



Enseigner l'Univers 2023

19–20 janv. 2023
Laboratoire APC

LES NEUTRINOS

Alessandra Tonazzo

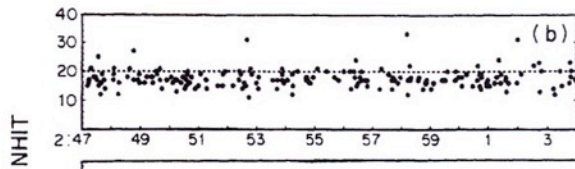
tonazzo@in2p3.fr



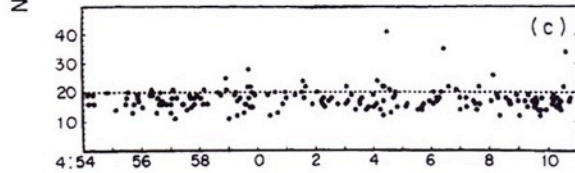
23 février 1987
Mine de Kamioka, Japan
(500 m sous terre)



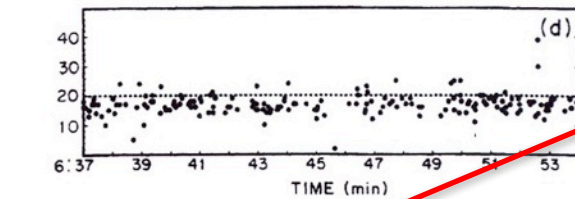
2:47



4:54



6:37



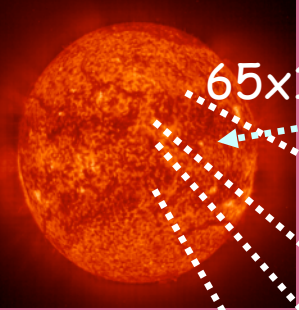
10 signaux en 10 secondes

Les neutrinos annoncent
la mort d'une étoile !
(une SuperNova)



Neutrinos de ...





$65 \times 10^9 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



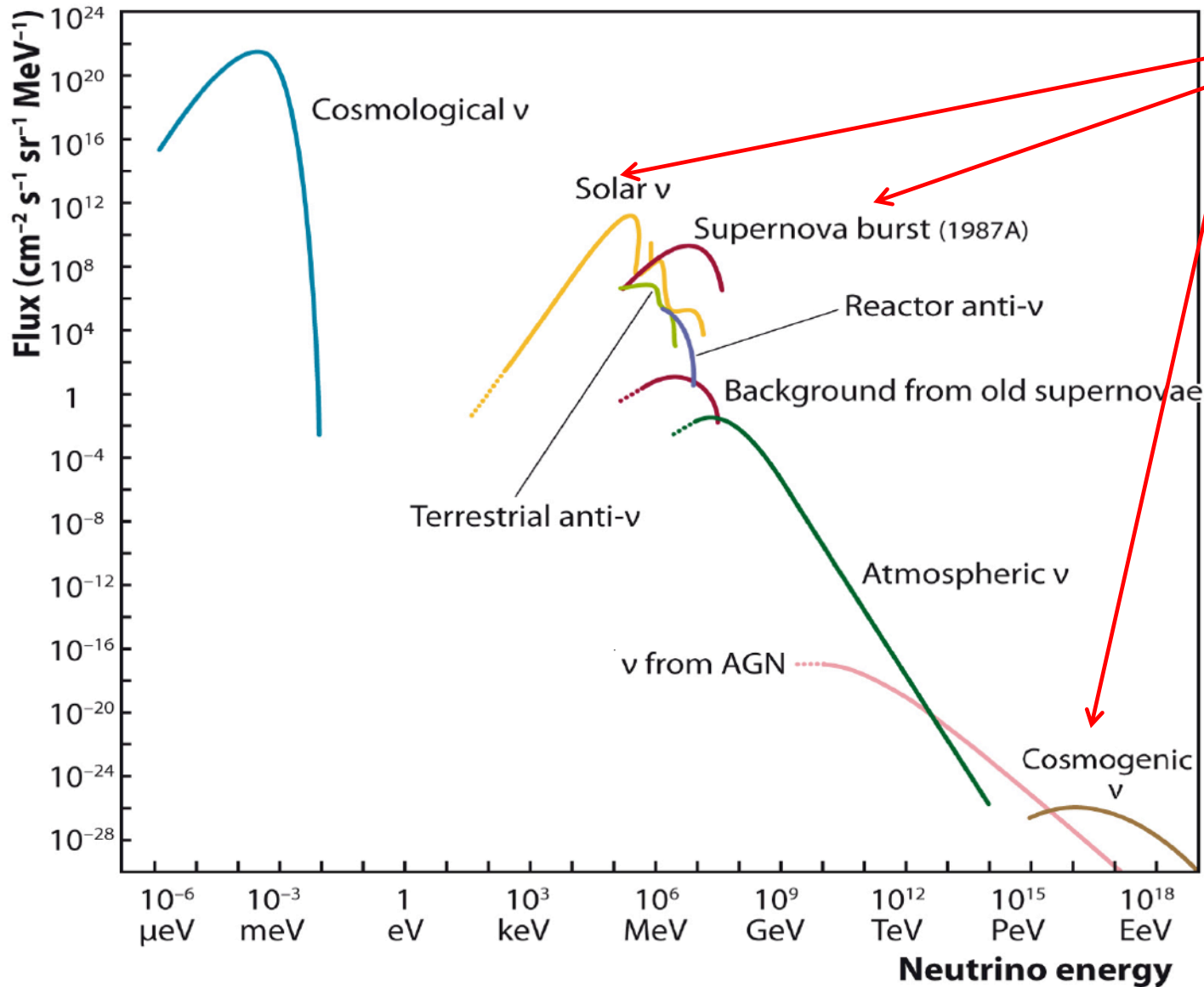
quelques $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

4000 s^{-1}
du ^{40}K dans
notre corps



300 neutrinos du
Big Bang per cm^3

Les neutrinos sur Terre



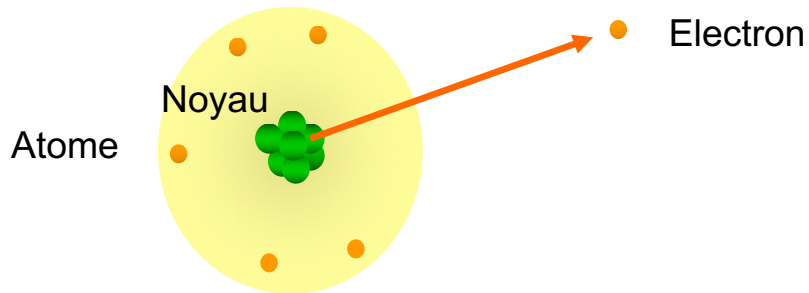
Messagers
de l'Univers

Nous allons parler de...

- Un peu d'histoire
- Comment « voir » les neutrinos
- Ce qu'ils nous disent sur...
 - le Soleil
 - les étoiles
 - et l'Univers
- Ce que nous savons sur les neutrinos
 - les oscillations et la masse
 - ... et ce que nous ne savons pas encore

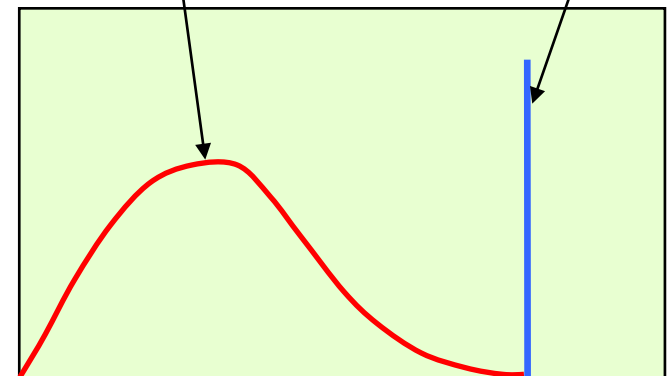
Pourquoi les neutrinos ?

