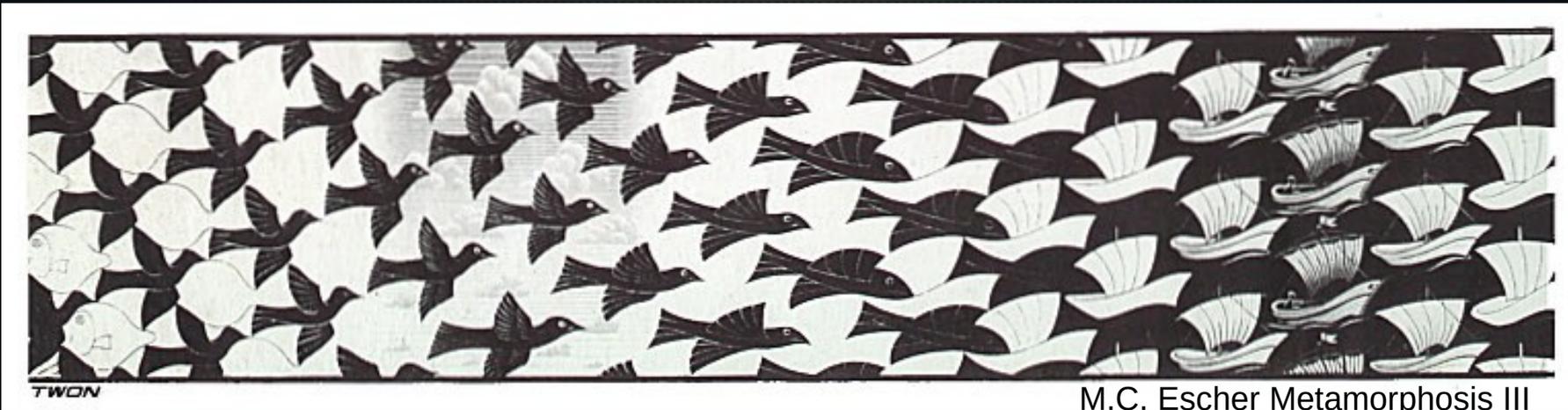
Raymond Davis
(prix Nobel 2002)



Taux mesuré

Les oscillations des neutrinos

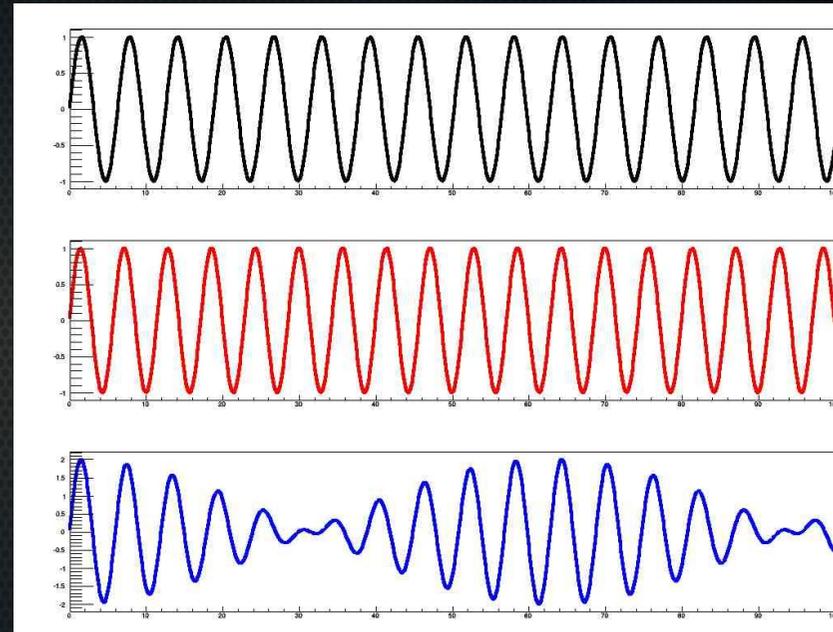
- Dans le monde microscopique, à toute particule de masse donnée correspond une fréquence donnée
- Les neutrinos de type donné $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$ correspondent à des superpositions de neutrinos de masse donnée $(\nu_1 \nu_2 \nu_3)$ (de même qu'un accord musical est la superposition de plusieurs notes)
- La nature du neutrino change au cours de sa propagation



M.C. Escher Metamorphosis III

La métamorphose musicale : les battements

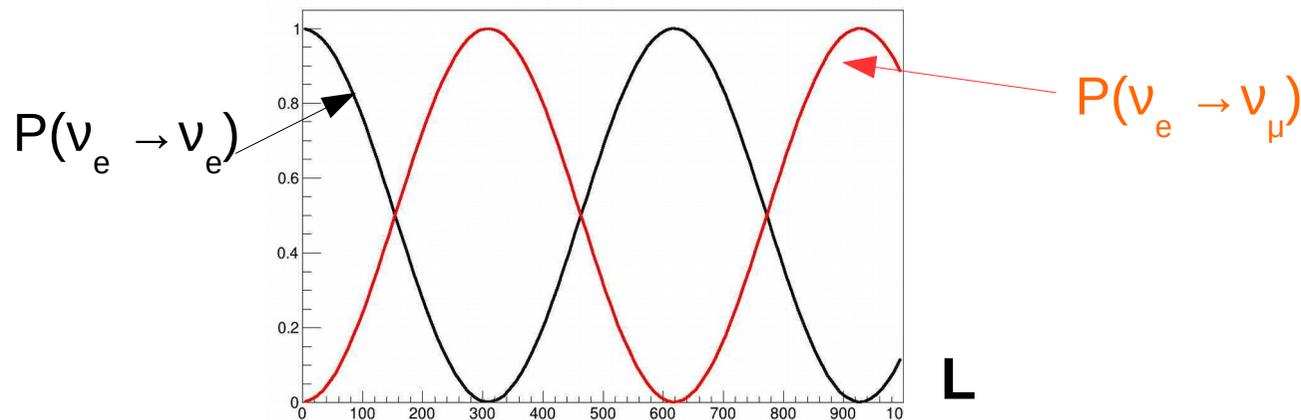
- Si on ajoute deux sons aux fréquences voisines (analogues aux deux neutrinos de masse définie m_1 et m_2) on obtient un son qui connaît des variations périodiques de son intensité (les oscillations)
- $\sin(\omega_1 t) + \sin(\omega_2 t) = 2 \sin\left(\frac{(\omega_1 + \omega_2)t}{2}\right) \cos\left(\frac{(\omega_1 - \omega_2)t}{2}\right)$



Les oscillations de neutrinos

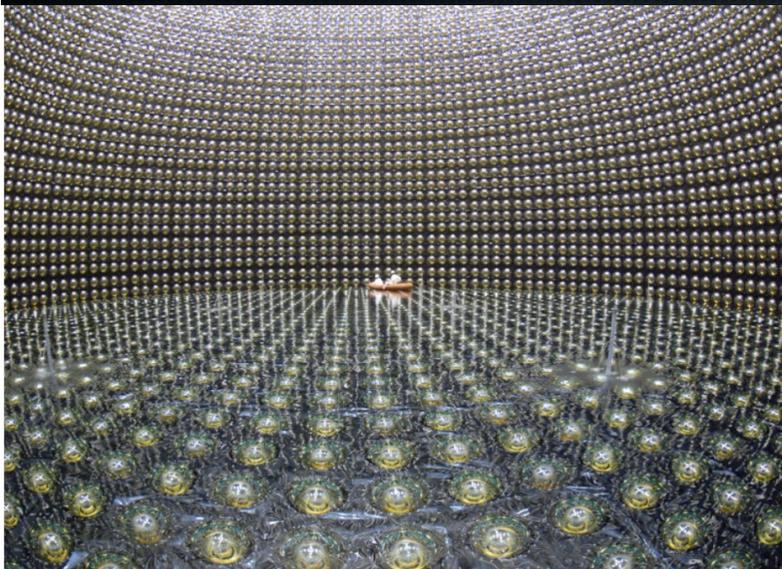
L'hypothèse de l'oscillation des neutrinos donne un cadre très contraint :

