

# Le **neutrino**, une particule omniprésente et fantomatique qui défie encore les physiciens



*Joseph Remillieux*

*Institut de Physique des Deux Infinis de Lyon*

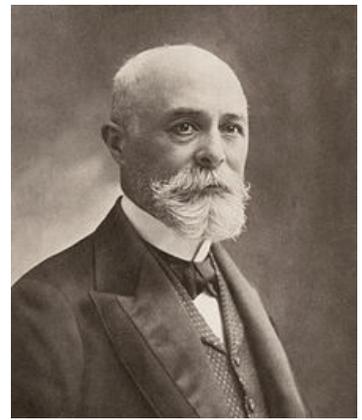


- **Dans les année 30**, nait dans la tête de Pauli une nouvelle particule: le **neutrino**
  - **Dans les années 50**, ces particules fantômes sont enfin **détectées**
  
  - Au fil des années, ces neutrinos se révèlent être des
    - **violeurs** ... de symétries
    - **échangistes** ... oscillant entre personnalités distinctes
    - **squatteurs** ... du monde de la **matière** et de l'**antimatière** ?
- > *Plus d'un siècle de recherches, et déjà **huit prix Nobel***

**À tous les stades de vie du Cosmos,  
les neutrinos ont été les témoins de son histoire  
... du Big Bang à nos jours**

**Le concept de neutrino:  
une naissance radioactive  
... et non-désirée**

- **1896** Henri Becquerel découvre par hasard la **radioactivité**:  
émission spontanée d'un *rayonnement uranique* pénétrant



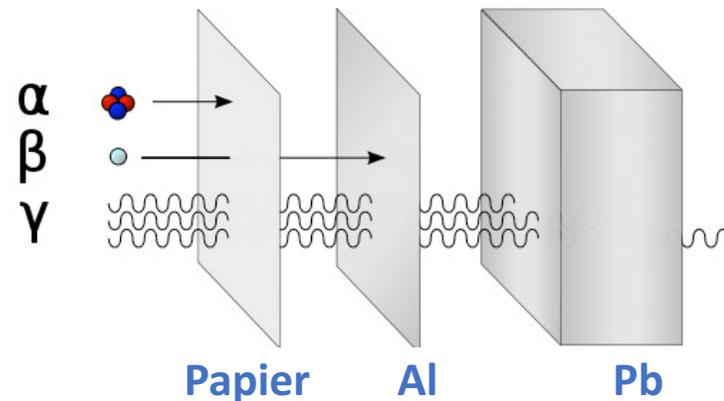
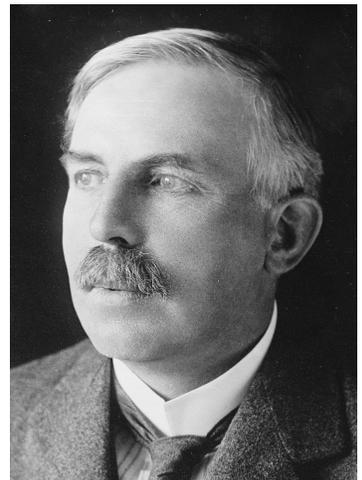
- **1899** Ernest Rutherford découvre les rayonnements

$\alpha$ , peu pénétrant

$\beta$ , plus pénétrant

- **1900** Paul Villard découvre le rayonnement

$\gamma$ , très pénétrant



- **1902** Pierre et Marie Curie observent que les rayons  $\beta$  sont de charges négatives  
Puis W. Kaufmann et E. Rutherford montrent que ce sont des électrons



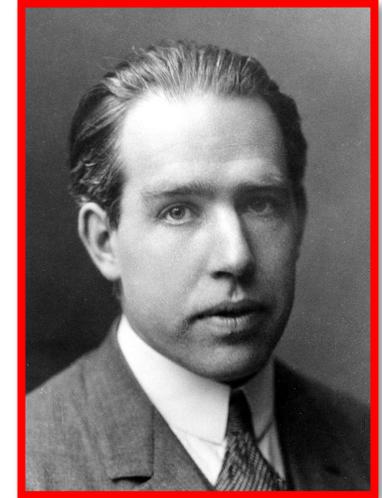
- **1911** Lise Meitner prétend que ces électrons sont **mono énergétiques**  
*par analogie avec ce que l'on savait, depuis 1903, sur la radioactivité  $\alpha$*



- **1914** James Chadwick, lui, observe un spectre **continu**  
et écrit à Rutherford  
*« il doit y avoir une stupide erreur quelque part ! »*



- **Guerre de 14-18** la continuité confirmée du spectre des électrons intrigue et génère des interprétations farfelues :  
*Niels Bohr* propose par exemple d'abandonner le principe de la conservation de l'énergie !
- **1927 Ch. Ellis et W. Wooster** mesurent avec précision le spectre en énergie des électrons émis par désintégration  $\beta$  du  $^{210}\text{Bi}_{83}$
- **1930** ce résultat pousse **Wolfgang Pauli** à proposer une *hypothèse désespérée*: l'existence d'une **nouvelle particule**: le **neutron**  
*(Aujourd'hui appelé neutrino, car c'était avant la découverte du « vrai neutron » par Chadwick, en 1932)*



Lettre de Pauli  
adressée à ses  
collègues réunis  
à Tübingen



*Zurich, le 4 décembre 1930*

*Chers dames et messieurs radioactifs,*

*Je vous prie d'écouter avec beaucoup de bienveillance le messenger de cette lettre. Il vous dira que pour pallier la « mauvaise » statistique des noyaux N et Li-6 et le spectre bêta continu, j'ai découvert un remède inespéré pour sauver les lois de conservation de l'énergie et les statistiques. Il s'agit de la possibilité d'existence dans les noyaux de particules neutres de spin, obéissant au principe d'exclusion, mais différentes des photons par ce qu'elles ne se meuvent pas à la vitesse de la lumière, et que j'appelle neutrons\*. La masse des neutrons devrait être du même ordre de grandeur que celle des électrons et ne doit en aucun cas excéder 0,01 de la masse du proton. Le spectre bêta serait alors compréhensible si l'on suppose que pendant la désintégration bêta, avec chaque électron est émis un neutron, de manière que la somme des énergies du neutron et de l'électron est constante.....*

**Pauli attend trois ans avant  
de publier son intuition dans les  
actes du Congrès Solvay (1933)**

*J'admets que mon remède puisse paraître invraisemblable, car on aurait dû voir ces neutrons bien plus tôt si réellement ils existaient. Mais seul celui qui ose gagner, et la gravité de la situation, due à la nature continue du spectre, est éclairée par une remarque de mon honoré prédécesseur, Monsieur Debye, qui me disait récemment à Bruxelles : « Oh ! Il vaut mieux ne pas y penser du tout, comme pour les nouveaux impôts ». Dorénavant on doit discuter sérieusement toute voie d'issue. Ainsi, cher peuple radioactif, examinez et jugez. Malheureusement je ne pourrai être moi-même à Tübingen, ma présence étant indispensable ici pour un bal qui aura lieu pendant la nuit du 6 au 7 décembre.*

*Votre serviteur le plus dévoué,*

*W. Pauli.*

# Estimation de la masse des *neutrinos* à partir de la mesure de l'énergie maximale des électrons

- L'énergie nucléaire disponible (ici 1,16 MeV) se partage entre:  $E_{\text{électron}} + E_{\text{neutrino}} + (M_{\text{neutrino}} \cdot c^2)$

-> au « bout du spectre »  $E_{\text{électron}} = E_{\text{max}}$  ->  $E_{\text{neutrino}} = 0$   
si on observe un énergie manquante

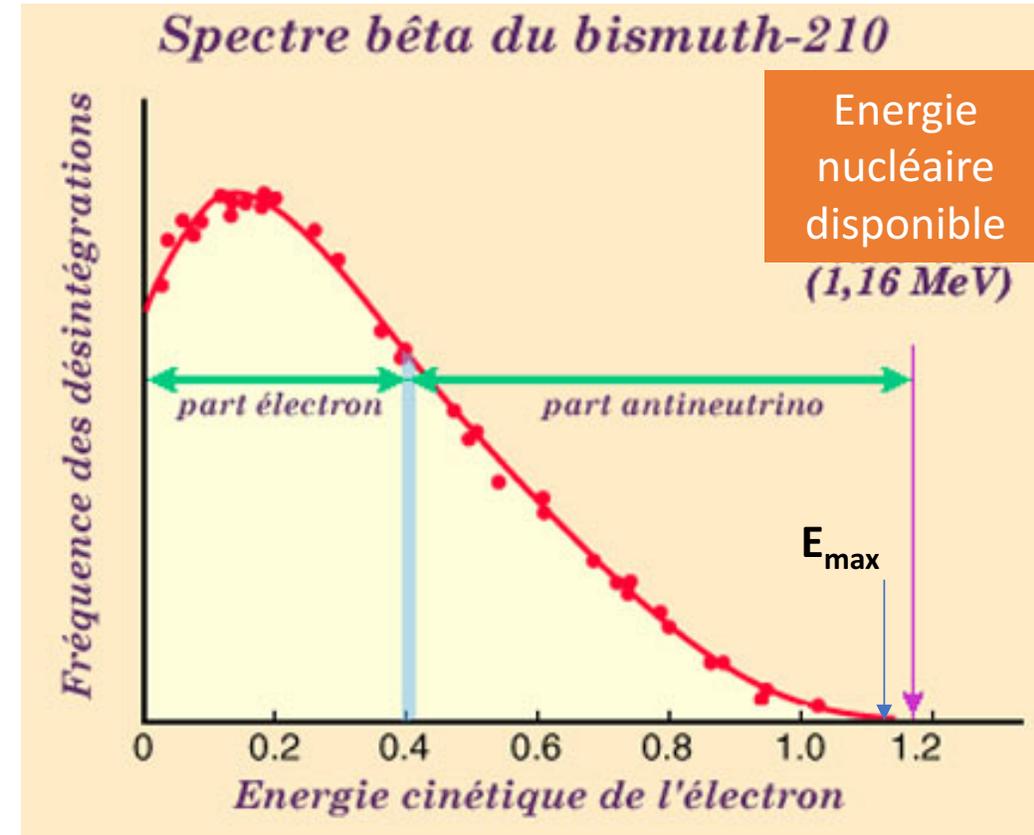
$$\Delta E = E_{\text{disponible}} - E_{\text{max}}$$