1930 : La radioactivité β présente une anomalie !



ce qui est observé

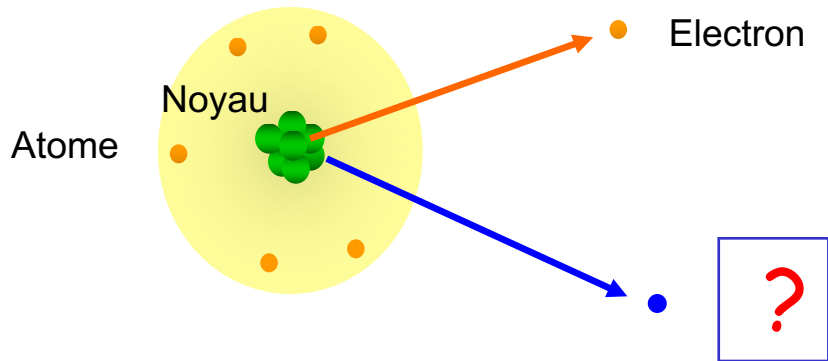
ce qui **DEVRAIT** être observé !!!



Energie de l'électron

Pourquoi les neutrinos ?

1930 : La radioactivité β présente une anomalie !



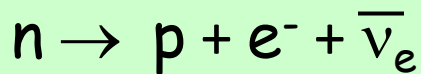
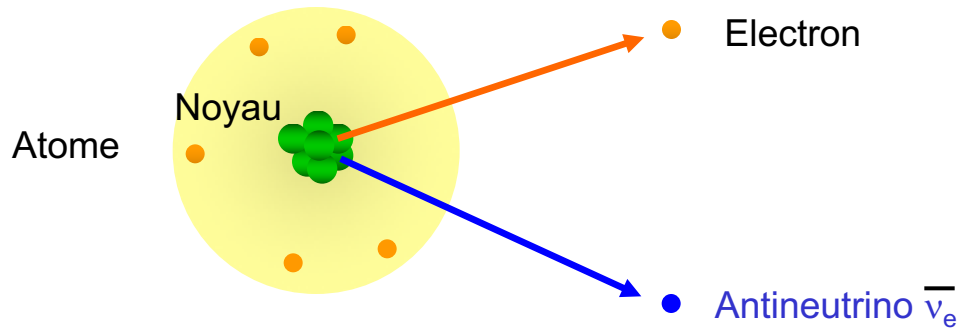
Décembre 1930 : Idée géniale de Wolfgang Pauli !



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 »)

v

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
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
ansuhören 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,
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
jedemfalls 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.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente
verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann
 μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis
eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa
10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein
gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,
gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt,
Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.-
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet.- Leider kann ich nicht
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht
vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich
bin.- Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer
untertänigster Diener



Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, because of the "wrong" statistics of the N- and Li-6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, **the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin 1/2 and obey the exclusion principle** and that further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. **The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton mass.** - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

Now it is also a question of which forces act upon neutrons. For me, the most likely model for the neutron seems to be, for wave-mechanical reasons (the bearer of these lines knows more), that the neutron at rest is a magnetic dipole with a certain moment μ . The experiments seem to require that the ionizing effect of such a neutron can not be bigger than the one of a gamma-ray, and then μ is probably not allowed to be larger than $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

But so far I do not dare to publish anything about this idea, and trustfully turn first to you, dear radioactive people, with the question of how likely it is to find experimental evidence for such a neutron if it would have the same or perhaps a 10 times larger ability to get through [material] than a gamma-ray.

I admit that my remedy may seem almost improbable because one probably would have seen those neutrons, if they exist, for a long time. But nothing ventured, nothing gained, and the seriousness of the situation, due to the continuous structure of the beta spectrum, is illuminated by a remark of my honored predecessor, Mr Debye, who told me recently in Bruxelles: "Oh, It's better not to think about this at all, like new taxes." Therefore one should seriously discuss every way of rescue. Thus, dear radioactive people, scrutinize and judge. - Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. With my best regards to you, and also to Mr. Back, your humble servant

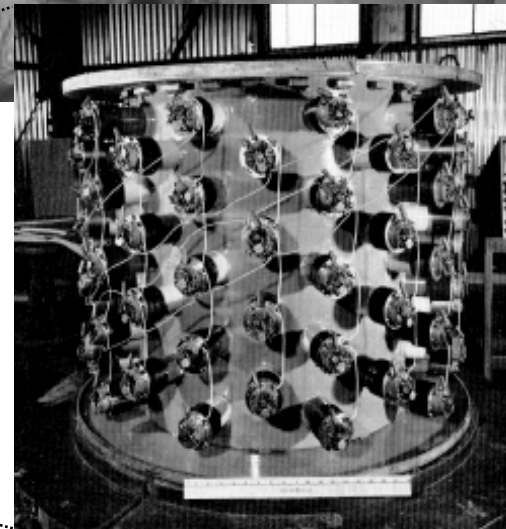
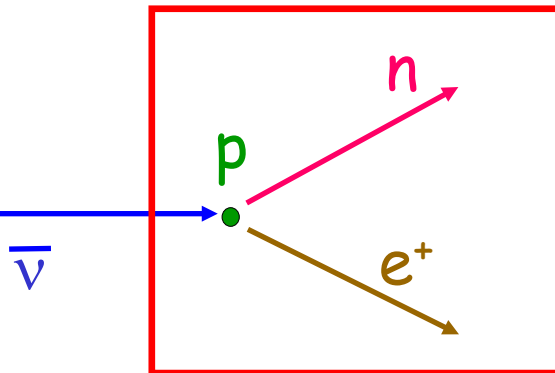
"I have done a terrible thing, I have postulated a particle that cannot be detected"