- 1) La probabilité d'oscillation dépend de la distance de propagation L comme $P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2(\Delta m^2 L/4E)$ où $\Delta m^2 = m^2_2 - m^2_1$
- 2) Malgré les oscillations, le nombre total de neutrinos ne change pas $P(\nu_e \rightarrow \nu_e) + P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) + P(\nu_e \rightarrow \nu_\tau) = 1$

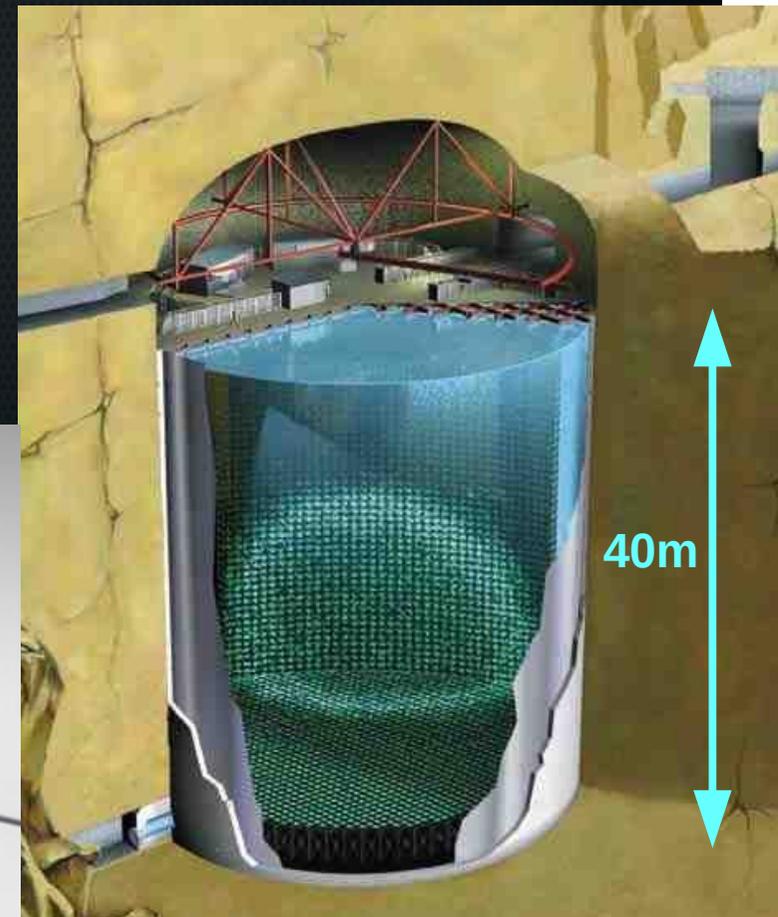


Un grand détecteur souterrain : Super-Kamiokande au Japon

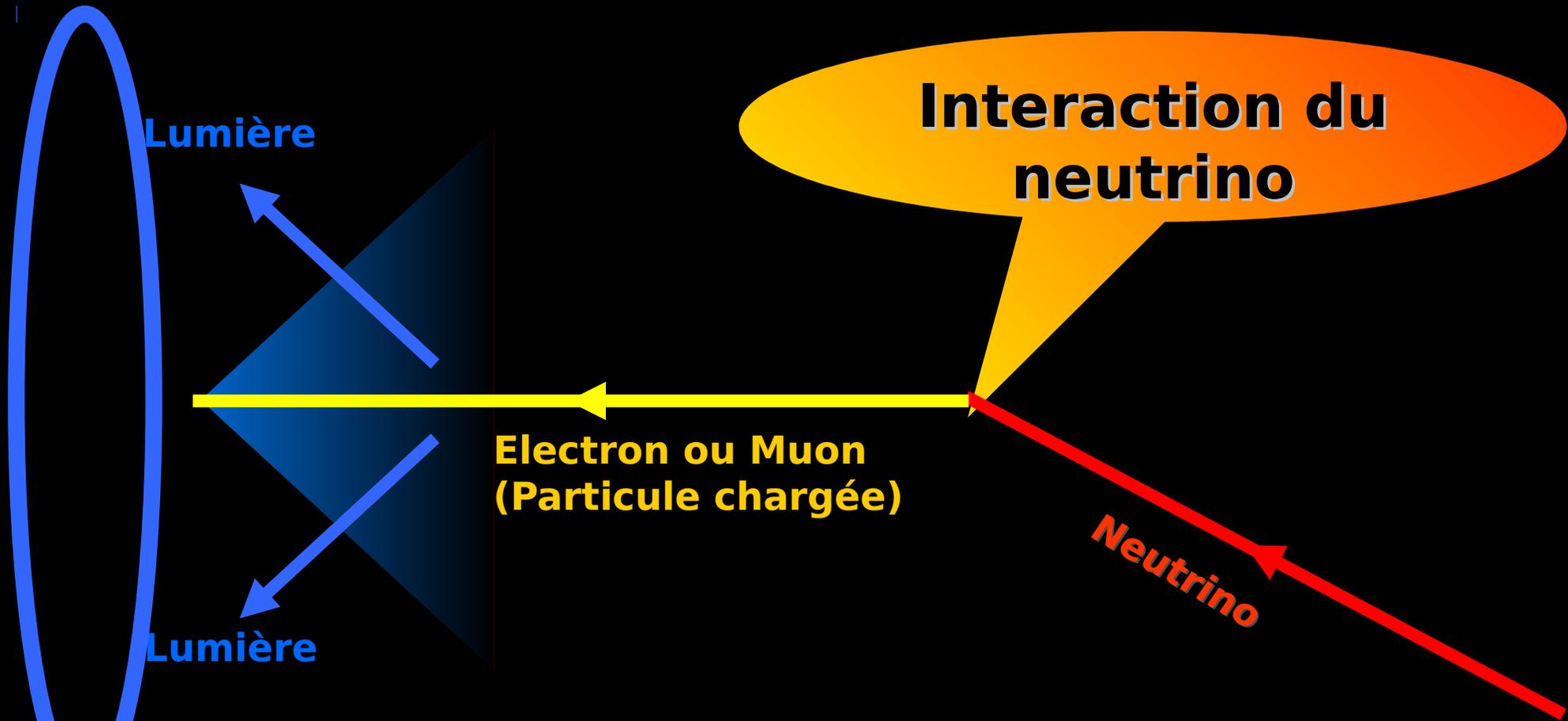
- 50 000 tonnes d'eau ultra-pure dans une cuve souterraine de 40 m de diamètre au Japon
- Observé par 11 000 photomultiplicateurs de grande taille
- En prise de données depuis 1996
- Les interactions des neutrinos y produisent de courtes lueurs de lumière Cherenkov