la masse du neutrino est alors  $M_{\text{neutrino}} = \Delta E / c^2$

- **1933** Francis Perrin publia que

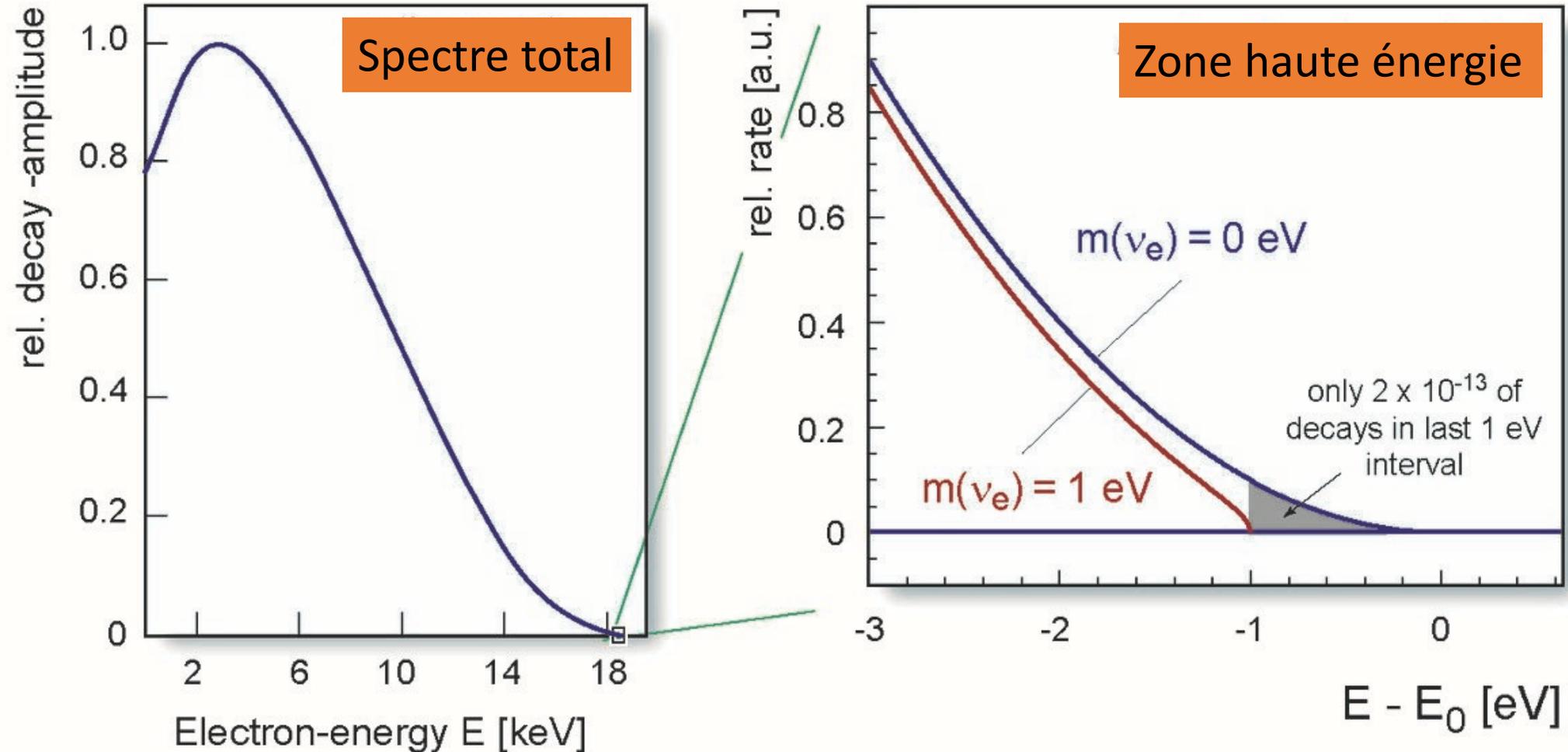
$$M_{\text{neutrino}} \ll M_{\text{électron}}$$

- **Aujourd'hui**, ... 80 ans plus tard, cette méthode est reprise avec grande précision par l'expérience **KATRIN**



$^{210}\text{Bi}_{83} \rightarrow ^{210}\text{Po}_{84} + \text{électron} + \text{anti}neutrino$   
avec une partition aléatoire de l'énergie entre électrons et (anti)neutrinos

Expérience **KATRIN** (*K*arlsruhe *T*ritium *N*eutrino): mesure de la masse de  $\bar{\nu}_e$  par filtrage de la queue du spectre de désintégration  $\beta^-$  du Tritium ( $^3\text{H}$ )



# Le spectromètre à électrons *KATRIN*

- Un **spectromètre magnétique** de 200 tonnes et 70 m de long qui **élimine** tous les électrons de basse énergie (**hors de la queue**)
- Construit en Bavière (à 400 km) il fit un **détour de 9 000 km** pour atteindre Karlsruhe (via le Danube, la Mer Noire, Gibraltar, la Manche et le Rhin)
- **2012**: un premier résultat :  
->  **$m_{\nu e} < 1,1 \text{ eV}$**



## • Retour en 1933 Enrico Fermi

- débaptise le *neutron* de Pauli, ce sera le *petit neutre* = **neutrino**

- propose la première **théorie quantique** de la désintégration  $\beta$ :

**neutron n** (du noyau)  $\rightarrow$  **proton p** + une paire ( $e^-$  + **antineutrino  $\bar{\nu}$** )

- La statistique quantique appliquée à ces quatre fermions

  - $\rightarrow$  la **forme du spectre** des électrons

- **Hans Bethe et Ronald Pierce**  $\rightarrow$  la **probabilité d'interaction** des neutrinos avec la matière est **infime**

  - $\rightarrow$  pouvoir de pénétration dans les solides de l'ordre de  **$10^{16}$  km**

Mais le « modèle de Fermi » est globalement **rejeté**:

  - $\rightarrow$  *Nature* refuse la publication

  - $\rightarrow$  **Arthur Eddington** publie ses doutes

- **1934**: Irène et Frédéric Joliot Curie observent la radioactivité  $\beta^+$

(**p + e<sup>-</sup>**  $\rightarrow$  **n +  $\nu$** ) qui implique l'existence du **neutrino  $\nu$**

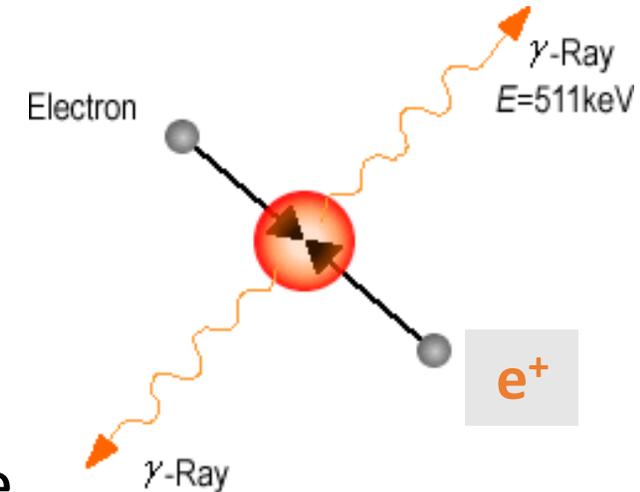


**23 ans plus tard:**

**les fantômes de Pauli et de Fermi  
enfin observés**

# 1956 l'acharnement de Frederick Reines et Clyde Cowan

- Après des décennies d'échecs, Reines et Cowan détectent les  $\bar{\nu}$  par la réaction inverse de Fermi :  $\bar{\nu} + p \rightarrow n + e^+$ 
  - $\bar{\nu}$  incidents: émission  $\beta^-$  des produits de fission du **réacteur nucléaire (Savannah River)**
  - **cible** : les **protons** d'un bidon de 400 litres d'**eau** placé sous le cœur du réacteur
  - **détecteurs de positons** : 110 photomultiplicateurs traquant les **paires de photons de 511 keV**, émises tête-bêche après **annihilation** des positons avec des électrons de la cible
- La détection de **3  $\bar{\nu}$  / heure**, permet à Reines et Cowan
  - d'envoyer le 4 juin 1956 un télégramme de chaleureuse **reconnaissance à Pauli ... 25 ans après sa fameuse lettre**
  - et de recevoir en 1995, le prix Nobel ... **21 ans après la mort de Cowan**



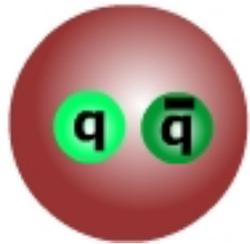
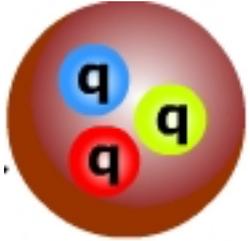
Jusque là,  
les neutrinos étaient toujours en couple  
avec des électrons « légers » ( $e^+$  ou  $e^-$ ):

Y-a-t-il d'autres « saveurs »  
avec les électrons lourds ?

**1936**, **Carl Anderson** découvre les **muons**: « électrons lourds » instables et prédisent l'existence de **neutrinos muoniques**  $\nu_\mu$   $\bar{\nu}_\mu$  associés

**1960**, on les trouve à *Brookhaven* dans les produits de désintégration de faisceaux de pions chargés:

Protons + cible  $\rightarrow$  **pions** ... qui se désintègrent:



$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$\rightarrow$  Faisceaux de neutrinos

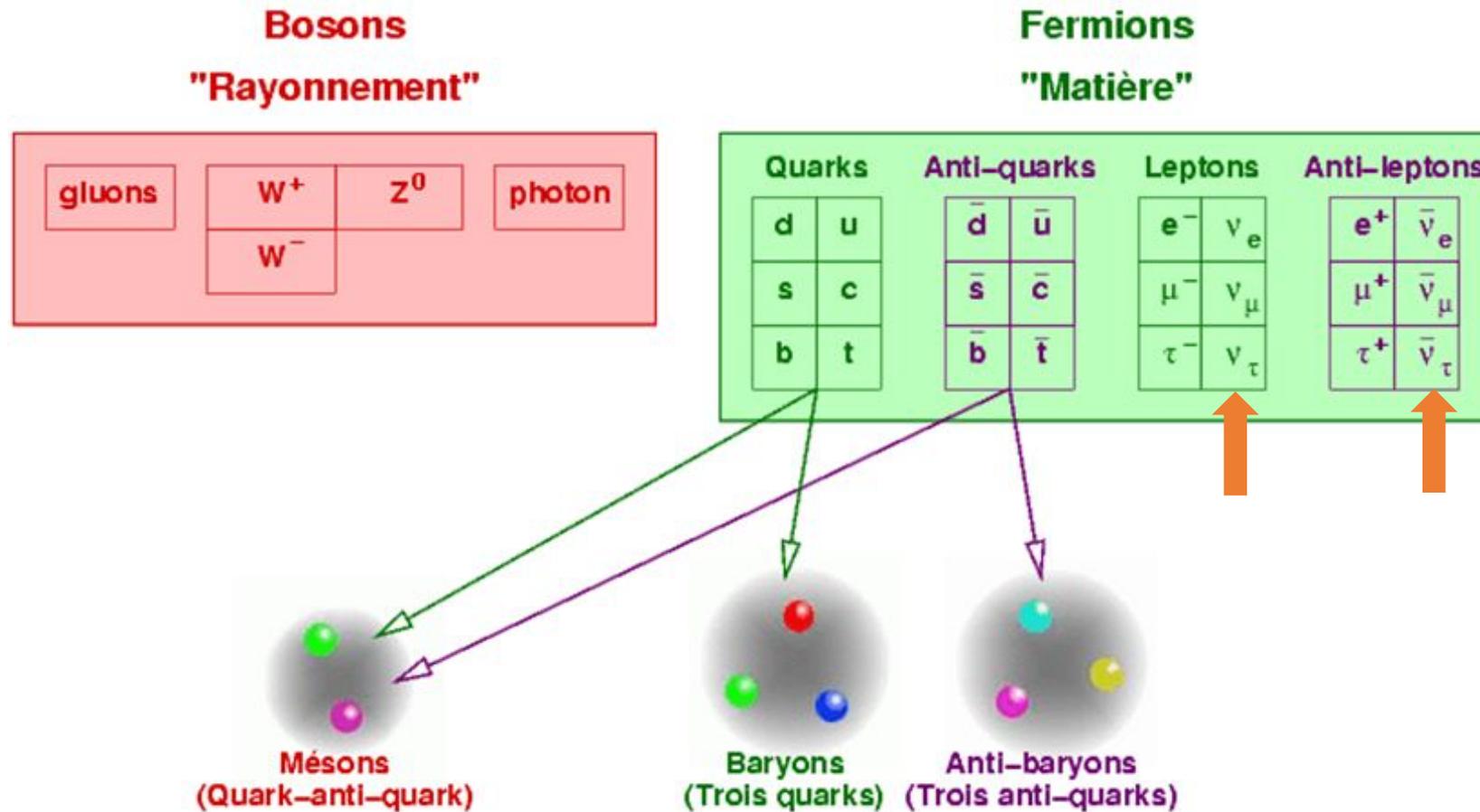
**1975**, **Martin Perl** découvre à *Stanford* les **taus** « électrons superlourds »  $\tau^{+/-}$  très fugaces ( $10^{-13}$ seconde) ils se désintègrent en paires d'électrons plus légers

**2000**, détection à *Fermilab* (Chicago) de ces **neutrinos tauiques** par leurs produits de décroissances:  $\tau^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu + \bar{\nu}_\tau$  et  $\tau^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_\tau$

# Ces neutrinos aux trois saveurs

*électroniques, muoniques et tauiques*

viennent compléter les trois familles de fermions



Ces neutrinos fantômes sont-ils  
de *Dirac* ou de *Majorana* ?



