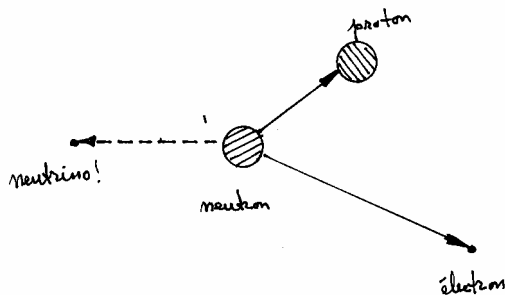


Le charme discret des neutrinos

Hubert Reeves

1932 Découverte du neutron .

- Durée de vie : vingt minutes
- Se désintègre en un proton (+)
- Et un électron (-)
- Mais .. Problème !



Wolfgang Pauli

Invente une nouvelle particule
Pas de charge électrique
Très faible masse (un millionième de celle de l'électron)
Discrète .
Presqu'à la vitesse de la lumière.
Le « neutrino »

Le neutrino est détecté en 1956 (réacteurs nucléaires)

• Astronomie des neutrinos

La particule la plus abondante du cosmos .
Dans chaque mètre cube d'espace
Neutrino: 450 millions
Photons : 400 millions
Electrons , protons : 1

Discrétion des neutrinos.

- Désavantage: difficiles à détecter

Atténuer un flux de photons : une feuille de papier

Atténuer un flux de neutrinos : écran de plomb de plusieurs années-lumière .

- Avantage : nous parviennent de lieux opaques

Discrétion des neutrinos.

Soleil : la lumière (photons) nous vient de la surface.

Les neutrinos nous arrivent du centre

Télescope à neutrinos

- Des centaines de milliers de litres de liquide détecteur pour en détecter cinq par jour

Origine de l'énergie solaire

Transformation de l'hydrogène en hélium
Hans Bethe 1938

Quinze millions de degrés.

Emission de neutrinos

Les neutrinos solaires

- Détectés en 1962 dans une mine du Dakota
 - Ron Davis
- Confirment l'origine nucléaire de l'énergie solaire .

Luminosité neutrinique du Soleil

- Neutrinos : 5 %
 - Photons : 95 %
-
- Soixante milliards de neutrinos nous traversent par seconde . .

Le Soleil neutrinique ne se couche pas

- Visible la nuit
- Pas d'éclipse .



Matière et antimatière

Pour chaque particule il existe une antiparticule .

Électron ----- antiélectron

Proton---- antiproton

Neutrino--Antineutrino .

Etc

Le Soleil émet des neutrinos et pas des antineutrinos

- Il est composé de matière et non pas d'antimatière.



Observatoire solaire (depuis quarante ans)

Traverse le Soleil en trois secondes (les photons en un millions d'années)
Moniteurs de ce qui se passe à l'intérieur du Soleil .

Le flux est constant

- Pas de variations au long du cycle de onze ans.

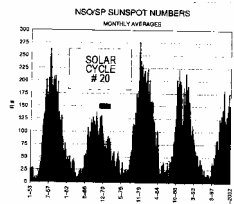


Figure 7. Sunspot Numbers for Solar Cycle #20 from NSO/SP SDO. The color red on the www.nso.nsl.gov website has been replaced with black.