Un photomultiplicateur

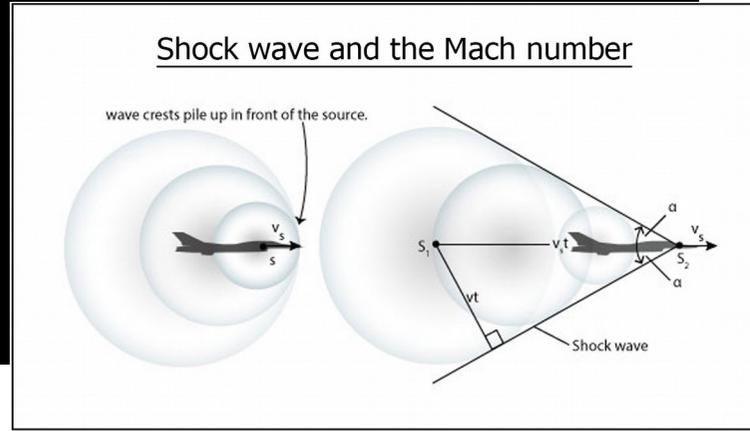
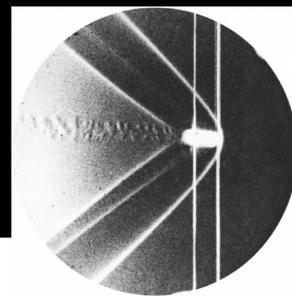