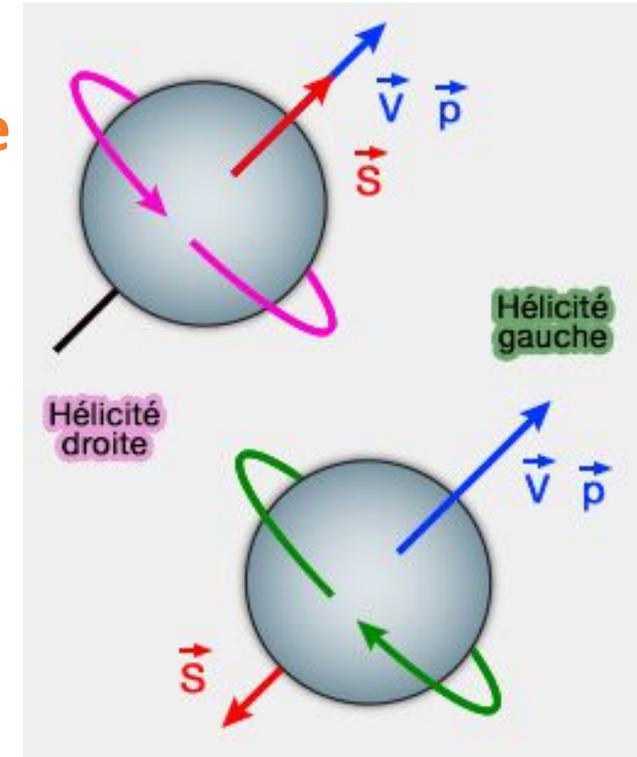
# C'est une affaire d'hélicité

Lois de conservation par inversion des coordonnées d'espace:

-> le **spin S** d'une particule doit se projeter de façon **équiprobable** sur la direction de propagation **V, p**

sur l'avant (**hélicité droite**) et sur l'arrière (**hélicité gauche**)

- **1956**, T. Lee, C. Yang et Mme Wu découvrent que les électrons des désintégrations  $\beta^-$  du cobalt ( $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni} + e^- + \bar{\nu}$ ) **violent la parité** en étant exclusivement d'hélicité **gauche**
- **1957**, Maurice Goldhaber montre que les désintégrations  $\beta^+$  et  $\beta^-$  ne produisent que des **neutrinos** -> d'hélicité **gauche** et des **antineutrinos** -> d'hélicité **droite**



*Plus tard on associera ces viols aux propriétés de l'interaction faible*

# L'interaction faible: un échange de bosons W ou Z

Dans le *Modèle Standard* de **S. Glashow, A. Salam, S. Weinberg**

les neutrinos (de masse nulle) ne sont sensibles qu'à

*l'Interaction Faible*, en fait un **échange de bosons** ( $W^+$ ,  $W^-$  ou  $Z^0$ )

- radioactivité bêta des noyaux  $\beta^-$  :  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$   
 $\beta^+$  :  $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

-> une **redistribution des quarks** dans le noyau  
avec **échange d'un boson  $W^-$**  (ou  $W^+$ )

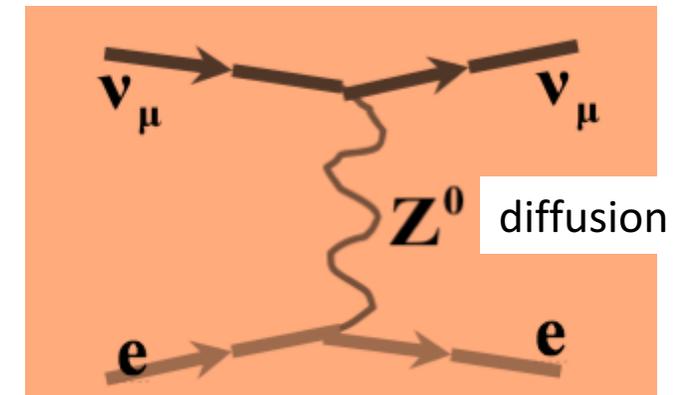
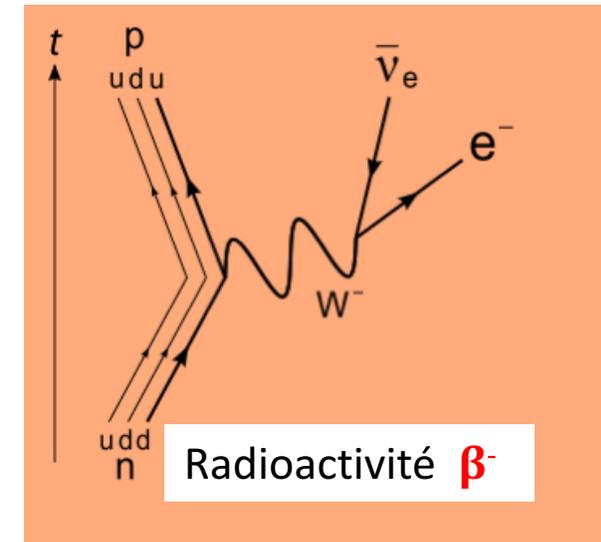
- interaction neutrino – matière:

-> une **diffusion** des neutrinos sur les électrons  
ou les noyaux de la matière, avec **échange d'un boson  $Z^0$**

**CERN 1973**, découverte des ***courants neutres***;

**1983**, détection du **boson  $Z^0$** , dont la durée de vie

prouve qu'il n'y a que **trois saveurs** dans la famille des neutrinos



# Dirac ou Majorana ?

- **Théorie de Dirac** (*Modèle Standard*): tous les fermions et anti-fermions

sont des *deux hélicités* -> 4 états de neutrinos possibles  $\nu_{\text{gauche}}$   $\bar{\nu}_{\text{droit}}$   
 $\bar{\nu}_{\text{gauche}}$   $\nu_{\text{droit}}$

- **Théorie de Majorana**: le neutrino est sa propre antiparticule

-> il n'y a plus que 2 états possibles:  $\nu_{\text{gauche}}$   $\bar{\nu}_{\text{droit}}$

**Observation**: on ne détecte toujours que deux états:  $\nu_{\text{gauche}}$   $\bar{\nu}_{\text{droit}}$

-> est-ce un problème de mesure ... ou une réalité ? Dirac ou Majorana ?

Seule l'observation (très difficile) de la *double désintégration bêta*

de certains noyaux pourrait trancher ...

... et peut-être expliquer la **disparition de l'antimatière** dans l'Univers ?

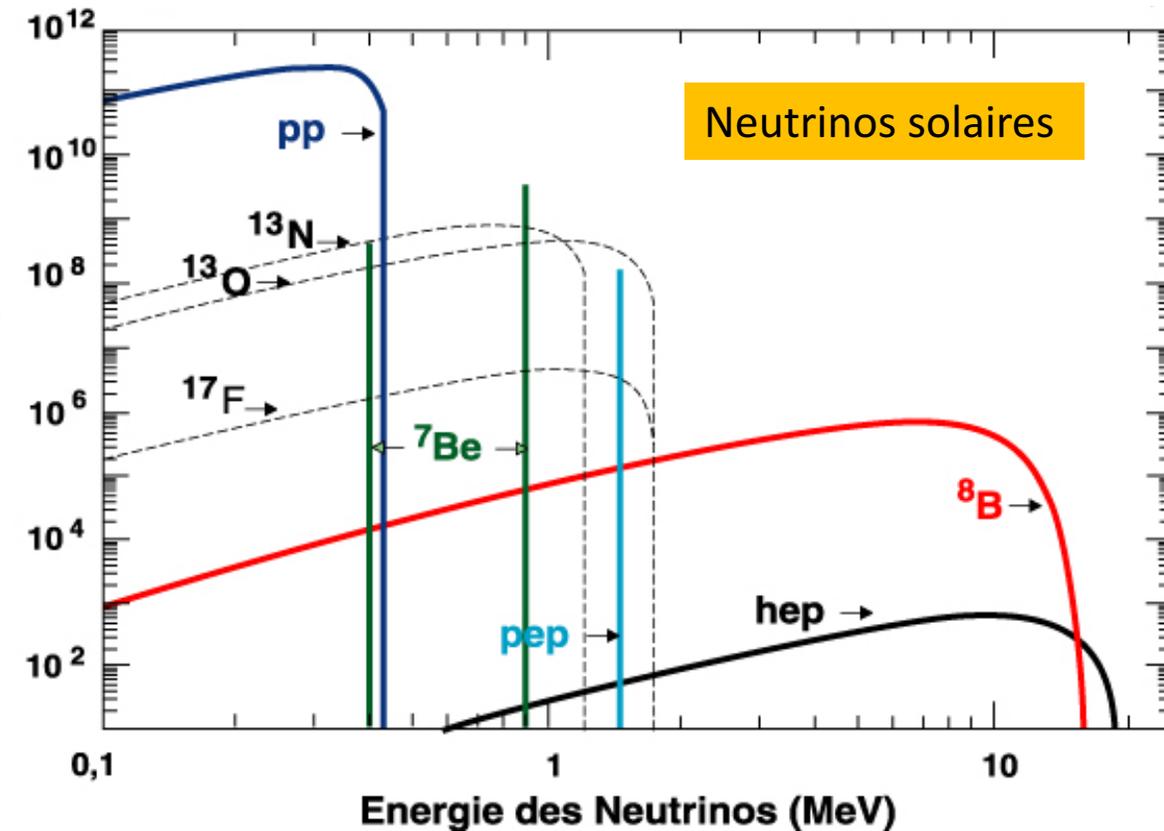
**Les neutrinos sont partout  
mais d'où viennent-ils ?**

- De notre corps: radioactivité  $\beta^-$  des noyaux  $^{40}\text{K}$  de nos os :  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}_e$   
 -> **4 300  $\bar{\nu}_e$  par seconde émis** (pour 70 Kg)
- De la Terre: radioactivité  $\beta$  des radio-isotopes de la croûte et du manteau  
 -> **20 millions de « géo-neutrinos »** nous traversent **par seconde**
- Du Soleil: bombarde la Terre (jour et nuit)  
 -> flux de **60 milliards de neutrinos / sec**
  - neutrinos issus des **fusions nucléaires**