Les neutrinos solaires

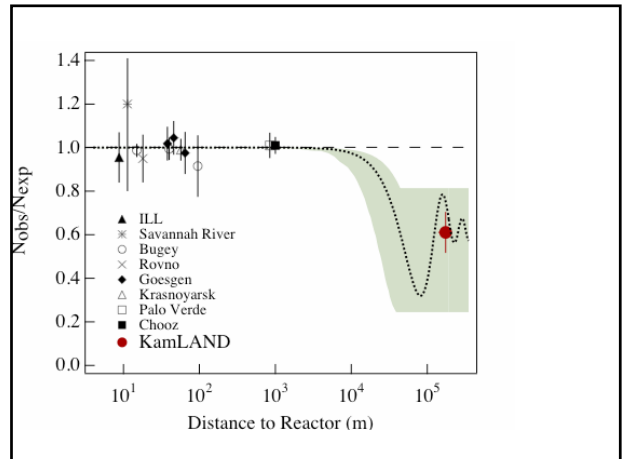
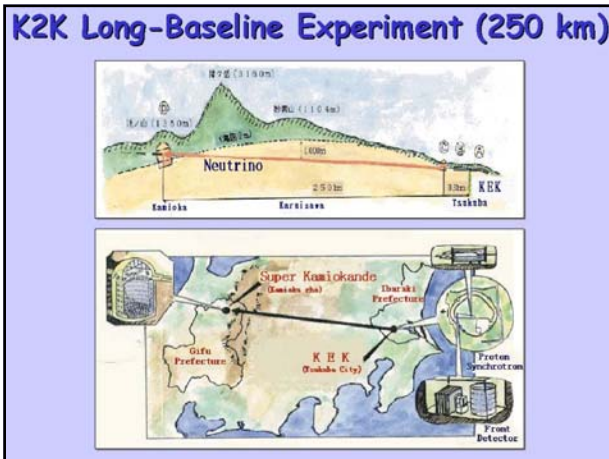
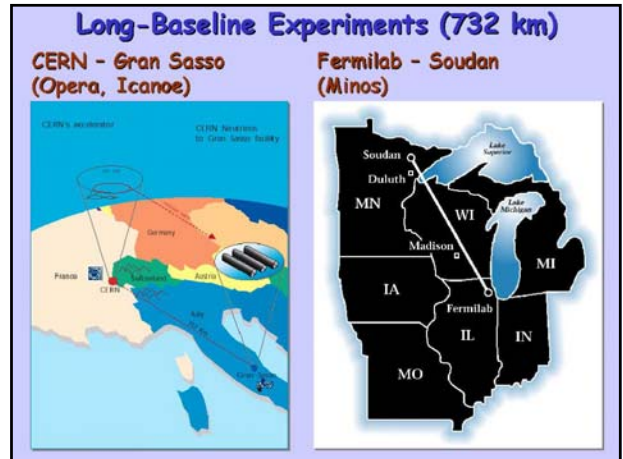
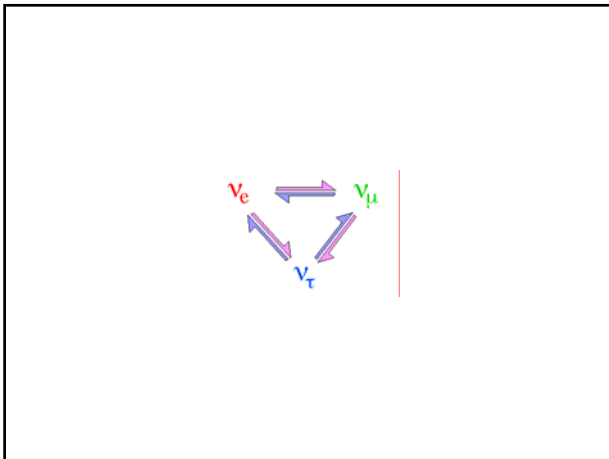
- Détectés en 1962
- Confirment l'origine nucléaire de l'énergie solaire .
Problème : il y en a trois fois moins que prévu . Pourquoi?

Trois variétés

- 1) neutrino électronique
- 2) neutrino muonique
- 3) neutrino tauique

Oscillation des neutrinos

Peuvent se transformer les uns dans les autres
Comme les pokemons!



Sudbury

- Solution du problème solaire .
- Nouvelle physique

Le rapport émission neutrinique sur émission photonique augmente avec la température centrale

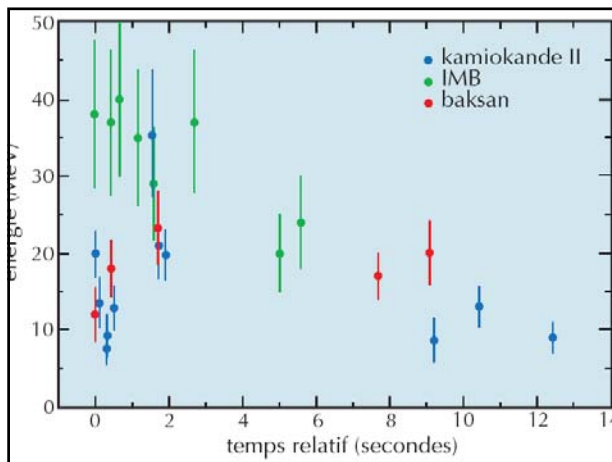
- Soleil : 5 %
- Géantes rouges : les neutrinos dominant
- Supernova : 99.99 %