L'effet Tcherenkov



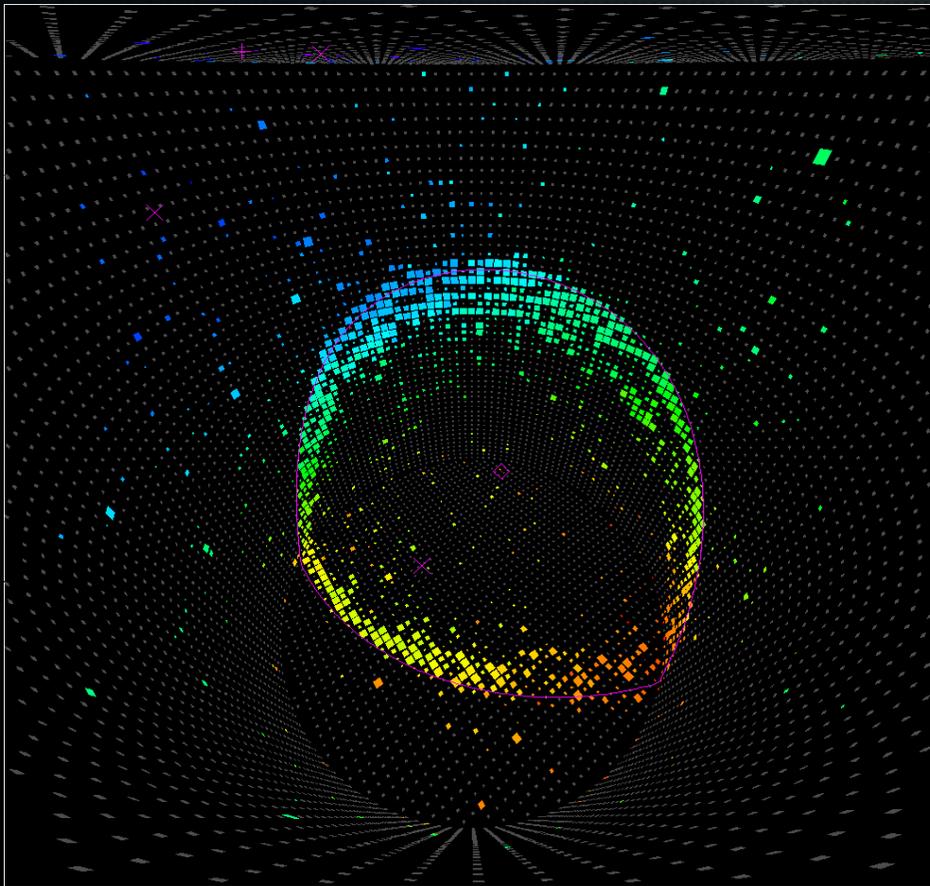
Anneau
Tcherenkov

Eau

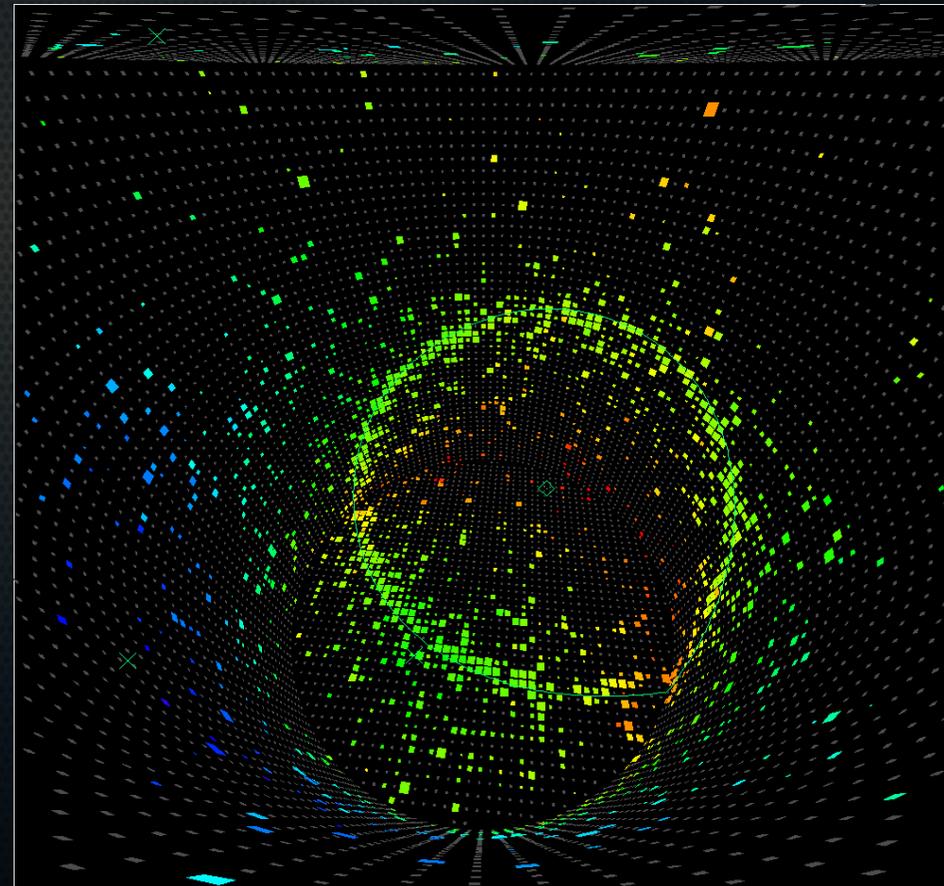


Interactions des neutrinos vues par Super-Kamiokande

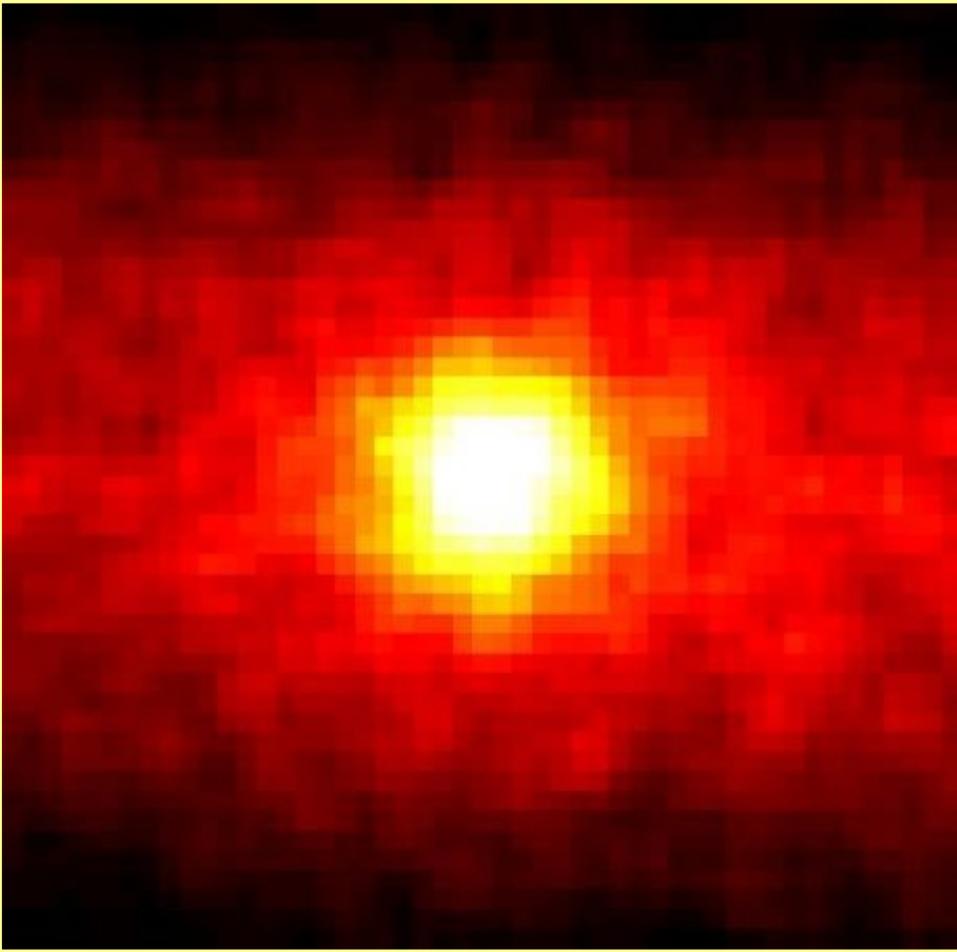
- Neutrino de type muonique



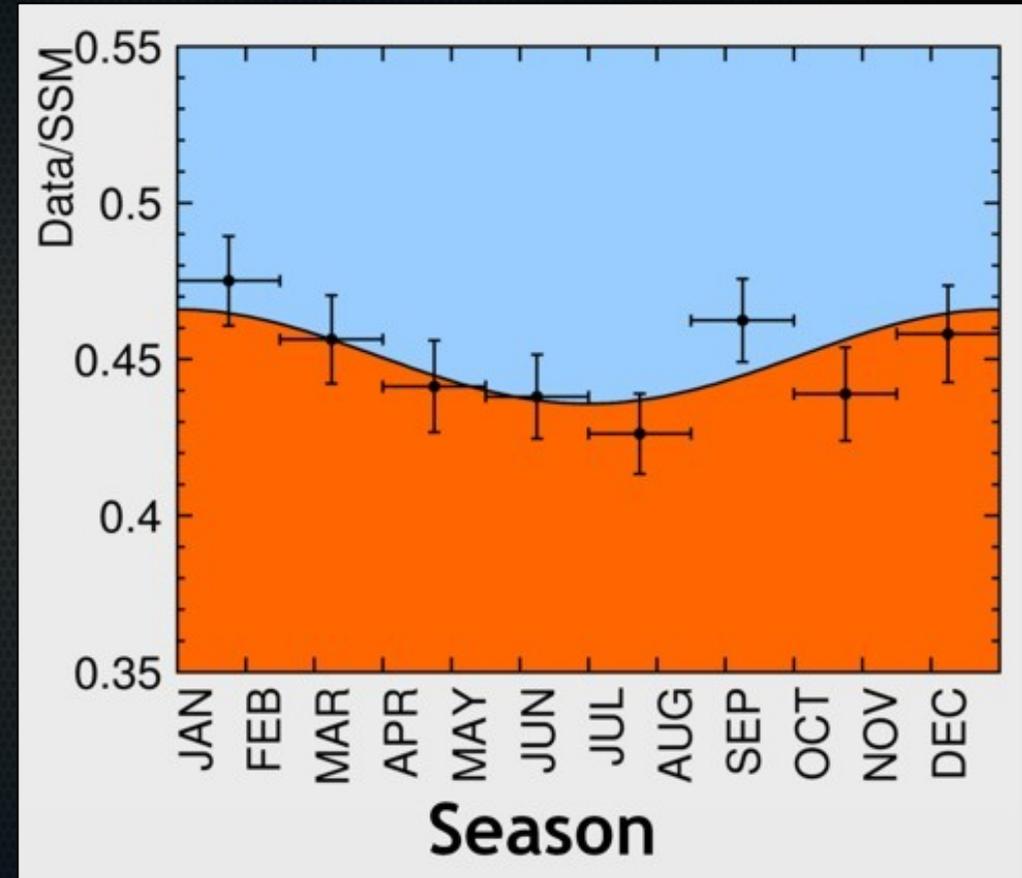
- Neutrino de type électronique



Les neutrinos solaires observés en direct



Le Soleil observé sous terre par les neutrinos



La distance variable entre le Soleil et la Terre induit une modulation du nombre de neutrinos détectés