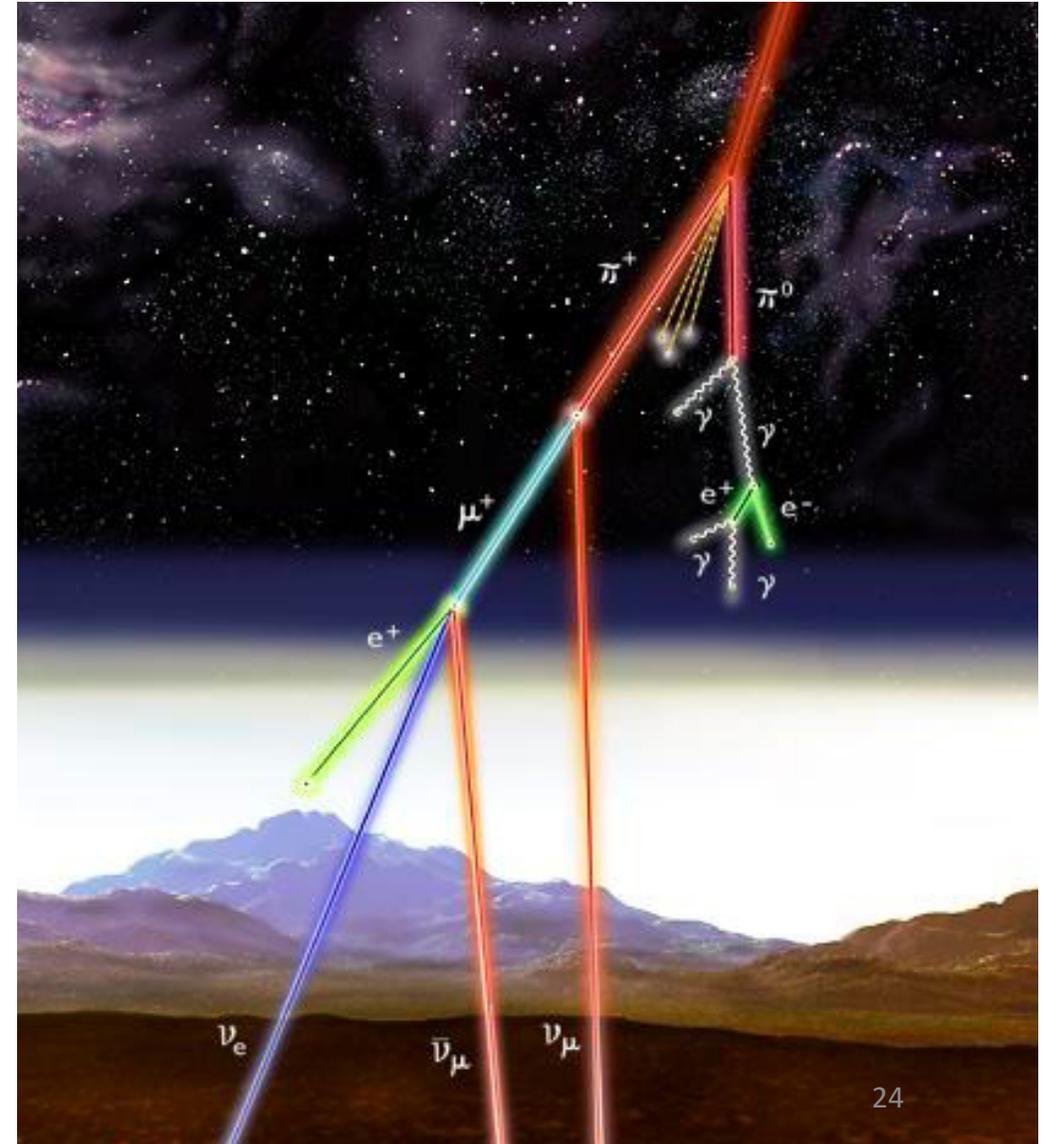
600 millions de tonnes d'hydrogène brûlées/sec

  - la réaction la plus neutrino-gène (notée **pp**) est la « première fusion » de l'hydrogène  

$$p + p + p + p \rightarrow ^4\text{He} + 2 e^+ + 2 \nu_e$$
  - La seconde, est la fusion (rare) de l'hélium  
 ->  **$^7\text{Be}$**  et  **$^8\text{B}$**

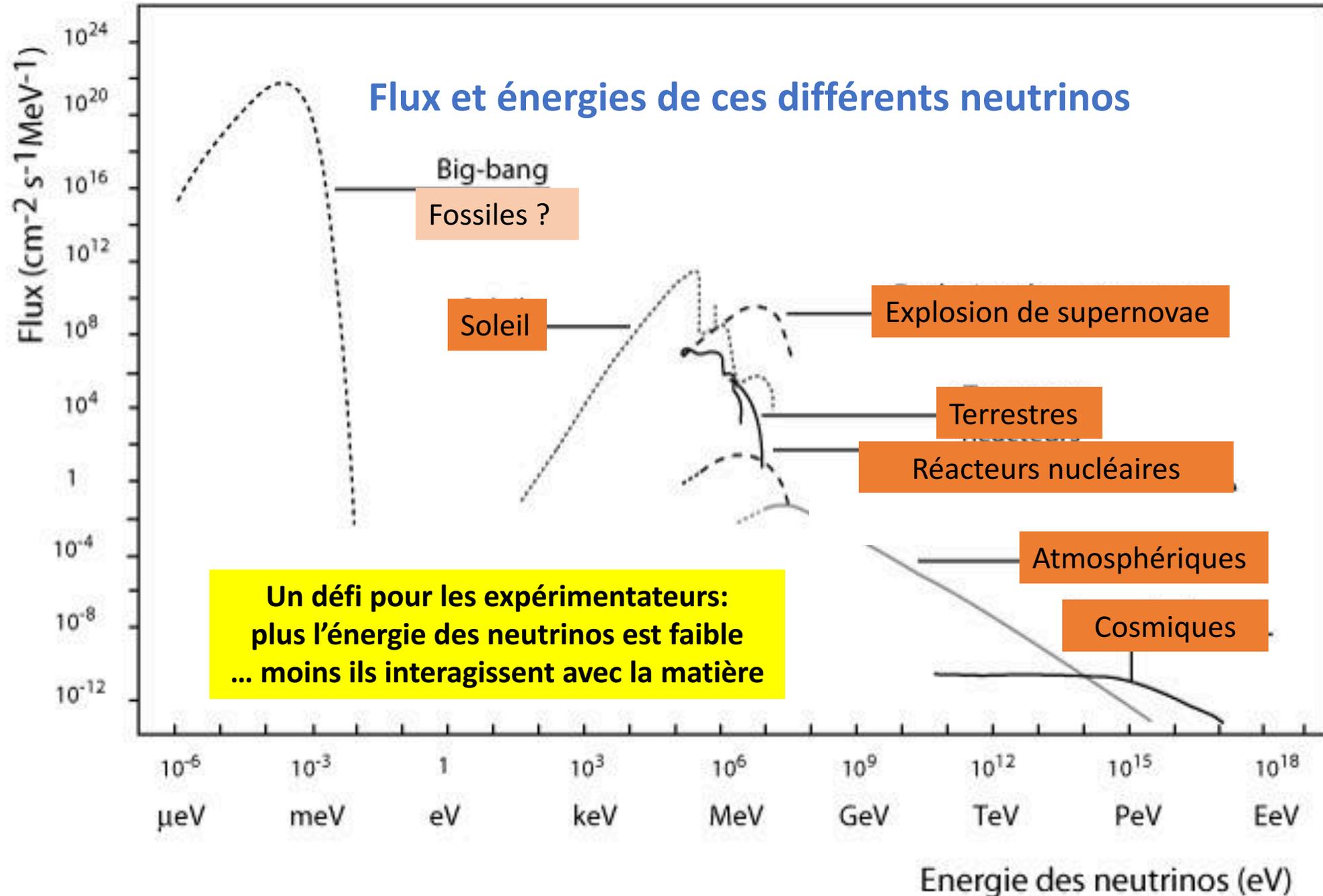


- Des centrales nucléaires : rayonnement  $\beta^-$  des **produits de fission**  
 -> à 1 Km d'un réacteur, le flux de neutrinos rayonné est comparable à celui du Soleil
- Des accélérateurs de particules: à haute énergie des protons peuvent produire des **pions chargés**  
 -> qui décroissent ensuite en neutrinos  $\nu_\mu$  et  $\nu_e$
- De l'atmosphère : ses atomes bombardés par les protons du **rayonnement cosmique**  
 -> des pions chargés qui décroissent en gerbes de « **neutrinos atmosphériques** »  
 -> au niveau du sol: **2  $\nu_\mu$  pour 1  $\nu_e$**



- Des explosions de **supernovae** (fin de vie des étoiles très massives):  
 en leur cœur la pression est si forte que des protons réussissent à capturer des électrons en émettant des neutrinos:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
- Du **Cosmos**: des neutrinos **d'ultra hautes énergies** peuvent être émis au cours de cataclysmes encore très peu connus de l'Univers lointain
- Et enfin du **Big Bang**:
  - **1 seconde après** le Big Bang ( **température de 10 milliards de K°**)  
 -> un flux énorme de **neutrinos fossiles** (de l'ordre du **MeV**) s'est échappé  
 ( *380 000 ans avant l'émission des photons fossiles du **fond diffus cosmologique***)
  - **aujourd'hui**, par **expansion de l'Univers**  
 -> l'énergie des neutrinos fossiles a été dégradée à quelques **meV**  
*des énergies beaucoup trop faibles pour être actuellement détectables !*

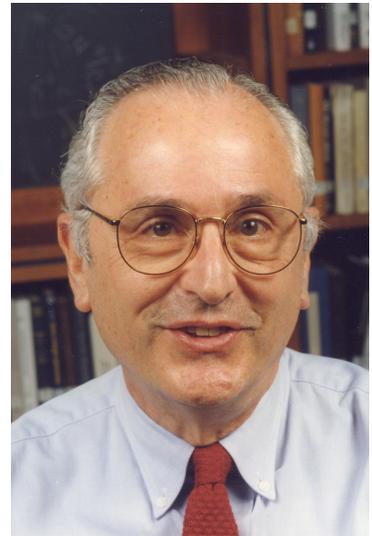
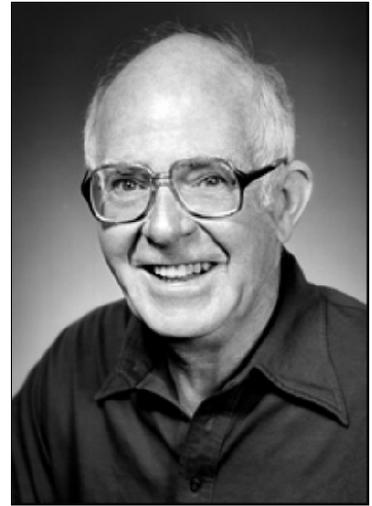
# Flux et énergies de ces différents neutrinos



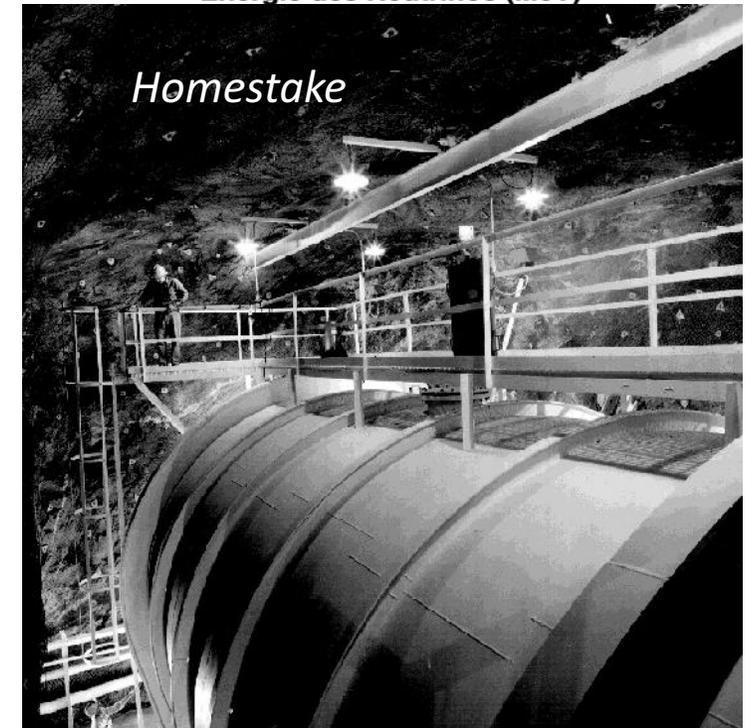
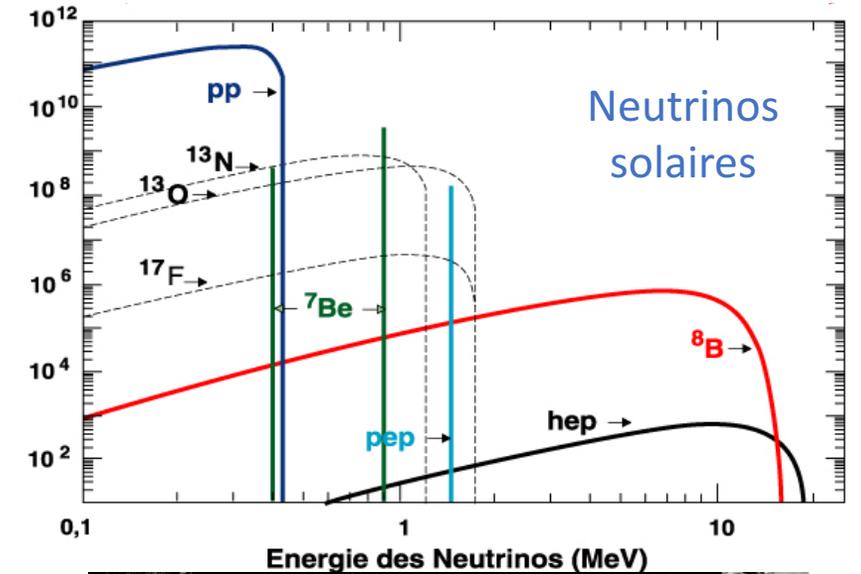
# L'énigme des neutrinos solaires