La découverte du neutrino

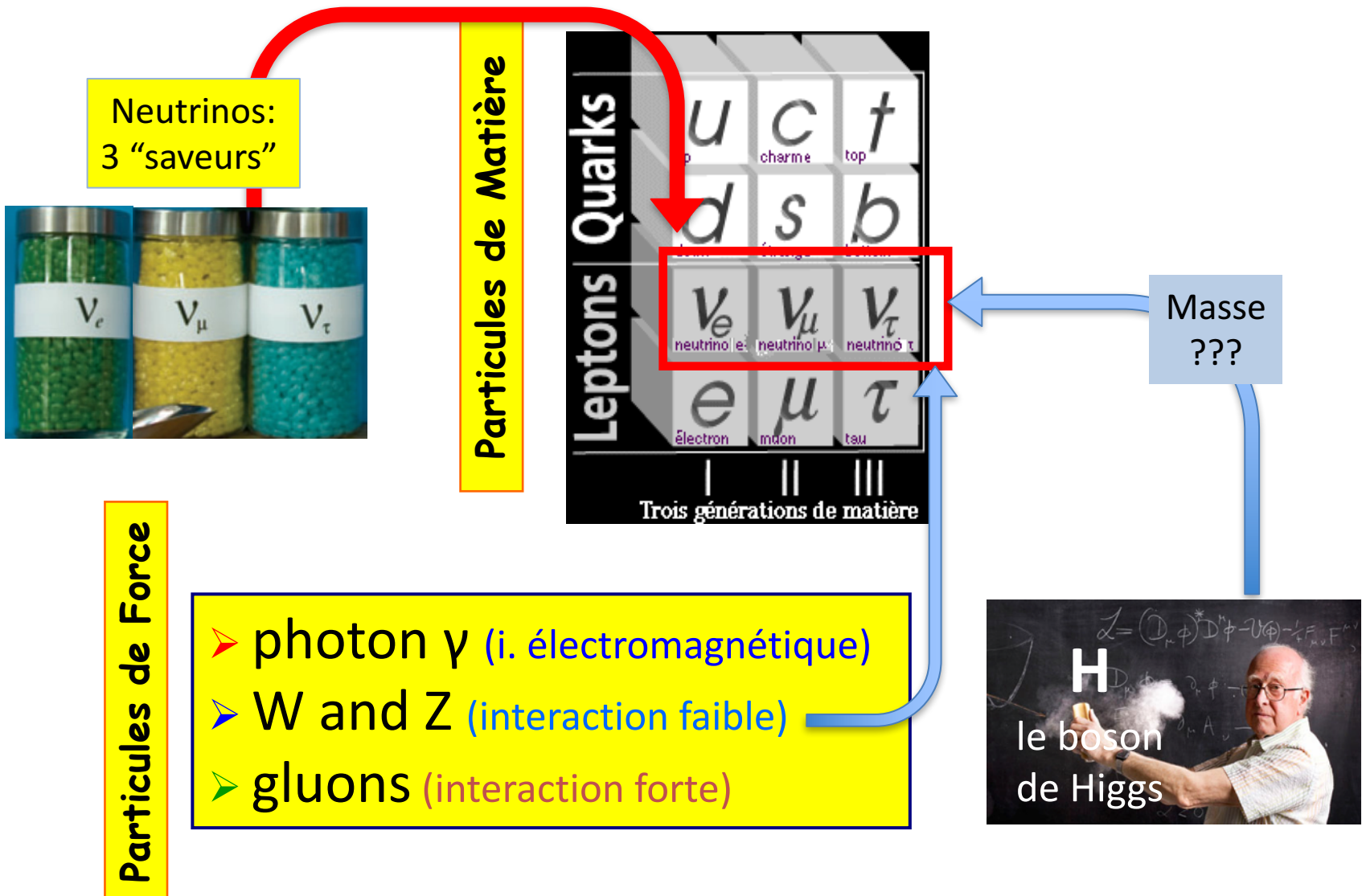
- 1956 : Clyde Cowan et Fred Reines mettent en évidence le neutrino auprès du réacteur nucléaire de Savannah River
(il s'agit en fait de l'antineutrino électron $\bar{\nu}_e$)



**NOBEL PRIZE
1995**

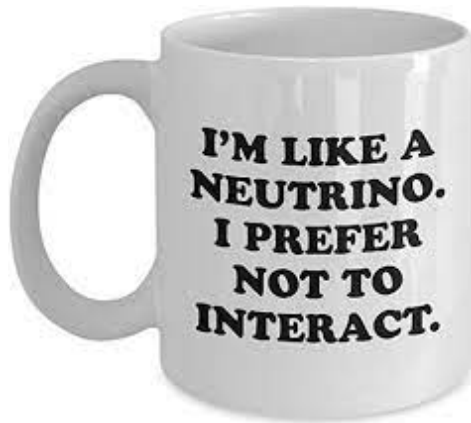


Le monde des particules élémentaires



Comment interagissent les neutrinos ?

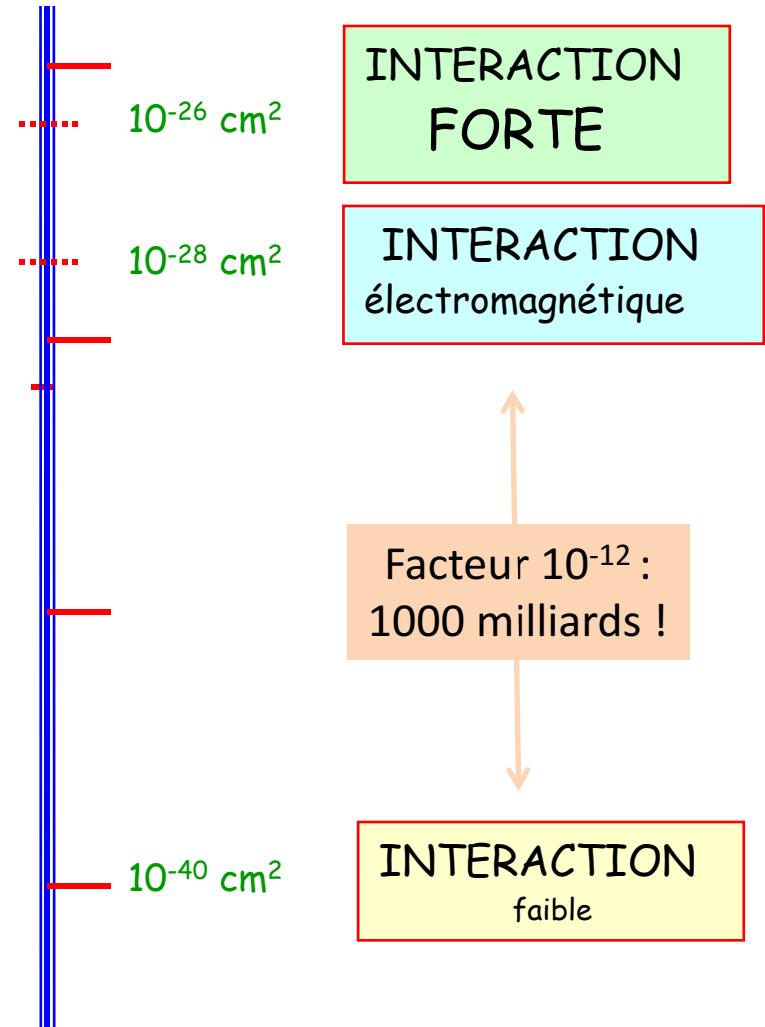
Très faiblement !