Une autre source de neutrinos : les rayons cosmiques



$p + \text{Azote} \rightarrow \text{pions}$

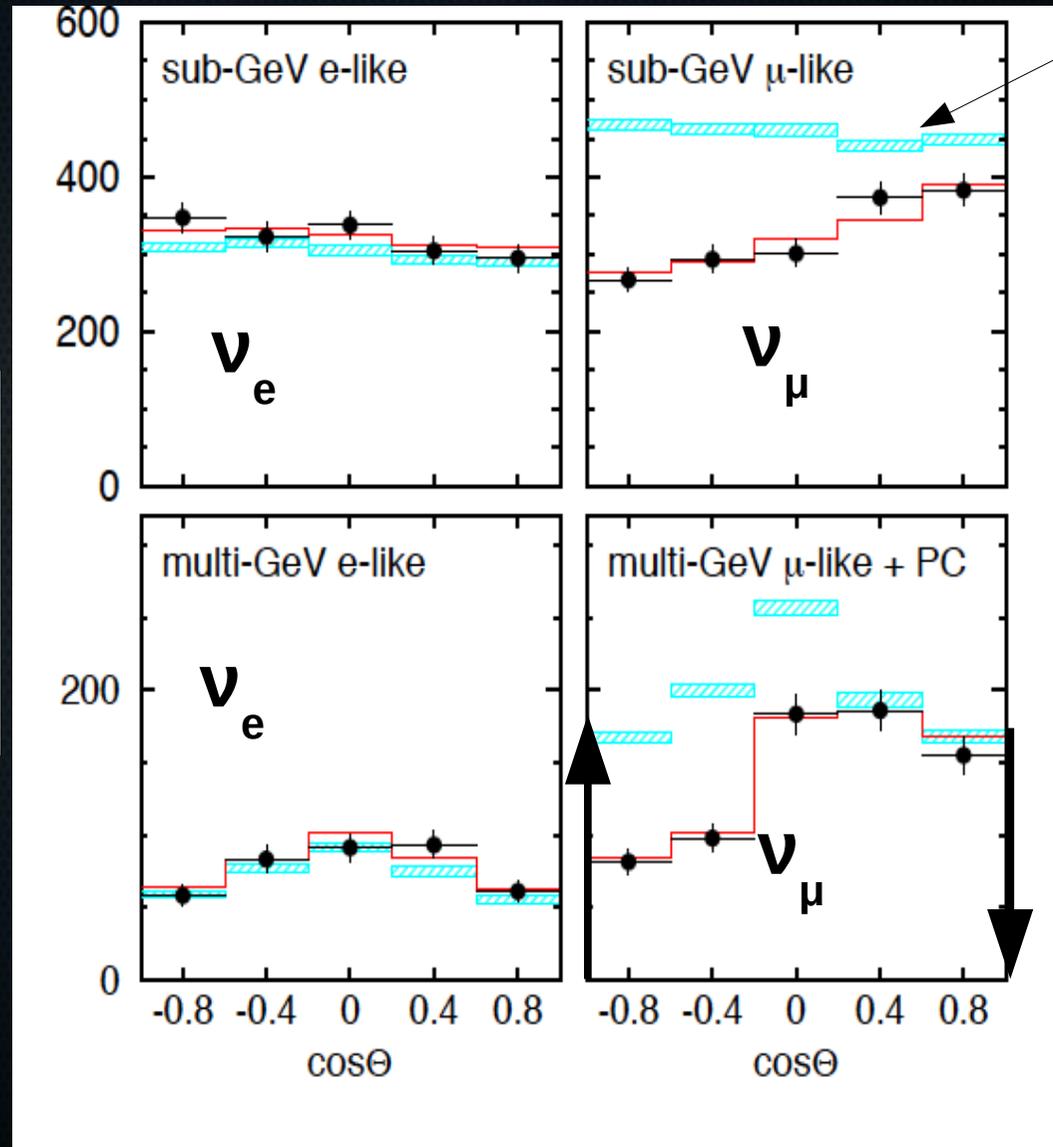
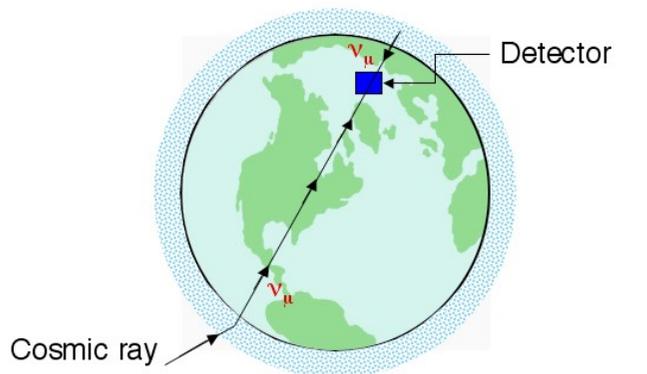
$\pi \rightarrow \mu + \nu_{\mu}$

$\mu \rightarrow e + \nu_{\mu} + \nu_e$

Au niveau du sol :

$2 \nu_{\mu}$ pour $1 \nu_e$

Les oscillations révélées



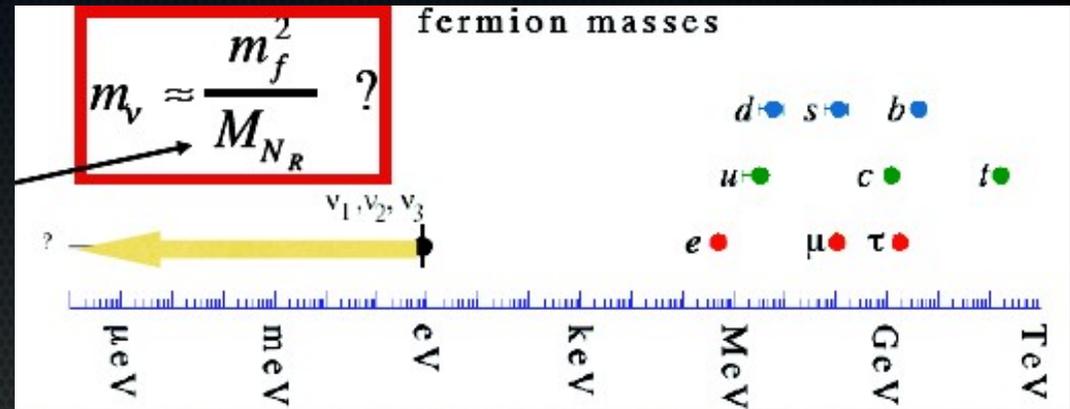
Attendu sans oscillation

Les oscillations révélées

- En 2001, l'expérience SNO au Canada mesure les différentes composantes des neutrinos solaires
- Le flux total est $\Phi_{\text{tot}} = 5.44 \pm 0.99$
- En accord avec le modèle du Soleil (5.05)
- Alors que le flux de neutrino ν_e $\Phi_e = 1.75 \pm 0.12$
- En unité $10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- C'est la preuve que les neutrinos changent d'identité, car le Soleil n'émet que des ν_e

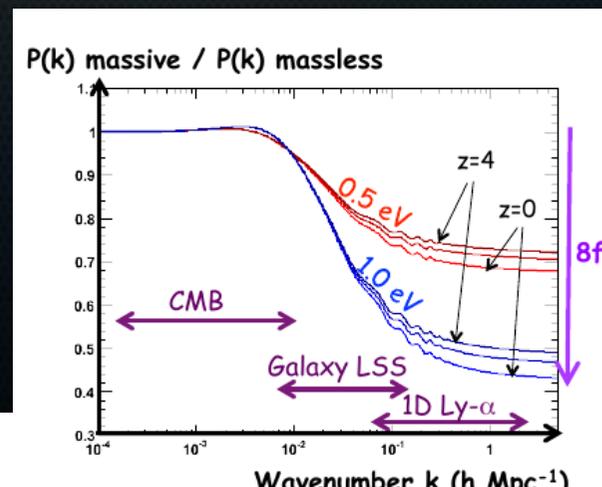
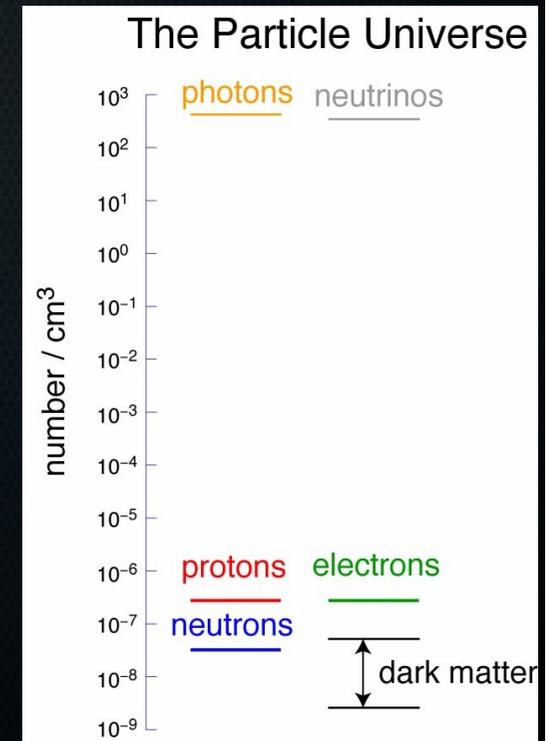
Ce qu'on sait sur les neutrinos