Le 23 février 1987 vers 10h00
une supernova éclate dans le
grand Nuage de Magellan

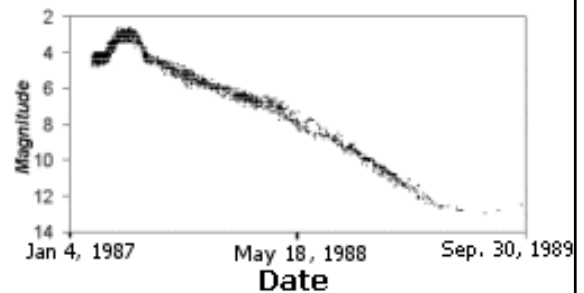
Distance cent soixante neuf mille
années-lumière.

Brille comme trente millions de
Soleil pendant quelques heures.

Quelques neutrinos sont reçus
à la Terre trois heures avant
les photons



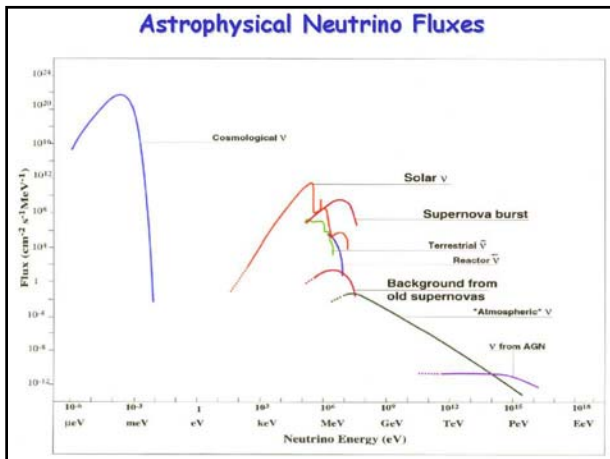
Courbe de lumière de 1987a



Luminosité neutrinique des supernovae

- Pendant les premières minutes la luminosité neutrinique de la supernova est dix mille fois plus élevée que sa luminosité photonique .
- Elle comparable à celle
- de cent millions de galaxies
- Ou celle de dix milliards de milliards de Soleil!

Distribution d'énergie des
neutrinos cosmiques



- ### Propriétés
- Au début de l'univers : autant de matière que d'antimatière
 - Matière + antimatière => lumière
 - Univers de pure lumière!

Où est passée l'antimatière?
 matière et antimatière n'ont pas
 exactement le même
 comportement !
 Violation de CP

- ### Enigme
- Si les populations avaient été strictement égales, l'univers serait de pure lumière .
 - Origine de ce faible supplément ?
 - La réponse pourrait venir des propriétés des neutrinos

- ### Energétique des supernovae
- Energie libérée: 3×10^{53} ergs
 - $\approx 0.17 M(\text{solaire})c^2$
 - Neutrinos $\approx 99\%$
 - Energie cinétique = 1 %
 - Photons = 0.01 % (comparable à la luminosité de la galaxie-hôte!)

- ### Géoneutrinos
- La Terre est une source d'antineutrinos
 - Provenant de la désintégration
 - De l'uranium (235 et 238)
 - Et du calcium (40)
 laboratoire Kamland au Japon
 -
 -

Tomographie de la Terre

- La détection du K-40
- Spectre en énergie des neutrinos .
- Permettrait de localiser les sources du magnétisme.

2

CHAPTER 1 INTRODUCTION

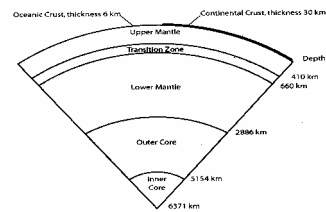


Figure 1.1: Radial distribution of the major Earth regions as determined by seismic data. Modified from Schubert [3].