Ray Davis: recherche les neutrinos solaires  
par une méthode **radiochimique**,  
proposée en 1946 **Bruno Pontecorvo** (élève de Fermi): extraire  
**l'argon radioactif** d'un milieu chloré (  $\nu_e + {}^{37}\text{Cl} \rightarrow e^- + {}^{37}\text{Ar}$  )

- mais les neutrinos les plus abondants (**pp**) sont de trop faible énergie pour être détectés par cette méthode
- avec **John Bahcall**, il décida de détecter les neutrinos de hautes énergies ( ${}^7\text{Be}$  et  ${}^8\text{B}$  )  
-> bien que le taux de comptage attendu ne soit que de  
**10 neutrinos par semaine !**



- **1966** : **Ray Davis** tente s'ionstalle au fond de la mine de *Homestake* (Dakota), avec un bidon
  - de 400 000 litres de  $C_2Cl_4$
  - enterré à 1 500 m de profondeur
- **1968**: après 2 ans d'acquisition, Davis publie qu'il voit bien les neutrinos solaires
  - mais avec un **déficit de 65%** par rapport au taux prévu
- **1988**: après avoir répété pendant **20 ans** ses mesure, Davis confirme ce déficit
  - > ***Ce mystère des neutrinos solaires, va perdurer 30 ans !***



# Autre méthode radiochimique: le Gallium

Pour détecter les neutrinos solaires (**pp**) on proposa d'utiliser du **Gallium** :



-> mais il faut une masse de Ga > la production annuelle mondiale

- **1990**, néanmoins deux expériences souterraines sont entreprises
  - **SAGE**, en Russie ( 55 tonnes de Gallium métallique)
  - **GALLEX**, au *Gran Sasso*, en Italie, (sel GaCl<sub>3</sub>)
- > résultats très discordants
- **1992**, les deux expériences convergent et confirment que les neutrinos solaires sont bien majoritairement émis par les réactions de fusions (**pp**)
  - mais leur flux est toujours en **déficit de 40%** par rapport aux calculs
  - > **le mystère des neutrinos solaires persiste !**

# La « détection Tcherenkov » des neutrinos solaires

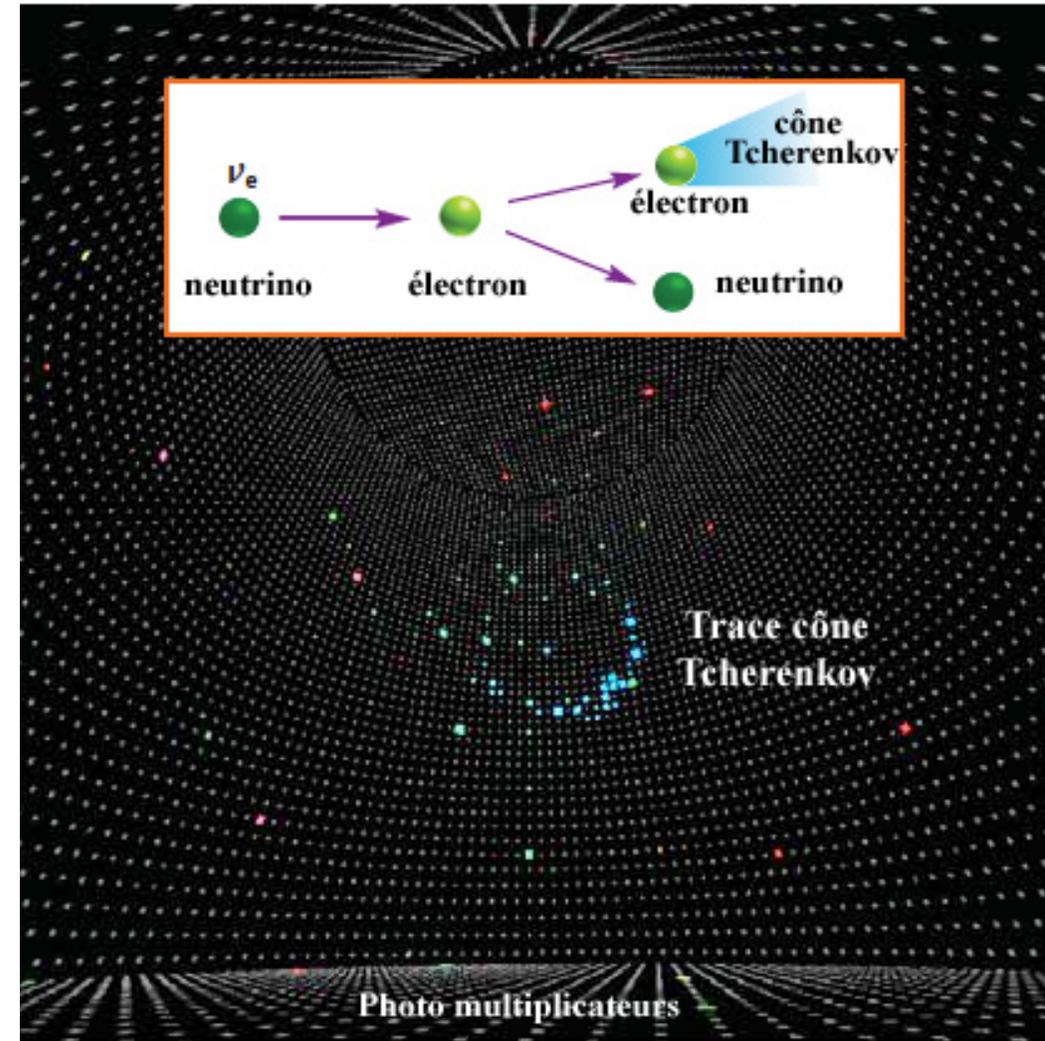
**1986:** Japon - mine de *Kamioka*:

utilisation de **Kamiokande**, le détecteur construit pour observer la **désintégration des protons ?**

- Cible: 2 100 tonnes d'eau (1 000 m de profondeur)
  - But: détection les neutrinos solaires ( $^8\text{B}$ )
    - par diffusion élastique des  $\nu_e$  sur les  $e^-$  cibles:
  - Ces électrons diffusés étant **plus rapides que la vitesse de la lumière ... dans l'eau**
- > **onde de choc** (cône de **lumière Tcherenkov**)
- axée sur la direction **du neutrino incident**
  - détectée par 11 000 photo-détecteurs

**1998: confirmation du déficit:**

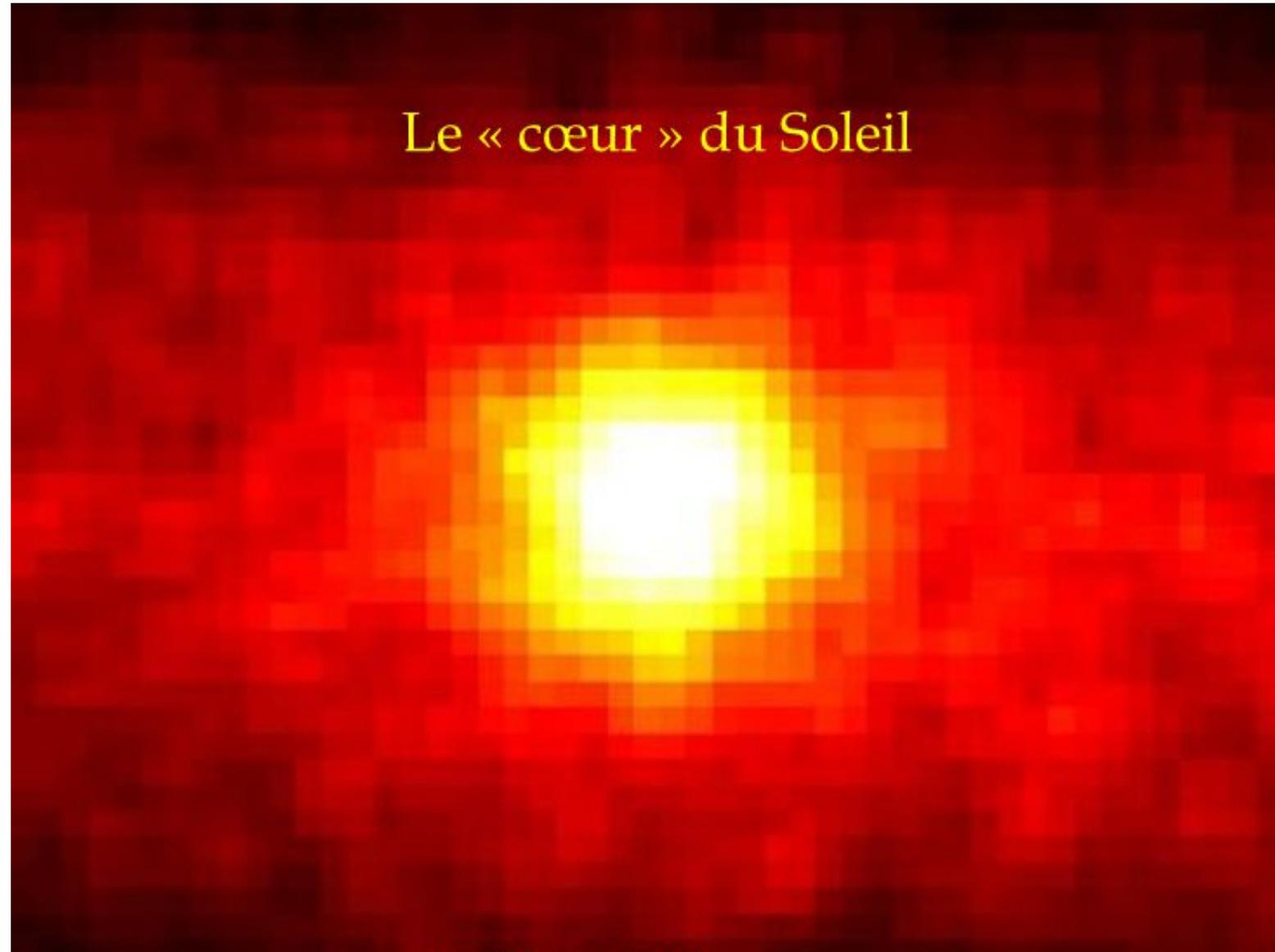
**seulement 55% des neutrinos prévus sont détectés**



## Une première: l'image-neutrino du Soleil

*( temps de pose:  
500 jours)*

*les neutrinos s'échappent  
du cœur du Soleil  
en 2 secondes  
( les photons ...  
en 200 000 ans)*



Une solution à l'énigme du « déficit solaire »

les neutrinos auraient-ils  
des troubles de personnalités ?