- Des masses 10^6 plus faibles que les autres fermions élémentaires
- Des grands angles de mélange
- La particule la plus abondante dans l'Univers après le photon (laissés par le Big Bang)
- Une possible explication de l'asymétrie matière-antimatière dans l'Univers



$$V_{PMNS} = \begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & 0.2 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.001 \\ 0.2 & 1 & 0.01 \\ 0.001 & 0.01 & 1 \end{pmatrix}$$

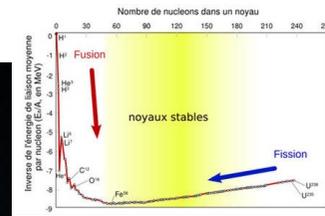


The Tokai to Kamioka (T2K) experiment

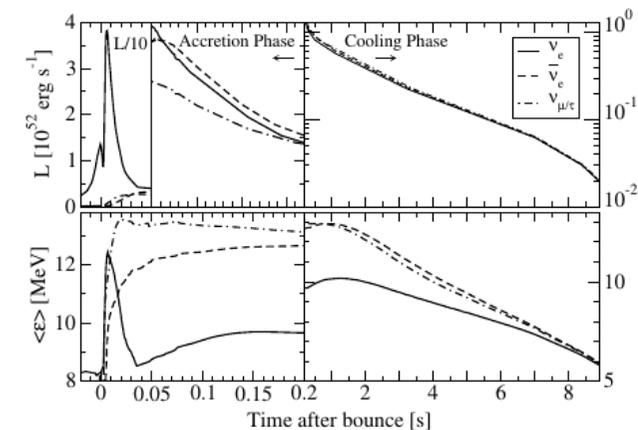
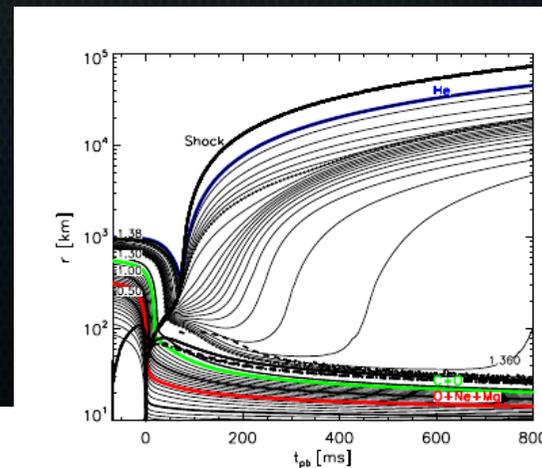
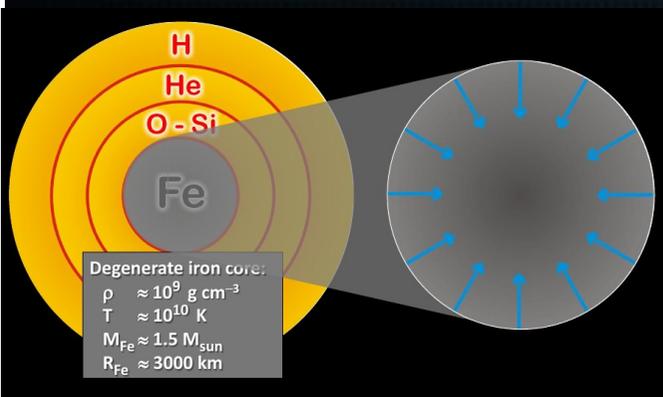


- Long-baseline (295 km) neutrino experiment in Japan between J-PARC (Tokai) and Super-Kamiokande (SK).
- Primary proton beam: 30 GeV/c, 480 kW
 $3.0 \cdot 10^{21}$ Proton On Target
- SK: ~32 kt fiducial mass. ~100% livetime

Pourquoi les étoiles massives explosent



- La production d'énergie nucléaire par fusion s'arrête aux noyaux de fer
- Il y a une masse limite pour un système autogravitant supporté par la pression de dégénérescence des électrons (ou des nucléons) (Chandrasekhar, $\sim 1.5 M_{\odot}$) au delà il y a implosion
- L'implosion se transforme en explosion quand la densité de la matière nucléaire est atteinte (grâce à l'énergie déposée par les neutrinos)
- C'est le modèle des Supernovas par effondrement gravitationnel (Core Collapse SN) 10^{53} erg, lumière visible 10^{51} erg (10^8 luminosité du Soleil)
- Comment valider ce modèle ?

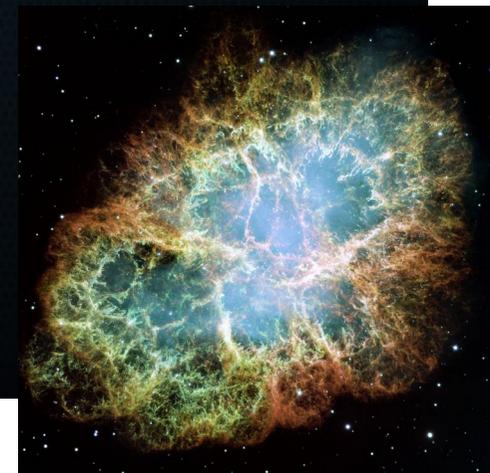
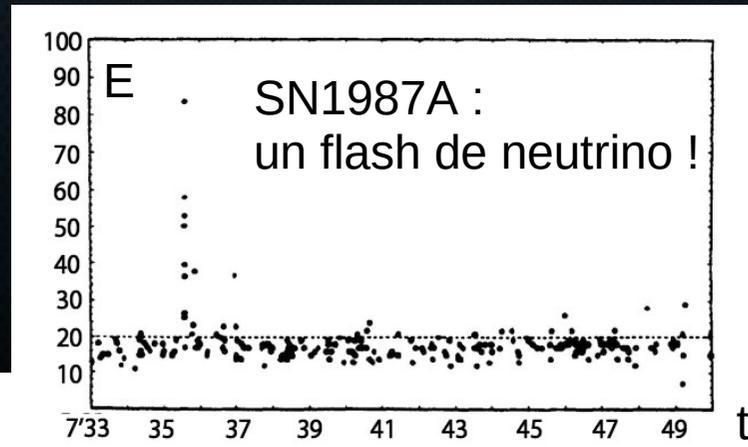


Supernovas : des étoiles qui explosent

- Au cœur de l'implosion se forme un plasma de nucléons, électrons, positrons, gamma et neutrinos
- Les neutrinos sont les seuls à pouvoir sortir instantanément (l'onde de choc met quelques jours avant de sortir de l'étoile)
- La SN 1987A a été vue par trois détecteurs souterrains de neutrinos
- La prochaine SN dans notre galaxie sera étudiée en détail par des grands détecteurs souterrains en construction : DUNE et Hyper-Kamiokande