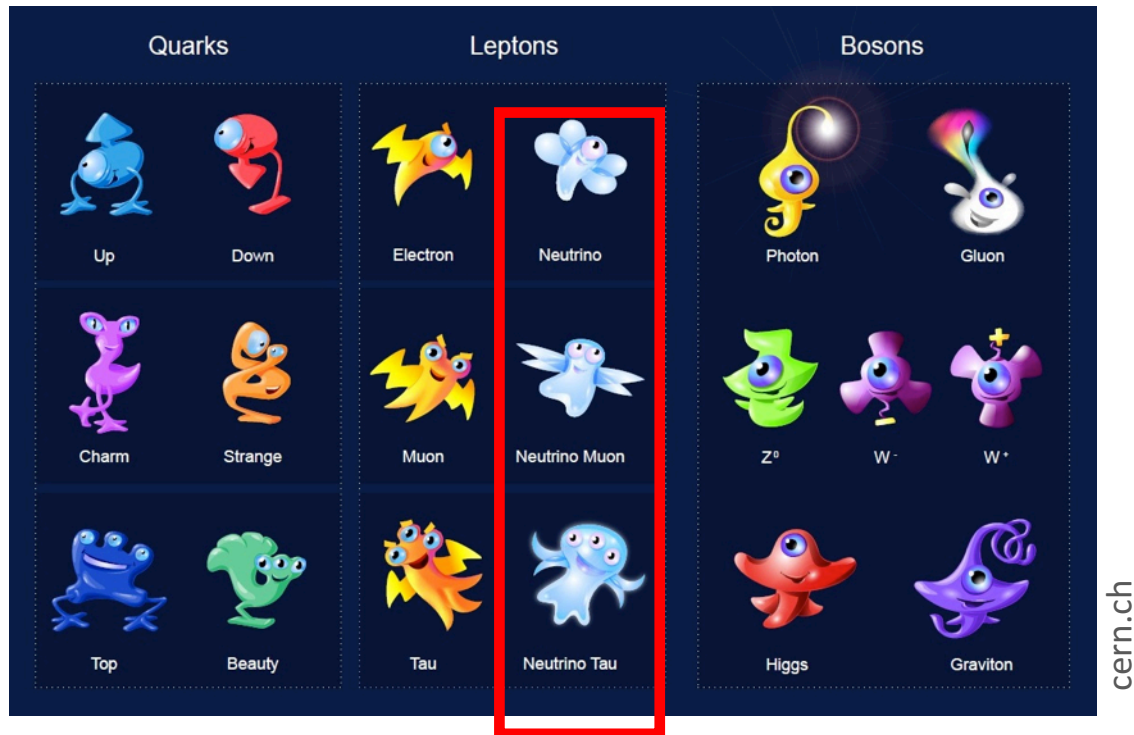
proton de 1 GeV

électron de 1 GeV

neutrino de 1 GeV



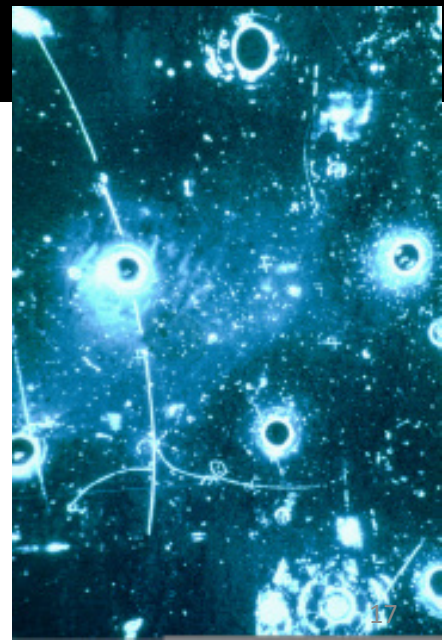
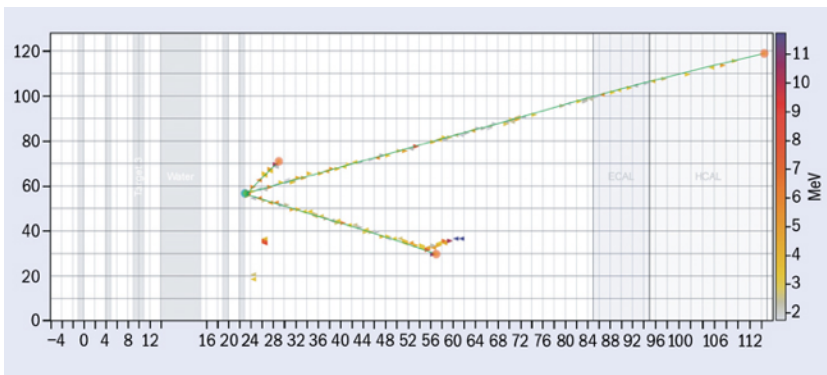
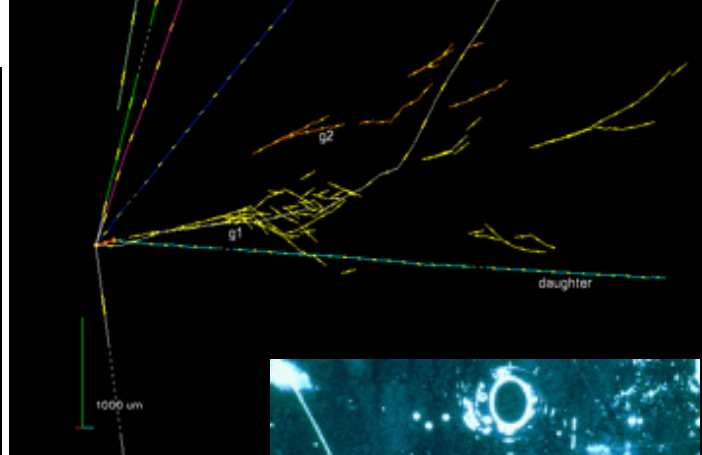
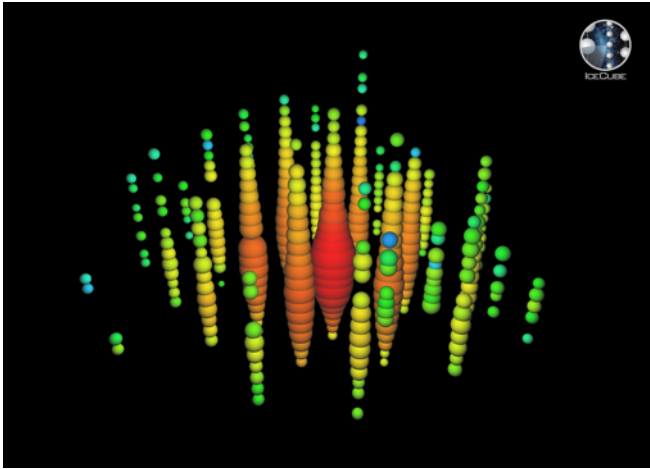
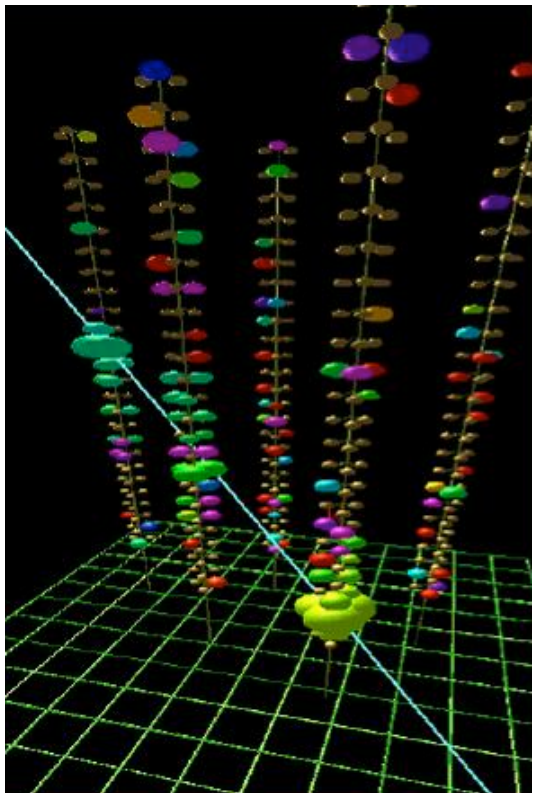
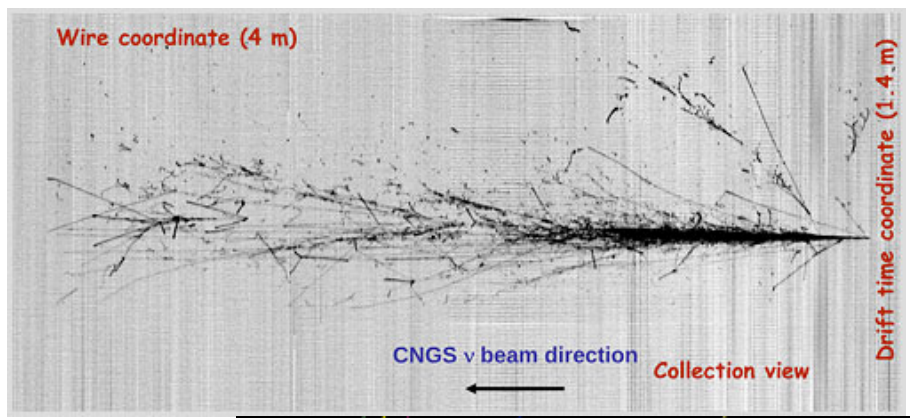
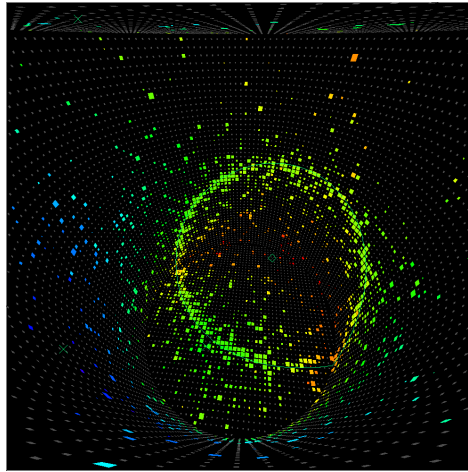
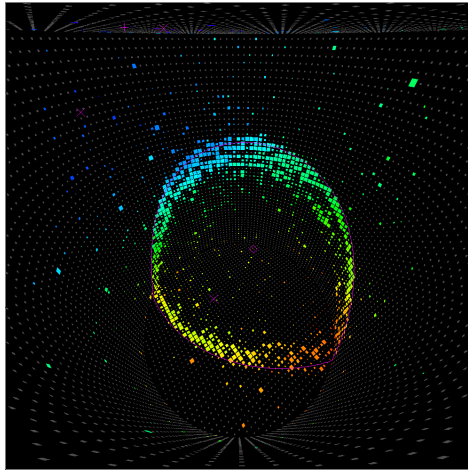
“The ghost particle”



Maman, ils sont comment en vrai, les neutrinos ?