**1957**, Bruno Pontecorvo prédit que les neutrinos, sont des particules relativistes de **différentes saveurs** (donc de masses différentes)

- En vol, ils **oscilleraient** entre leurs différentes saveurs
- Une conséquence du **principe d'incertitude d'Heisenberg** appliqué à la propagation du neutrino à partir du lieu précis de sa naissance:
  - > en vol, il y a « **superposition cohérente** »  
**des états propres de masses**



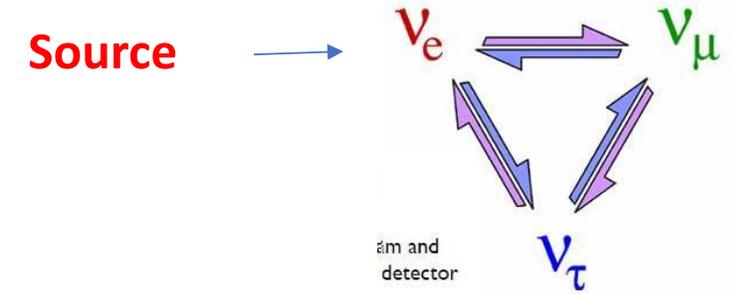
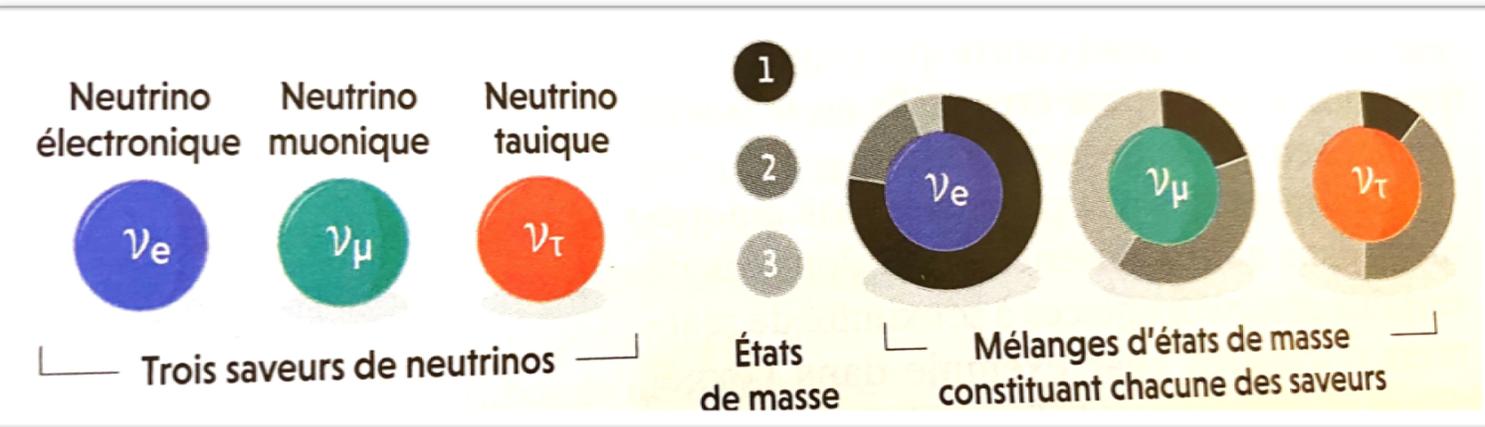
Dans le cas de deux saveurs, il y a

deux saveurs ( $\nu_e$  et  $\nu_\mu$ ) qui coexistent avec  
deux états de masses ( $\nu_{m1}$  et  $\nu_{m2}$ ) de vitesses de propagation différentes

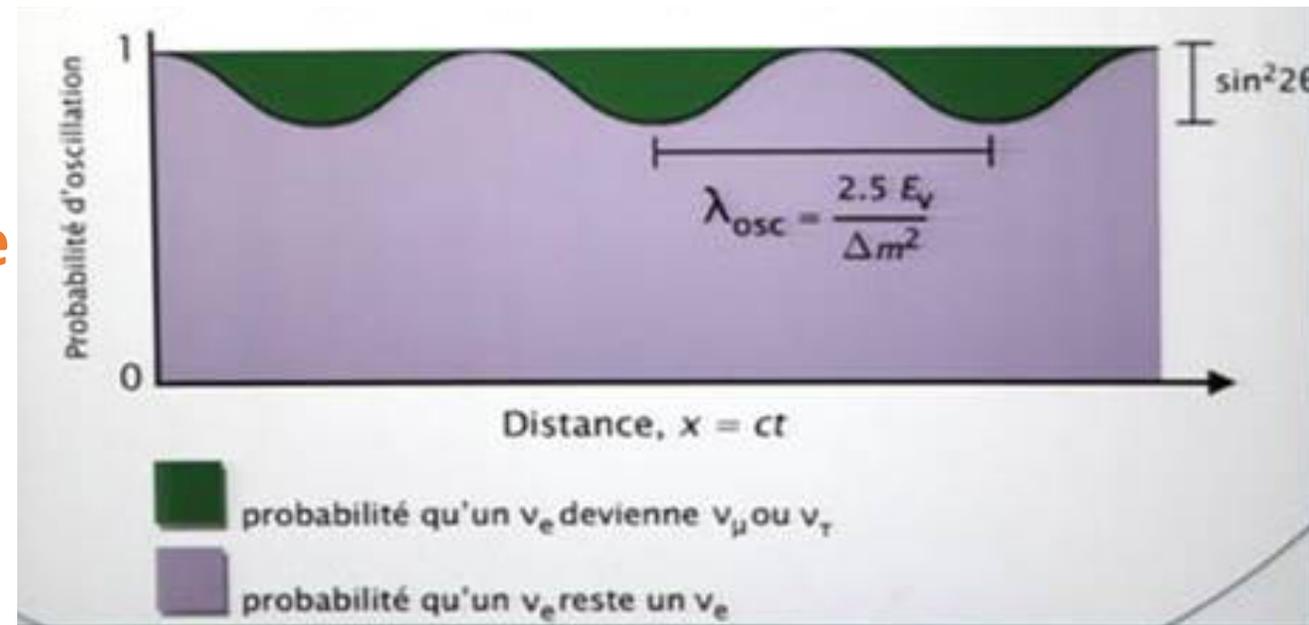
- en vol -> **interférences** entre saveurs -> *la saveur d'un neutrino dépend ainsi de la distance parcourue depuis son lieu de naissance*
- après une **distance de vol L**, un neutrino d'énergie **E**  
la **probabilité de mélange** entre les saveurs est  
$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2(\Delta m^2 L / 4E)$$
  - où  $\theta$  est un *angle de mélange*  
tel que  $\nu_e = \cos\theta \cdot \nu_{m1} + \sin\theta \cdot \nu_{m2}$  et  $\nu_\mu = -\sin\theta \cdot \nu_{m1} + \cos\theta \cdot \nu_{m2}$
  - et  $\Delta m$  est l'**écart de masse** entre les saveurs ( $\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$ )

*La mesure des oscillations ne donne accès  
qu'aux différences de masses  $\Delta m$  entre saveurs  
(pas aux valeurs absolues  $m$ )*

- Plus tard, le phénomène d'oscillation fut étendu aux 3 saveurs des neutrinos



- en **traversant de la matière** la fréquence d'oscillation est **accélérée** par les **interactions faibles** avec les atomes cibles  
 -> **échange de bosons Z ou W**



# Actualités, sur le *déficit* des neutrinos solaires

- **1999**, l'expérience canadienne **SNO** dans une mine de Nickel,  
détecte **toutes les saveurs**:
    - 1000 tonnes d'**eau lourde** ( $D_2O$ ) sous 2000 m de roches
    - les  $\nu_e$  sont détectés par leur cône de **lumière Tcherenkov**
    - les autres saveurs  $\nu_x$  sont détectés par les **neutrons** émis par **dissociation** des deutons cibles :  
$$\nu_x + d \rightarrow \nu_x + p + n$$
  - **En cours**: deux expériences, **KamLand** (Japon) et **Borexino** (Gran Sasso),  
détectent **toute la gamme en énergie** des neutrinos solaires
    - confirmation du rôle des **oscillations** pendant le **vol libre** **Surface du Soleil -> Terre**
    - découverte d'un **effet matière** pendant le **trajet intra-solaire** **Cœur -> Surface du Soleil**  
effet qui **accélère** les oscillations dans le Soleil  
le taux d'accélération n'est pas le même pour les différentes énergies de neutrinos
- > **Sur l'ensemble des neutrinos solaires, il n'y a plus aujourd'hui aucun « déficit »**

# Ces oscillations sont la clef d'autres mystérieux déficits de neutrinos

*Pour interpréter les oscillations il faut connaître*

- *la distance entre le lieu de naissance et le lieu de détection des neutrinos*
- *La saveur initiale de la source de neutrinos*