Region	Depth Range (km)	Mass (10 ²⁴ kg)	Mass Fraction (%)	Average Density (kg m ⁻³)
Oceanic crust	0-5	6	0.1	3,100
Continental crust	0-30	19	0.3	2,700
Upper mantle	(6,30)-410	615	10.3	3,350
Transition zone	410-660	415	7.0	3,560
Lower mantle	660-2,896	2,865	49.0	4,870
Outer core	2,896-5,154	1,807	31.1	11,000
Inner core	5,149-6,371	98	1.6	12,910
Whole Earth	0-6,371	5,975	100	5,515

Emission thermique de la Terre

- Calculée à partir de la température superficielle = 30 à 40 TeV
- Emission radioactive (composition de chondrite) = 18 TeV
- Reste : impact météoritique , décantation gravitationnelle .

Antarès 2009

- Au large de Toulon
- Moniteurs des Supernova
- A l'abri de la Terre
- Séquence de neutrinos et d'antineutrinos ...

Influence de la densité d'électrons (effet MSW)

Négligeable à basse énergie ($E(\nu) < 5\text{MeV}$)

(oscillation dans l'espace vide)

Important à $E(\nu) > 5\text{MeV}$

(oscillation dans l'espace vide + densité des électrons solaires)

Masse des neutrinos

- On les a cru longtemps de masse nulle (comme les photons)
- En fait ils ont une masse très faible (moins d'un électron-volt) .
- Un millionième de la masse des électrons
- Moins d'un milliardième de celle des protons

Masse des neutrinos

- Atmosphérique $m(\nu_e) m(\nu_\mu) > 0,04$ eV
- Structure cosmique : $m < 0.9$ eV
- $-m(\nu_e) < 2.8$ eV (Tritium)

Echapper à l'hécatombe cosmique!

- Big Bang : réaction en équilibre :
- autant de particules que d'antiparticules .
- Refroidissement = annihilation de la matière (p , n , e , nu)
- Résultat : univers de pure lumière!!!
- Mais

- Résultat : léger excès de matière (1/1000,000,000!)
- Annihilations et ...reliquat de matière: nous!
- Trop élevé pour provenir du secteur des quarks
Suffisant dans celui des neutrinos?

Borexino 2008

- Détection des neutrinos solaires
- Du Be-7 (0.862 MeV)
- fraction survivante= $f(\text{Be-7}) = 56\%$
Du B-8 (jusqu'à 14 MeV)
- $f(\text{B-8}) = 35\%$

Neutrinos et cosmologie.

- Masse des neutrinos :
- $\text{Nu}(e^-) < 2.8$ eV (Tritium)
- Structures cosmiques < 0.9 eV (moyenne)

- $0.6 \times 10^{-3} < \Omega(\nu) < 0.02$

- Il faudrait un nu avec $m(\nu) > 10$ eV pour constituer la matière sombre

Borexino

- Détection des neutrinos du Be-7 et B-8
- Pour B-8 (énergie moyenne= 8.6 MeV)
P= probabilité de survie = 0.35 ± 0.10
- Pour Be-7 (0.862 MeV)
- $P = 0.56 \pm 0.10$
- Effet MSW plus important à +haute énergie .

Les neutrinos solaires

Problème : il y en a trois fois moins de neutrinos que prévu .

Pourquoi?

La réponse est venue trente ans plus tard
Kamiokande et Sudbury.

Rayonnement fossile des neutrinos

- La théorie du Big Bang prévoit l'émission d'un rayonnement de neutrinos de très faible énergie vers la première seconde .
- Impossible à détecter aujourd'hui .
- A confirmer

Matière et antimatière dans l'univers

- Au début de l'univers les populations de particules et d'antiparticules étaient « presque » égales
- Un surplus de une unité dans un milliard pour les particules!
- Plus tard particules et antiparticules se sont annihilées, se transformant en lumière.
- Aujourd'hui l'antimatière a disparu.
- Il reste de la matière et de la lumière.
-

La vie des étoiles: Transformation de masse en énergie . $E = \Delta mc^2$

Vecteurs: gravité et nucléaire.
Emission : photons et neutrinos .

Luminosité neutrinique des supernovae

- $L(\text{neutrinos}) = 3 \times 10^{53} \text{ erg/3sec}$
- $= 3 \times 10^{19} L(\text{photonique solaire})$
- $= 3 \times 10^8 \text{ galaxies!}$