Très difficiles à voir.

Mais toi, avec ton ordinateur, tu peux les voir !



Comment interagissent les neutrinos ?

Ça veut dire quoi, interaction faible ?

Longueur d'absorption ou parcours libre moyen

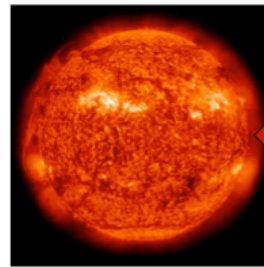
$$\lambda = \frac{1}{n\sigma}$$

Densité de cibles

Section efficace d'interaction

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} = \frac{1}{(6.7 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}) \cdot (10^{-43} \text{ cm}^2)} = 1.5 \times 10^{20} \text{ cm} = 150 \text{ années lumière}$$

Sun Glasses for Neutrinos?



8.3 light minutes

Several light years of lead needed to shield solar neutrinos

Bethe & Peierls 1934:
... this evidently means that one will never be able to observe a neutrino.



Comment interagissent les neutrinos ?

Ça veut dire quoi, interaction faible ?

Combien d'interactions de neutrinos solaires dans 1 tonne d'eau en 1 jour ?

Flux de neutrinos
(> 5 MeV)

Section efficace
d'interaction
 $\nu_e e^- \rightarrow \nu_e e^-$

Nombre de cibles (electrons)
 $N_T = 18 \times N_{\text{Avogadre}} \times 1t / 18g$

$$N_{\text{int}} = \Phi_{\nu} \cdot \sigma \cdot N_T$$

$$= (2 \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}) \cdot (10^{-43} \text{ cm}^2) \cdot (6 \times 10^{29}) \cdot 86400 \text{ s} / j$$

~ 0.1 par jour

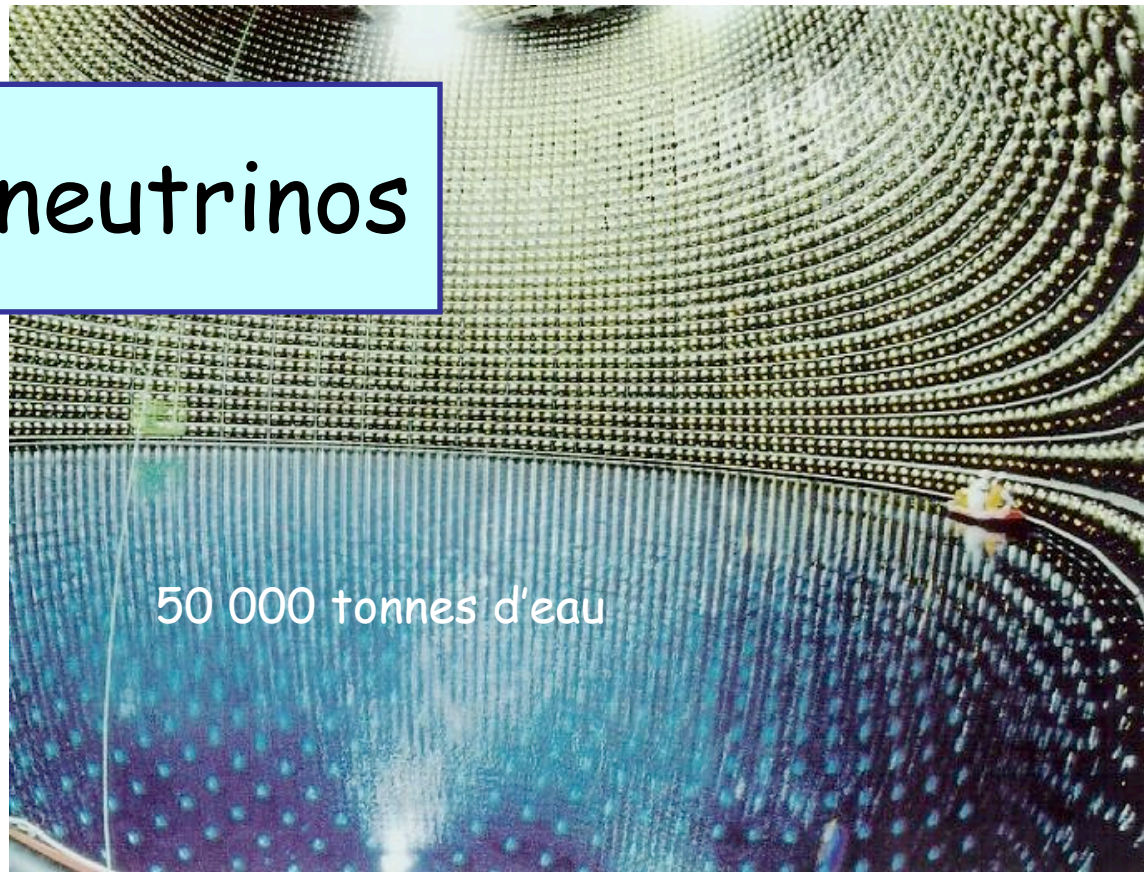
Pour piéger les neutrinos, il faut

- **beaucoup de neutrinos**
- **de grands détecteurs**

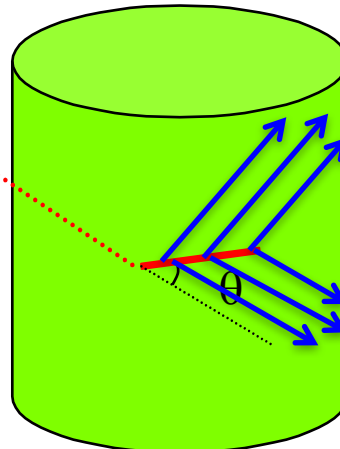
Détecteurs de neutrinos

SuperKamiokande
(Mine de Kamioka,
Japon)