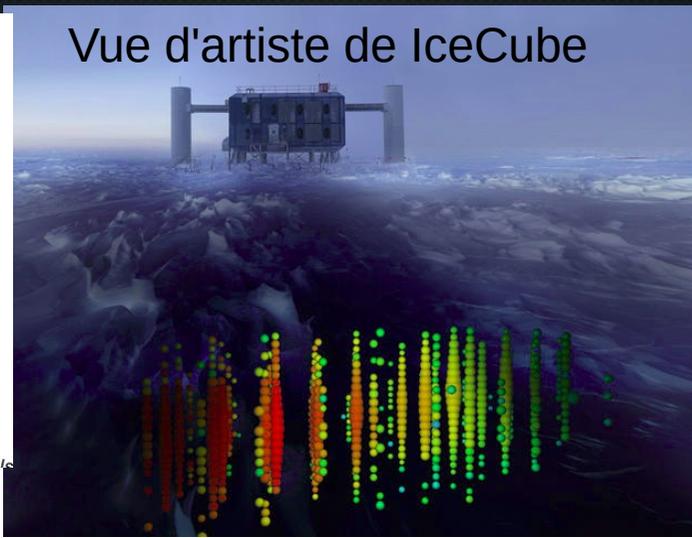
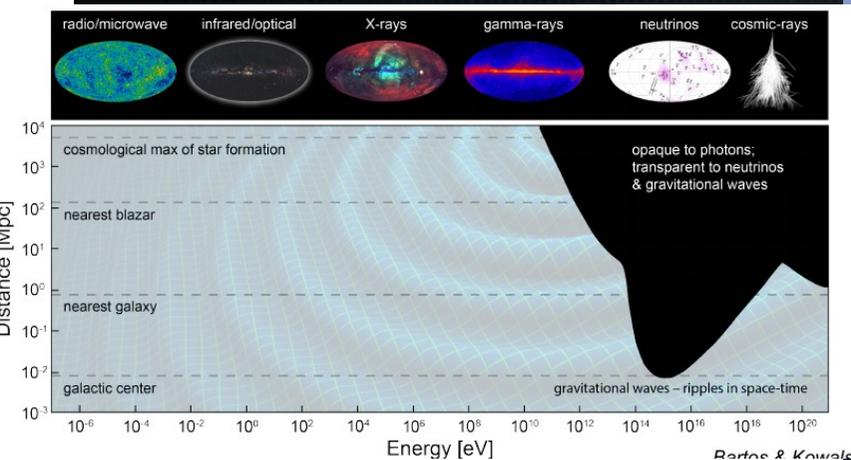