$\nu_e$  pour le Soleil

$\bar{\nu}_e$  pour les réacteurs nucléaires

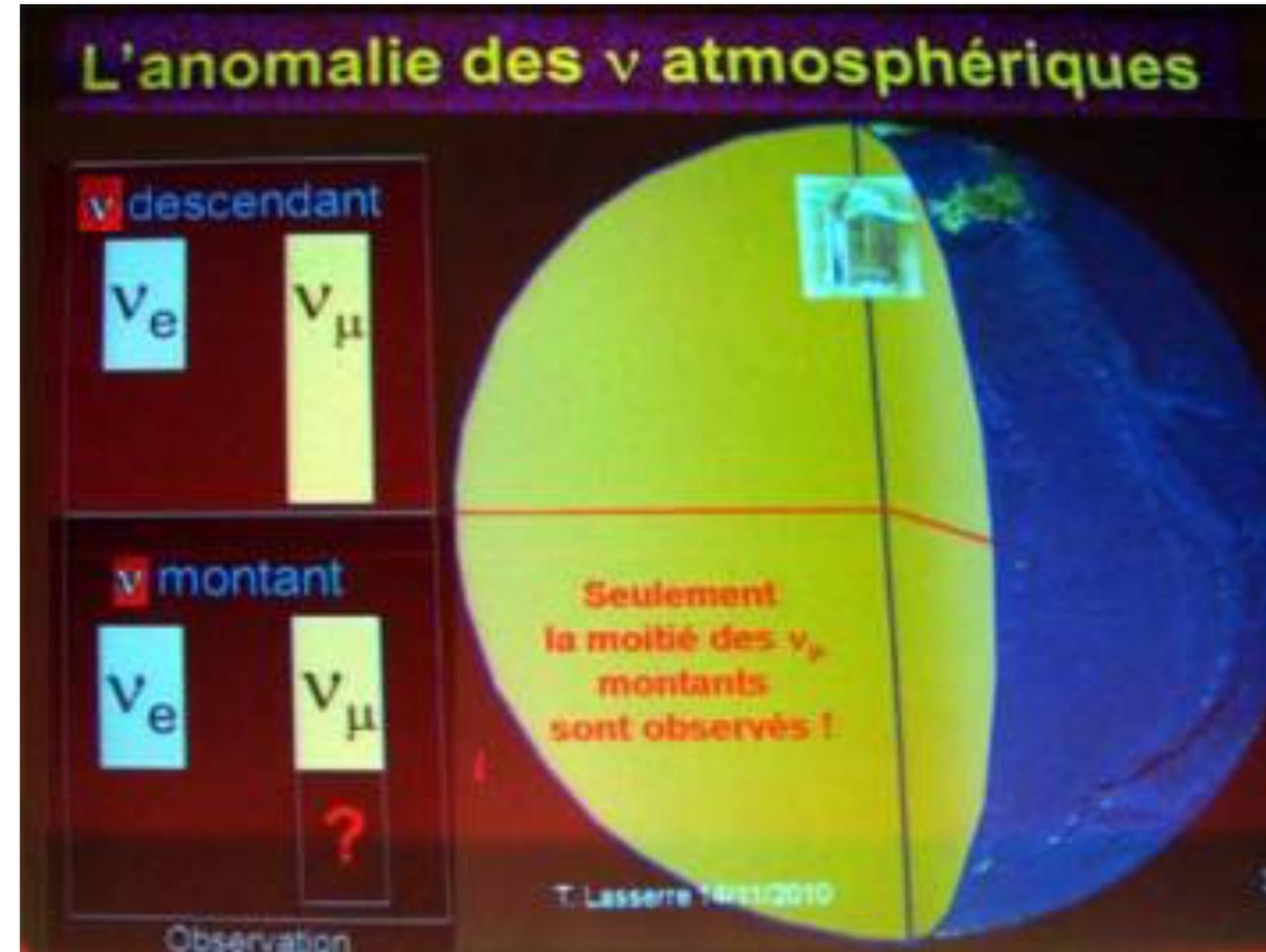
$\nu_\mu$  pour les faisceaux de pions

$\nu_\mu \nu_e$  pour l'atmosphère

# L'anomalie des flux de neutrinos atmosphériques

Dans les gerbes de rayons cosmiques  
il y a  $2 \nu_\mu$  pour  $1 \nu_e$

- L'expérience révèle une **asymétrie** entre le flux de neutrinos
  - **descendant** du ciel -> bon accord pour  $\nu_e$  et pour  $\nu_\mu$
  - **montant** du sol -> **déficit de 40%** mais seulement pour  $\nu_\mu$
- Il fallut 10 ans pour comprendre que:
  - les neutrinos **descendants** venant de l'atmosphère ( **20 km** )
    - > **n'ont pas eu le temps d'osciller**
  - alors que les neutrinos **montants** ayant traversé la Terre ( **13 000 km** )
    - > **ont eu le temps d'osciller** de  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$  (neutrinos non détectés)



Pour aller plus loin  
dans l'étude des oscillations

il faut produire sur Terre  
des faisceaux de neutrinos bien définis

**2000**, les Japonais ( Kamiokande ) sont les premiers à produire  
des faisceaux de neutrinos et d'antineutrinos

Expérience T2K (de Tokai - où est l'accélérateur de protons ...  
à Kamiokande – où est le détecteur de neutrinos)

- **Production** d'un faisceau de neutrinos par bombardement d'une cible par des protons  $\rightarrow$  pions chargés ( $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow \nu_\mu$ )
- **Détection des neutrinos**, après un parcours souterrain de **250 Km**:
  - > **disparition** des  $\nu_\mu$  incidents
  - > **apparition** de  $\nu_e$  (produits par oscillation)
  - > **comparaison** entre oscillations de neutrinos et d'antineutrinos  $\rightarrow$  **violation de la symétrie CP ?**



## 2006, les européens (expérience OPERA-CERN) offrent un plus long parcours (730 Km) aux neutrinos

- entre l'accélérateur de protons SPS du *CERN* (Genève)
- et le détecteur de neutrinos du Gran Sasso (Italie)

But: à partir d'un faisceau de

**neutrinos muoniques**

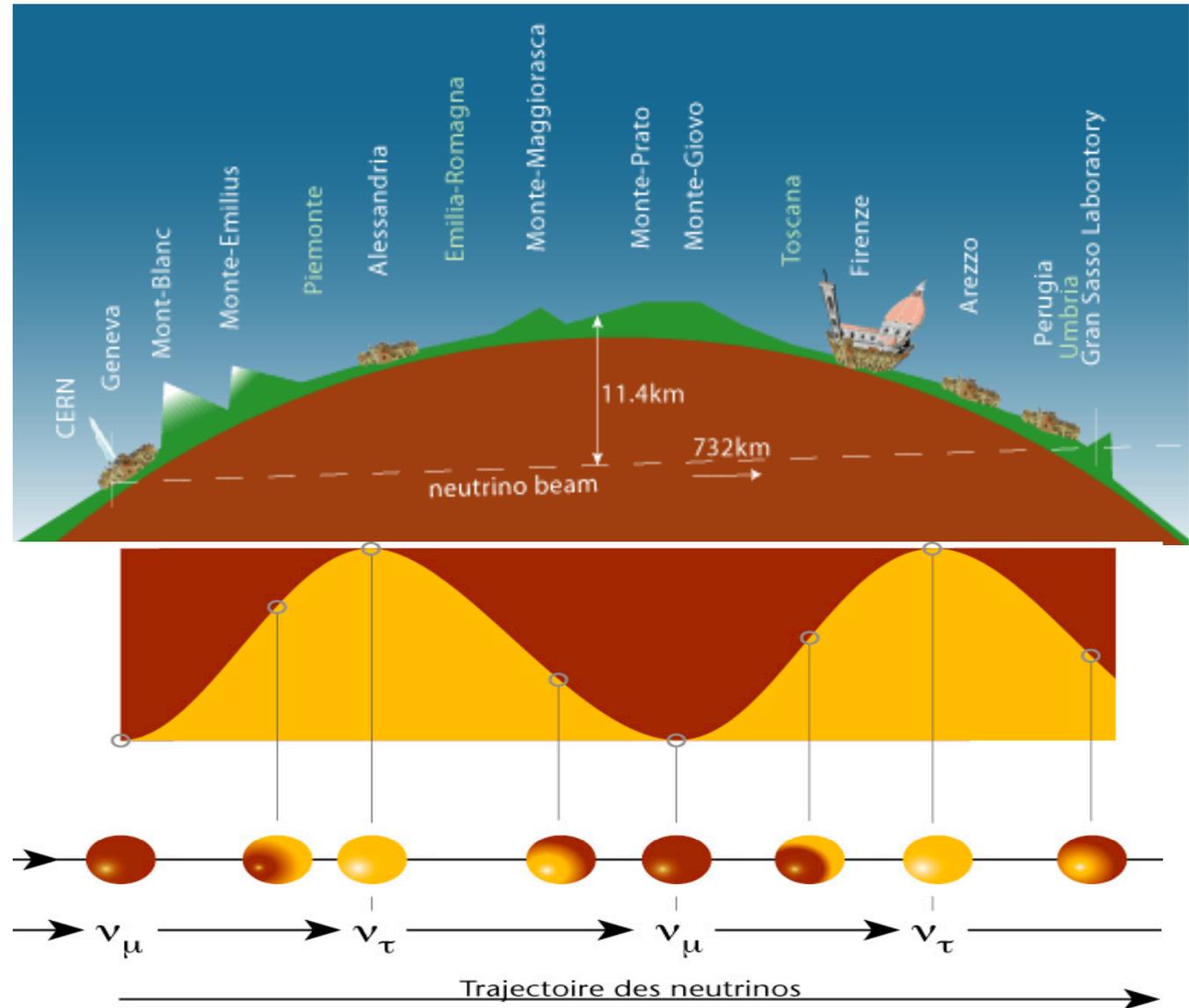
détecter la création de

**neutrinos tauiques**

Résultat: peu d'évènements

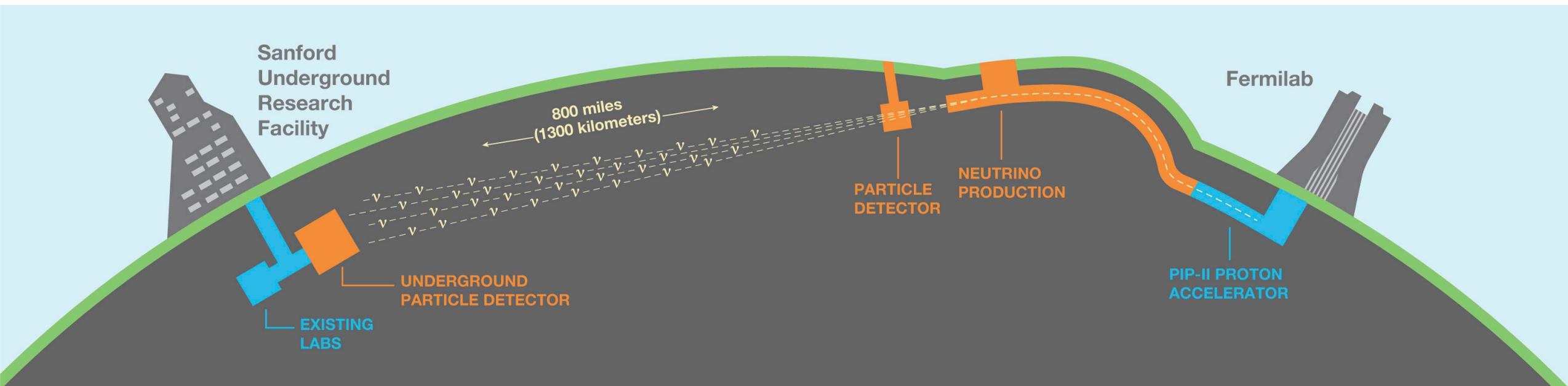
très difficiles à analyser

-> **confirmation de la réalité d'oscillations de  $\nu_\mu$  vers  $\nu_\tau$**



**2005-2026** les américains, forts de leur expérience MINOS entre *FermiLab* (Chicago) et la mine de *Soudan* (Minnesota) lancent le « projet ultime » **DUNE**

- un parcours de 1 300 Km entre *FermiLab* (Chicago) et *Sanford* (Dakota)
  - les neutrinos seront détectés dans une cible/détecteur d'argon liquide
- > dès 2026, cet ensemble devrait permettre de résoudre toutes les questions résiduelles sur les oscillations et les masses relatives des neutrinos



# Les télescopes à neutrinos

**Principe: photo-détection de cônes de lumière Tcherenkov, émis dans d'immenses volumes d'eau, très profonds (réduction du bruit de fond)**

**L'eau peut être à l'état liquide:**

- eau salée de **fosses marines**
  - > expériences **ANTARES** et **KM3NET** en mer **Méditerranée**
  - avantage: un milieu très **transparent** et **homogène**
  - inconvénients: **courants marins** profonds et **fluorescence** des poissons
- eau douce de **lacs profonds**
  - > projet **Gigaton Volume Detector** (lac **Baïkal** en Russie)
  - avantage: moins de courants profonds