50 000 tonnes d'eau



neutrino

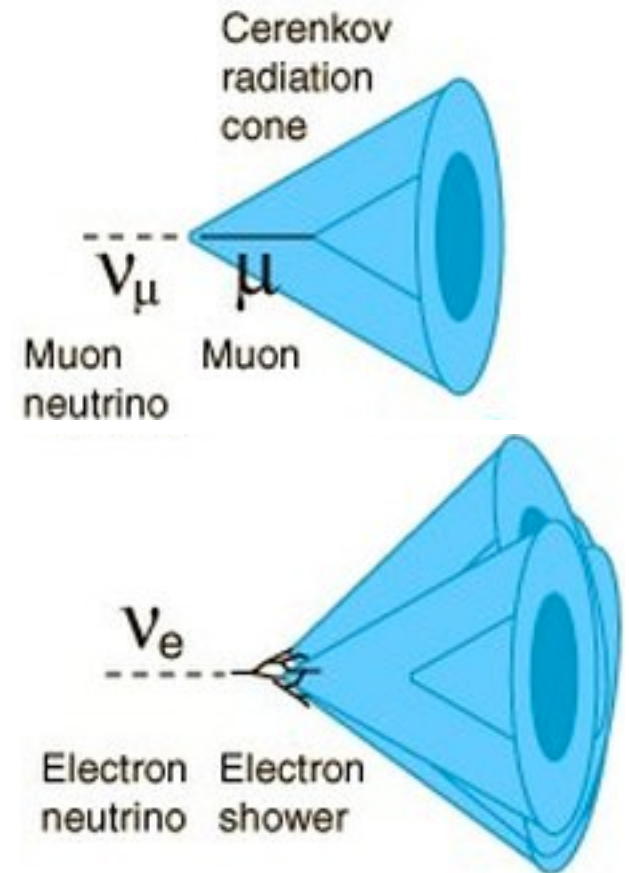
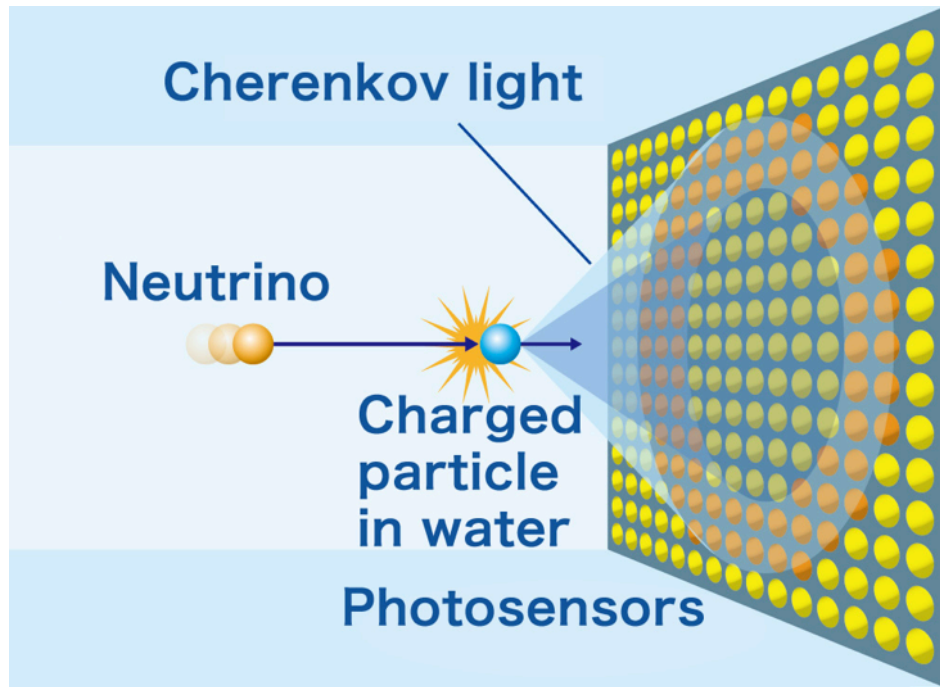


électron
ou muon

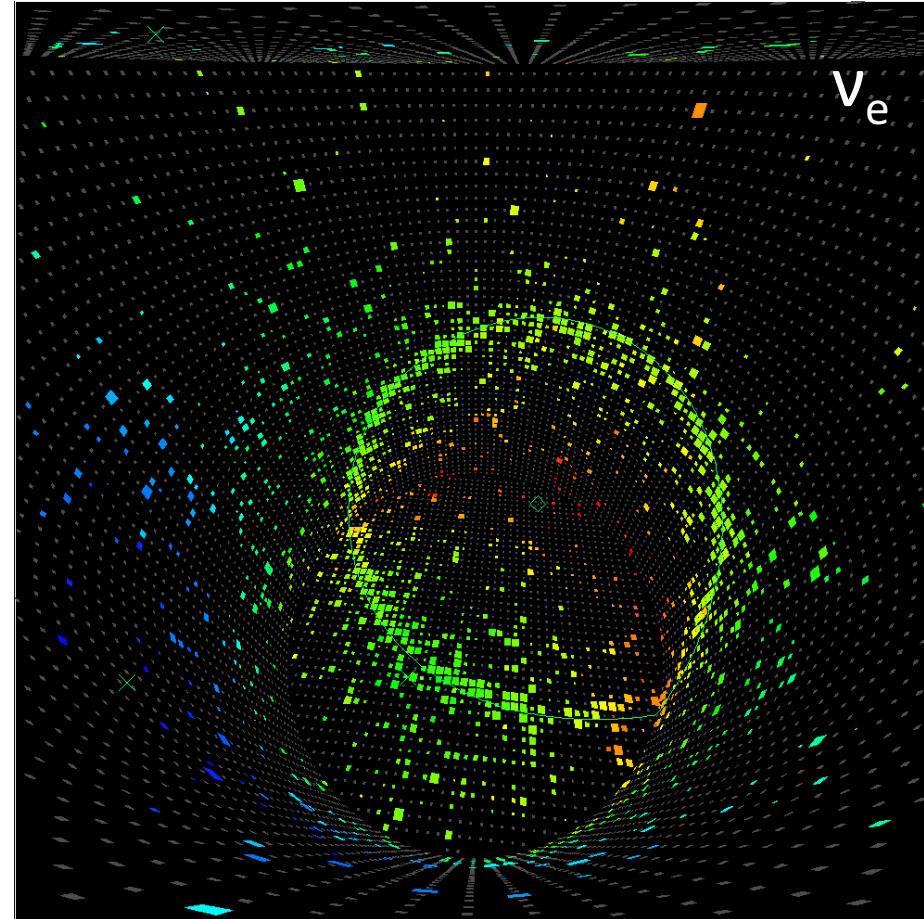
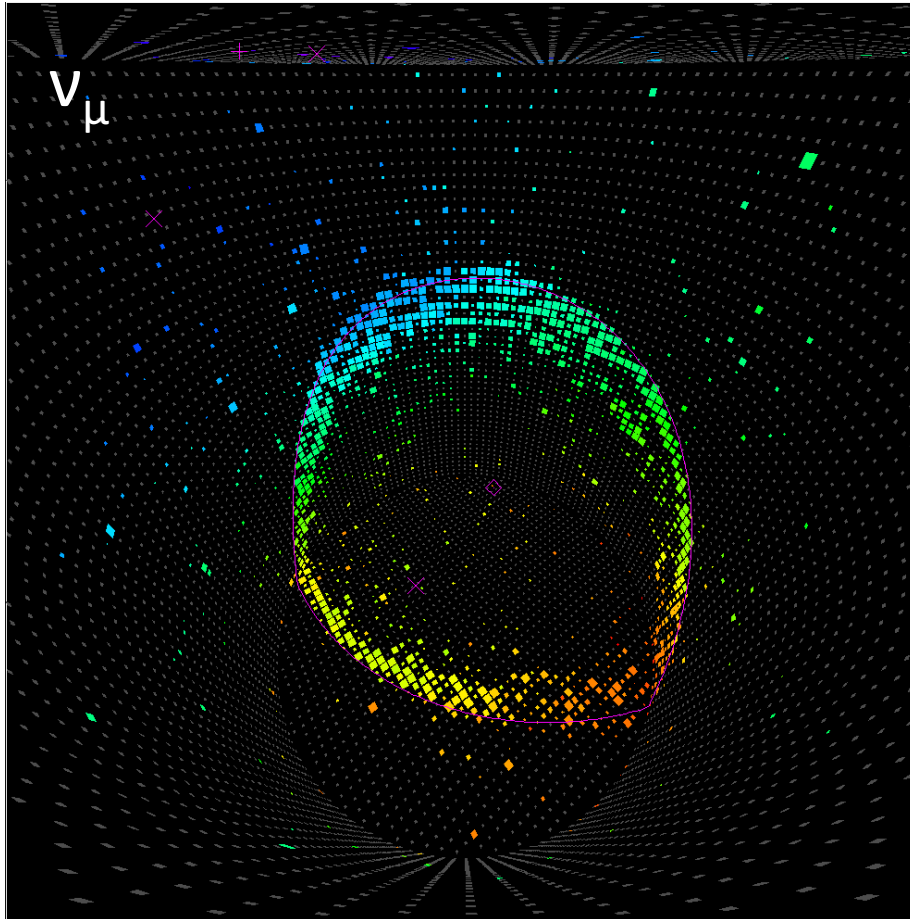