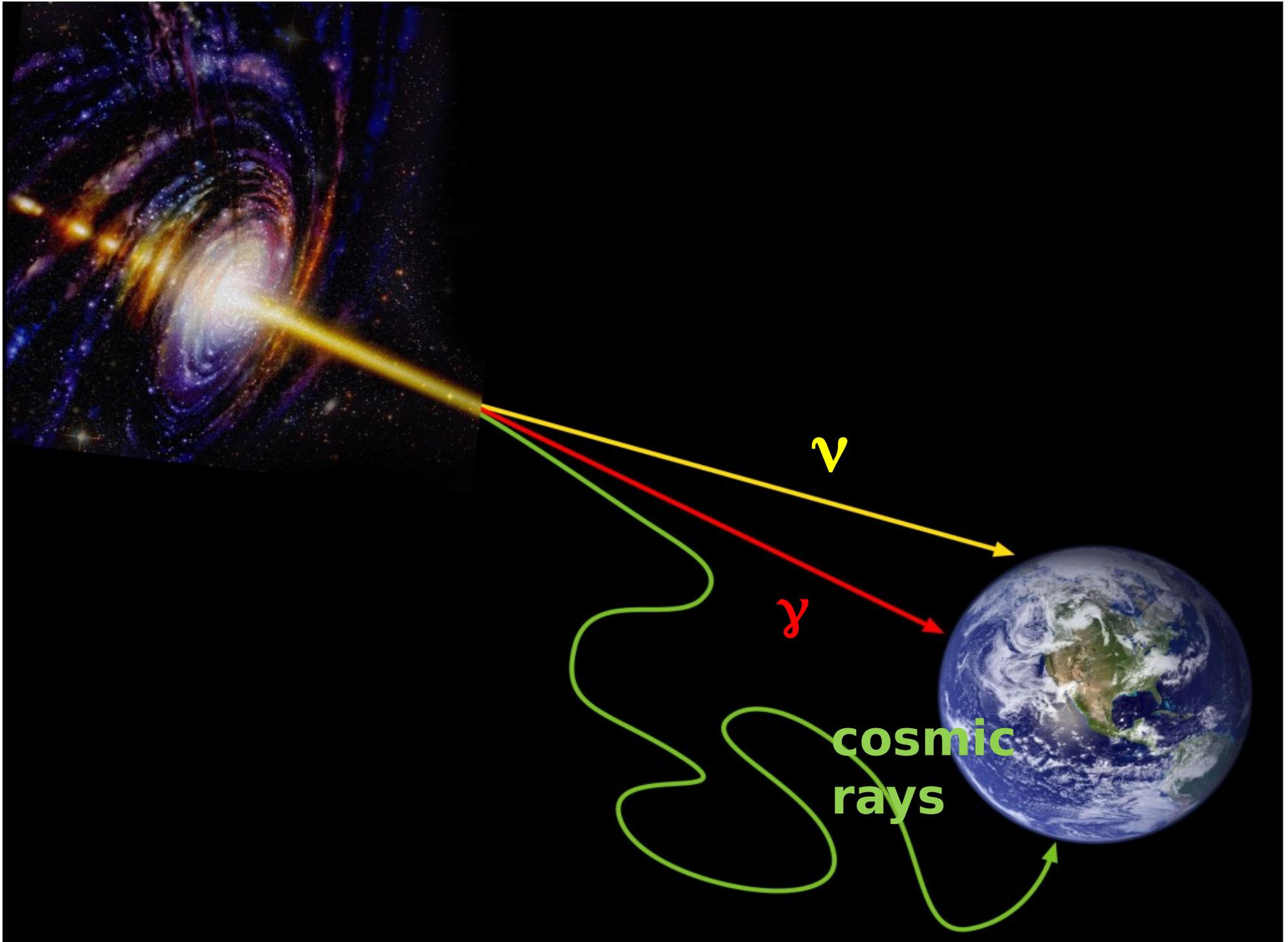
© Anglo-Australian Observatory



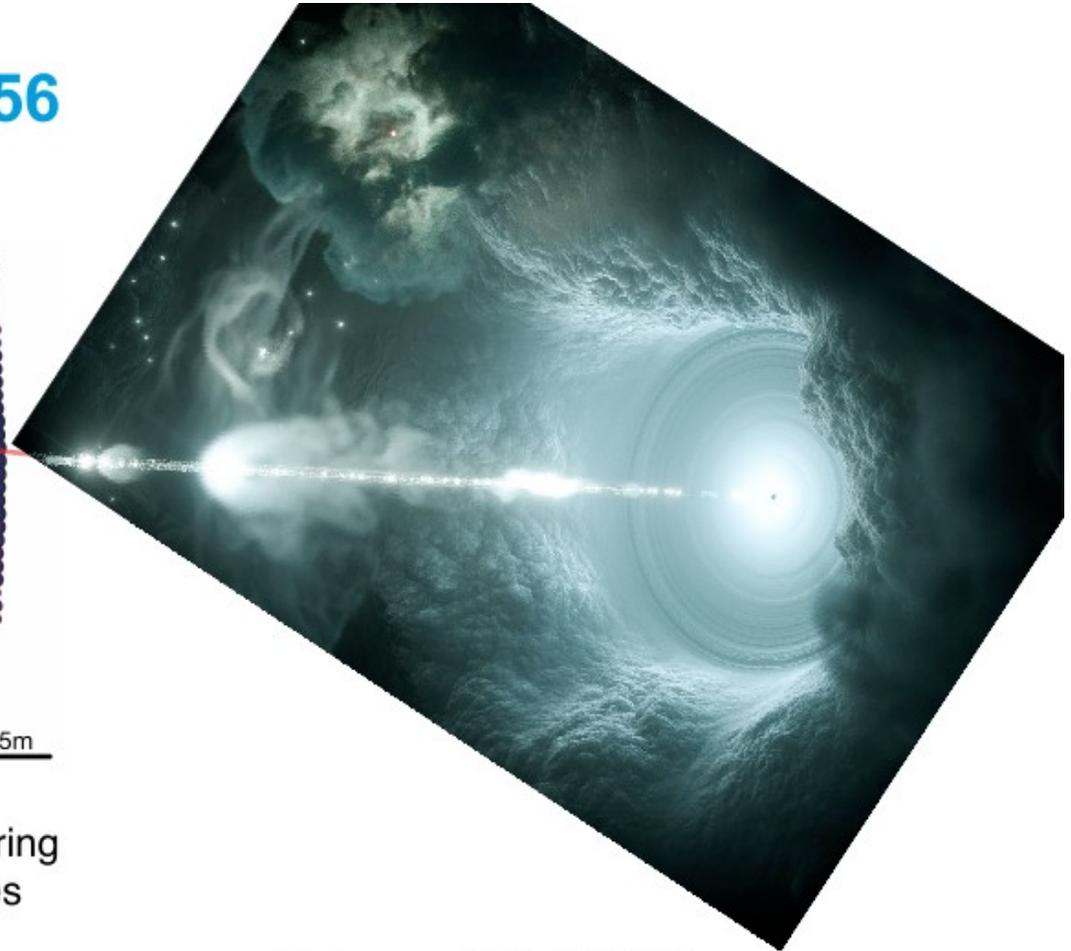
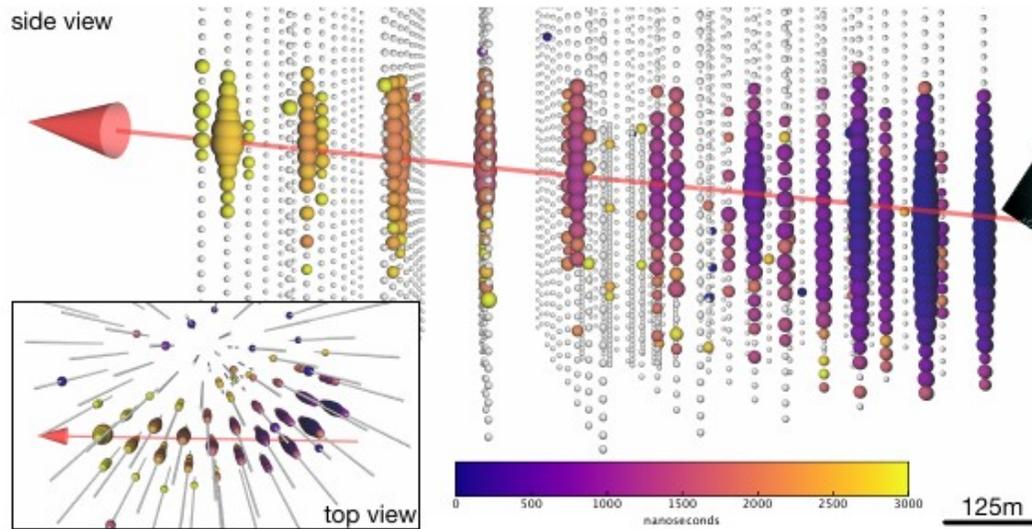
Les neutrinos messagers du Cosmos

- L'exploration de l'Univers s'ouvre aujourd'hui à d'autres messagers que les ondes électromagnétiques : les ondes gravitationnelles et les neutrinos (astronomie multi-messager)
- Des neutrinos de très haute énergie peuvent nous renseigner sur ce qui produit les rayons cosmiques et sur d'autres énigmes de l'Univers (comme les noyaux actifs de galaxie)
- Le projet IceCube (au Pôle Sud) et Antares (Toulon) sont à la recherche de neutrinos de très grande énergie en provenance de l'Univers lointain





Highlight 2: Blazar TXS 0506+056

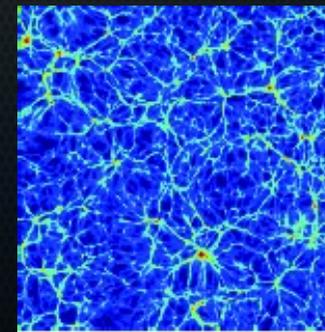
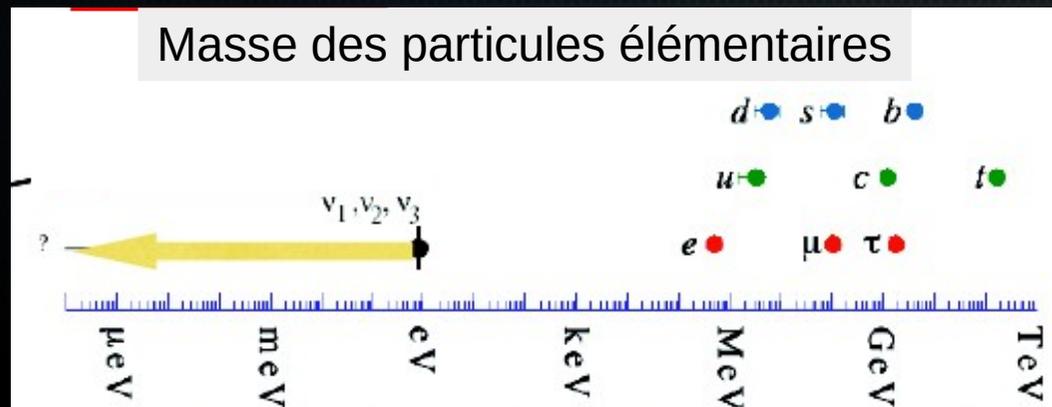


- High-energy cosmic neutrino in coincidence with a flaring Blazar emitting gamma rays beyond 100 GeV energies
- Compelling evidence for neutrino emission from the Blazar \Rightarrow identification of a cosmic hadron accelerator with $>$ PeV energies!

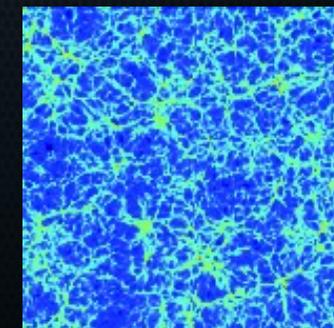
Science, 361 (2018)
~1000 astronomers /18 observatories

Les neutrinos : petites masses, grandes conséquences

- Les oscillations des neutrinos démontrent que ceux-ci ont une masse. Mais celle-ci est minuscule par rapport aux autres particules élémentaires. Un message caché ?
- L'explication de cette masse pourrait être liée à des phénomènes au-delà du Modèle Standard de la physique des particules
- De plus, les neutrinos, particules très abondantes dans l'Univers ont certainement joué un rôle dans l'évolution des structures, et peut-être aussi dans l'asymétrie entre matière et anti-matière dans l'Univers.



Masse = 0



$\Sigma \text{Masse} = 1.9 \text{eV}/c^2$