**L'eau peut aussi être gelée: dans la profondeur d'épais glaciers**

-> expérience **IceCube** en **Antarctique**

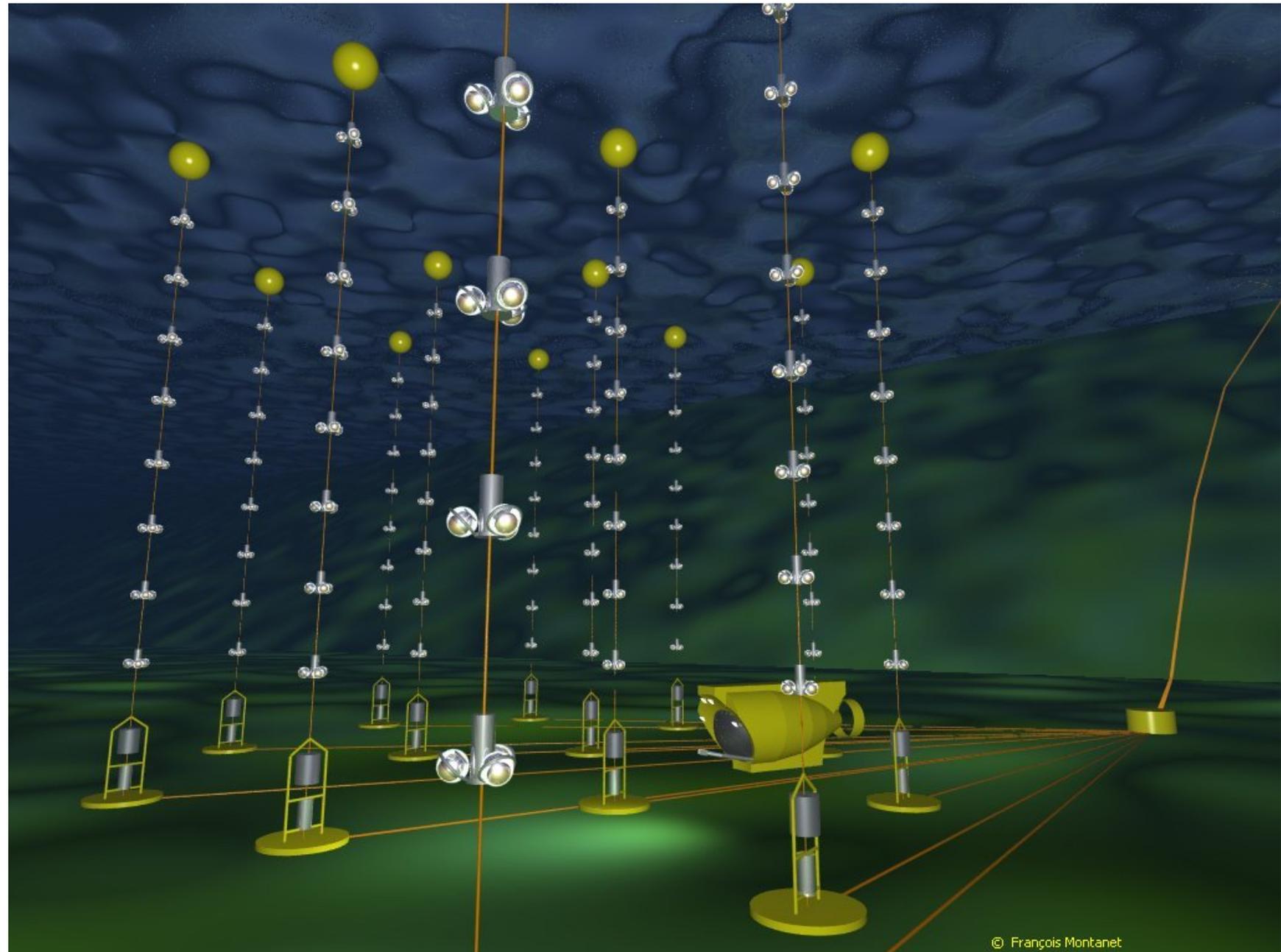
avantage: volume très stable

inconvénient: volume inhomogène (strates des chutes de neige annuelles)

## ANTARES

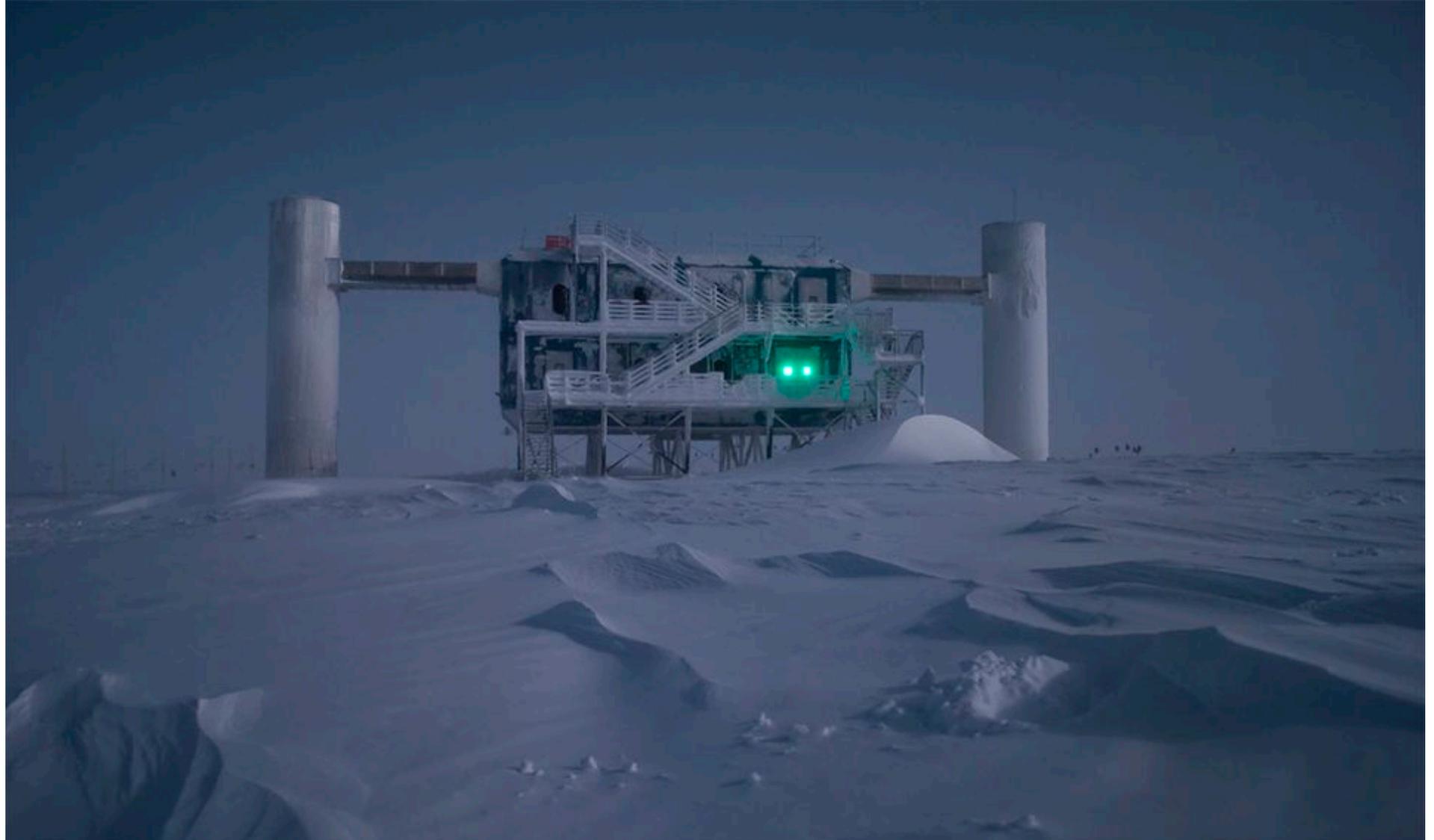
au large de Toulon

Lignes verticales  
de photo détecteurs



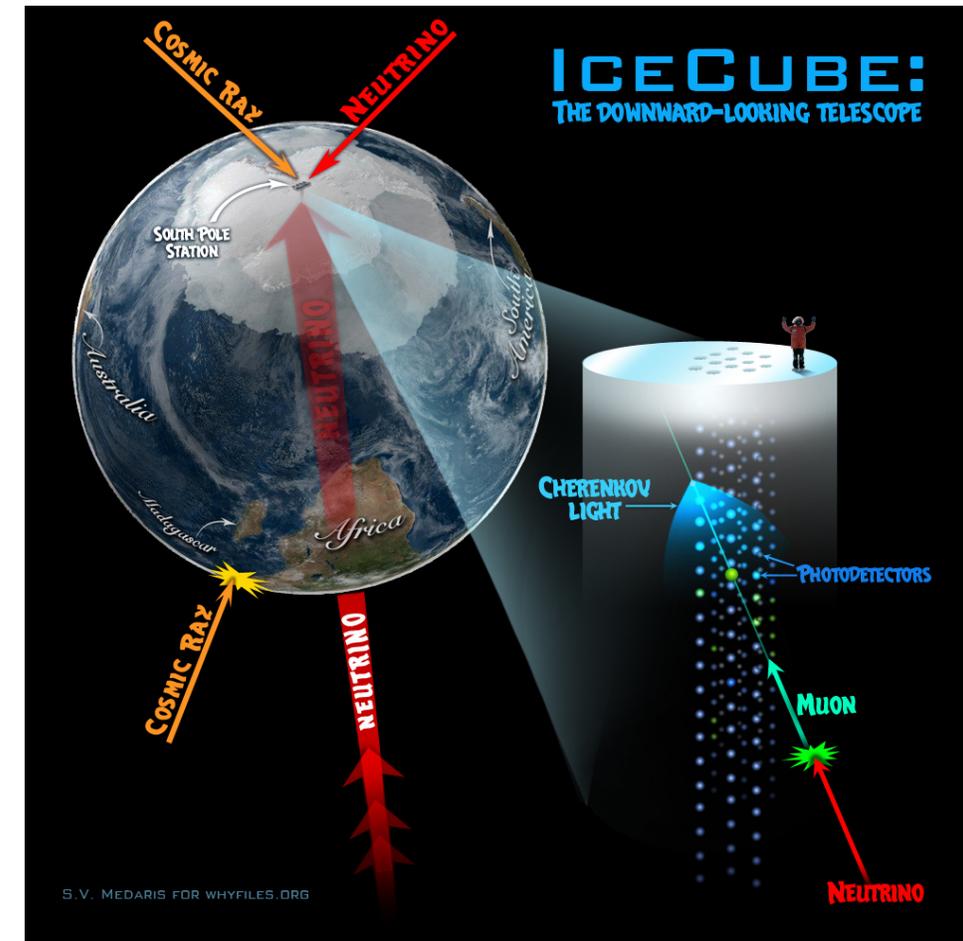
**ICECUBE**  
Antarctique

Puits verticaux  
dans le glacier



# IceCube

- cible: 1 km<sup>3</sup> de glacier
  - situé entre 1450 m et 2450 m de profondeur
  - percé de 86 puits verticaux équipés de 5160 détecteurs de lumière
- Les cônes de **lumière Tcherenkov**
  - sont reconstitués optiquement dans les strates de **100 000 ans** de chutes de neige
- Résultats
  - > **neutrinos des 3 saveurs**
  - > une centaine **neutrinos cosmiques** d'ultra haute énergie: **plus d'un million de milliards d'eV !**



# avril 2020, Super-Kamiokande : l'oscillation des antineutrinos serait plus rapide que celle neutrinos

Couverture de *Nature*, 16 avril 2020:

- après 10 ans de mesure de l'oscillation de  $10^{20}$  neutrinos
  - **Super-Kamiokande** a détecté **90 neutrinos** et seulement **15 antineutrinos**
  - > **différence de vitesse d'oscillation entre un neutrino et son antineutrino**
- **Degré de confiance:** seulement 95% (en physique, on demande 99,9999%)
- Si cette différence de comportement entre matière et antimatière est confirmée, notamment par les futures installations
  - **JUNO** (Chine 2022), **DUNE** (USA 2025) et **HyperKamiokande** ( Japon 2027)
  - > explication de la **disparition de l'antimatière à l'issue Big Bang ...**  
... comme l'avait prédit **Andrei Sakharov** dès 1967 !

*Ce qui reste à découvrir*

- La **masse précise** de chaque saveur de neutrinos
  - > contribution des neutrinos à la **masse totale de l'Univers**
- La **détection des neutrinos fossiles**
  - > leur rôle dans la **structuration de l'Univers**
- La **nature *Dirac ou Majorana*** des neutrinos et antineutrinos
  - > désintégration double-béta sans émission de neutrinos
- L'existence d'un **neutrino stérile**, une quatrième saveur, sensible seulement
  - > à la gravitation, selon les physiciens de *Los Alamos*
- Les différentes **sources cosmiques** des neutrinos
  - > développement de l'**astronomie multi-messenger**