LUMIERE !
= SIGNAL

Détecteurs de neutrinos : effet Cherenkov



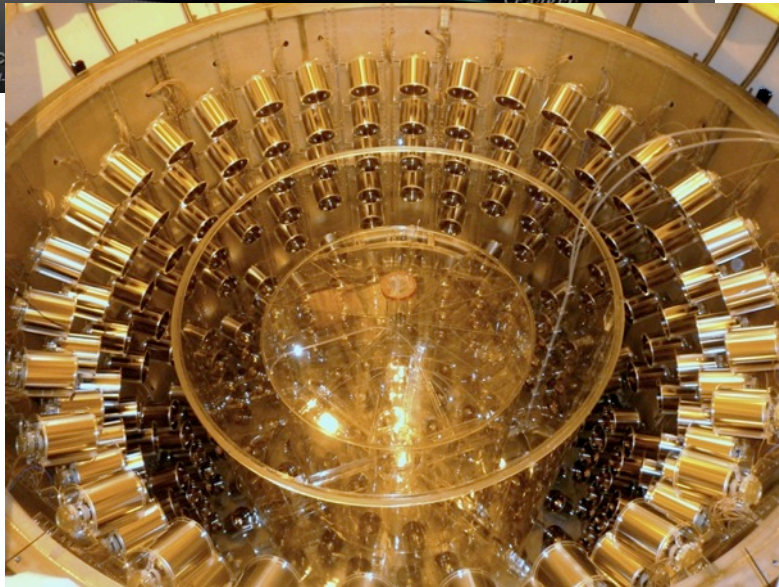
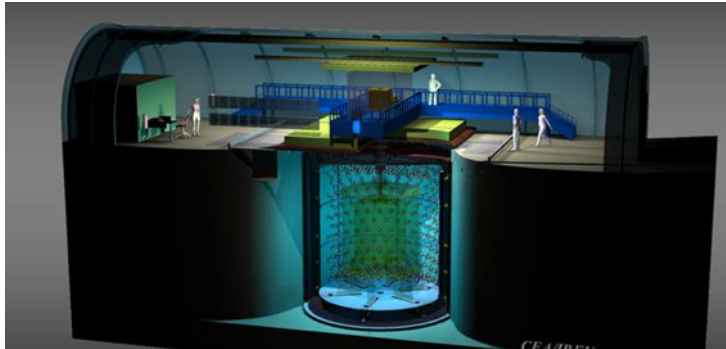
Des neutrinos dans Super-K



Autres détecteurs de neutrinos

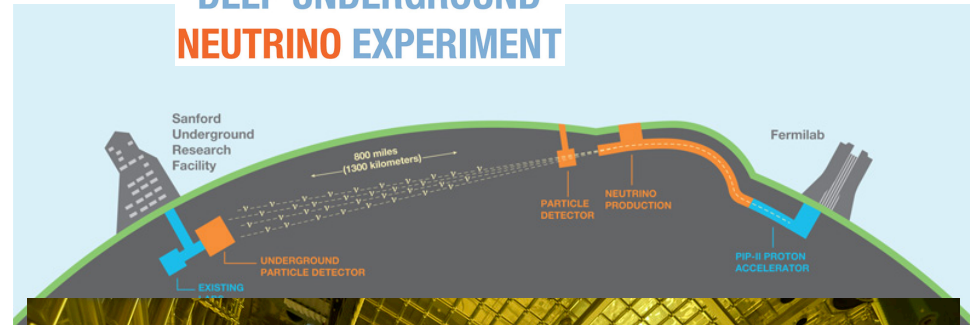


Ardennes, France,
2009-2018)



(Chicago-South Dakota,
USA, 2027-)

DEEP UNDERGROUND
NEUTRINO EXPERIMENT



Que peuvent nous dire les neutrinos?

comment fonctionne le Soleil,

comment les étoiles finissent d'exister,

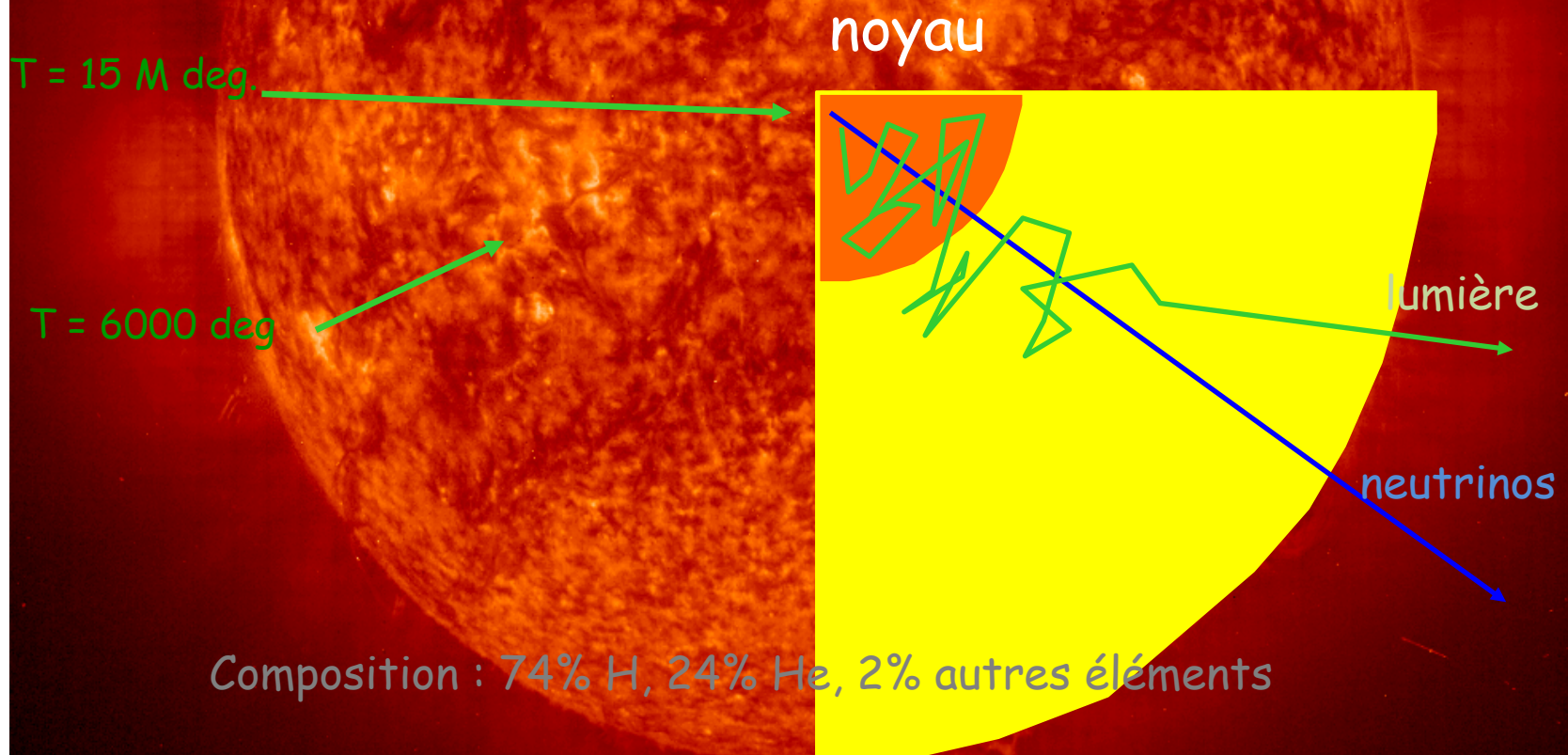
ce qu'il se passe dans l'Univers...

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

Diamètre : 1 400 000 km

150 M km de la Terre
(8 minutes lumière)

Dans le Soleil



Dans le Soleil

proton



+



proton



deutérium

positron

e^+



+

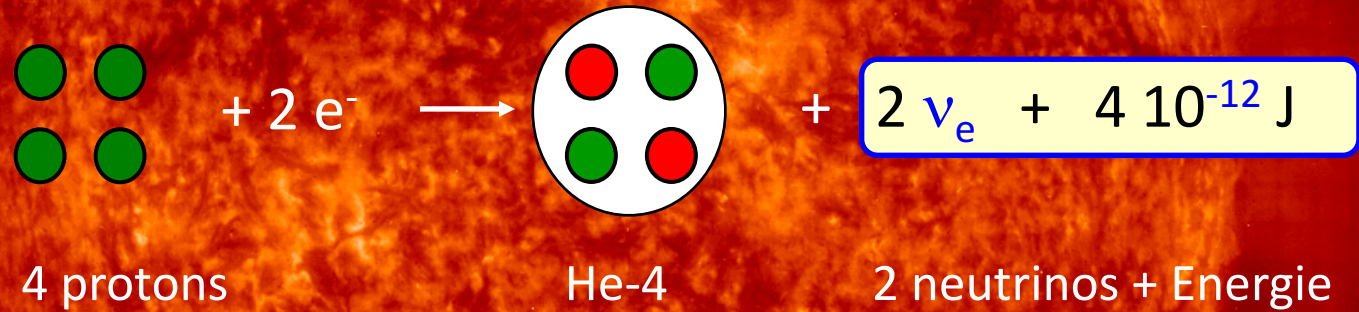


neutrino

ν_e

Réaction de fusion primordiale

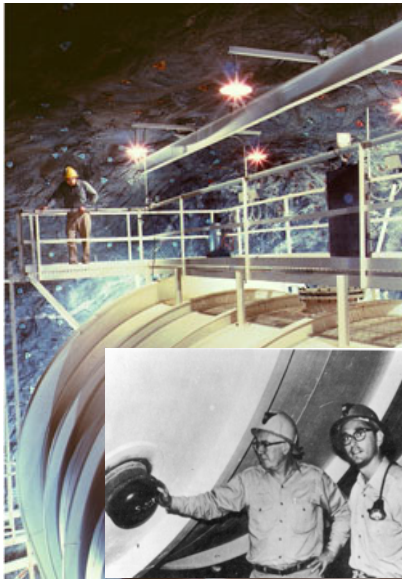
Dans le Soleil



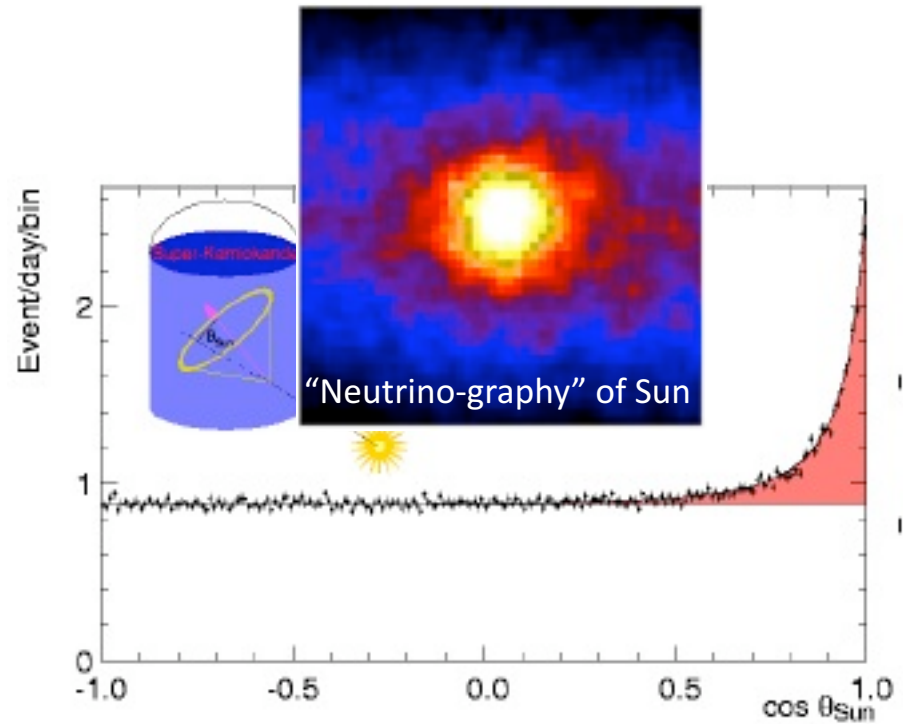
Réaction de Fusion

Nous avons vu les neutrinos du Soleil !

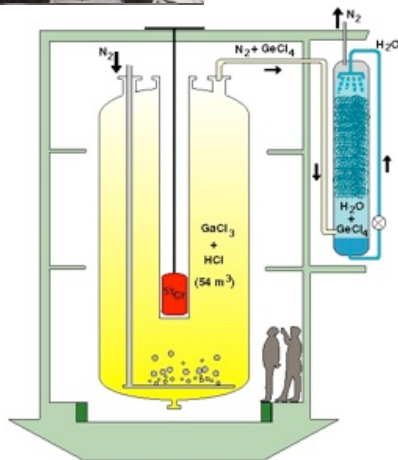
SAGE (Canada)



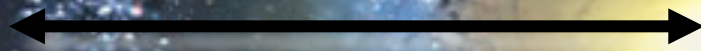
(SUPER-)KAMIOKANDE (Japan)



GALLEX (Gran Sasso)



=> Preuve du mécanisme de fonctionnement du Soleil !



30 000 a.l.

60 000 a.l.

La Voie Lactée, Notre Galaxie

Eloignons-nous un peu !

Voie lactée



Grand Nuage de Magellan



150 000 années-lumière

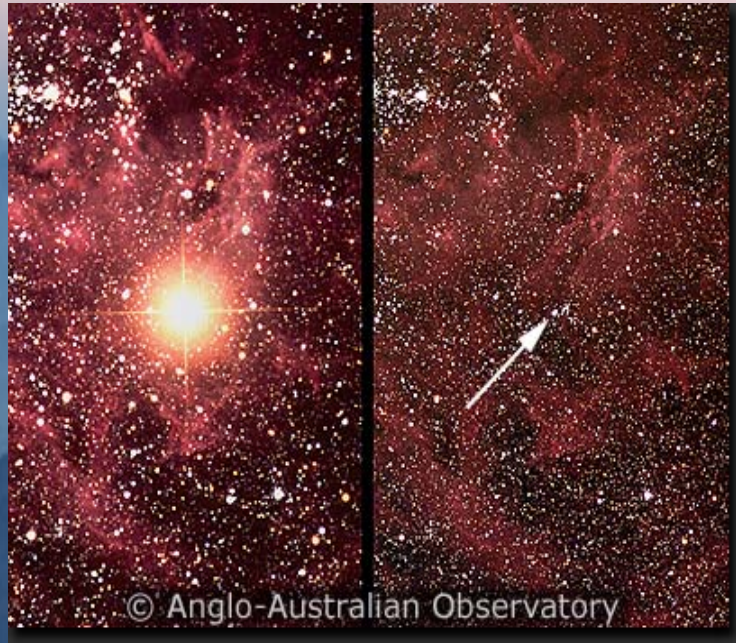


Large Magellanic Cloud
150 000 years ago
Sanduleak -69°202

Observatoire de Las Campanas (Chili)

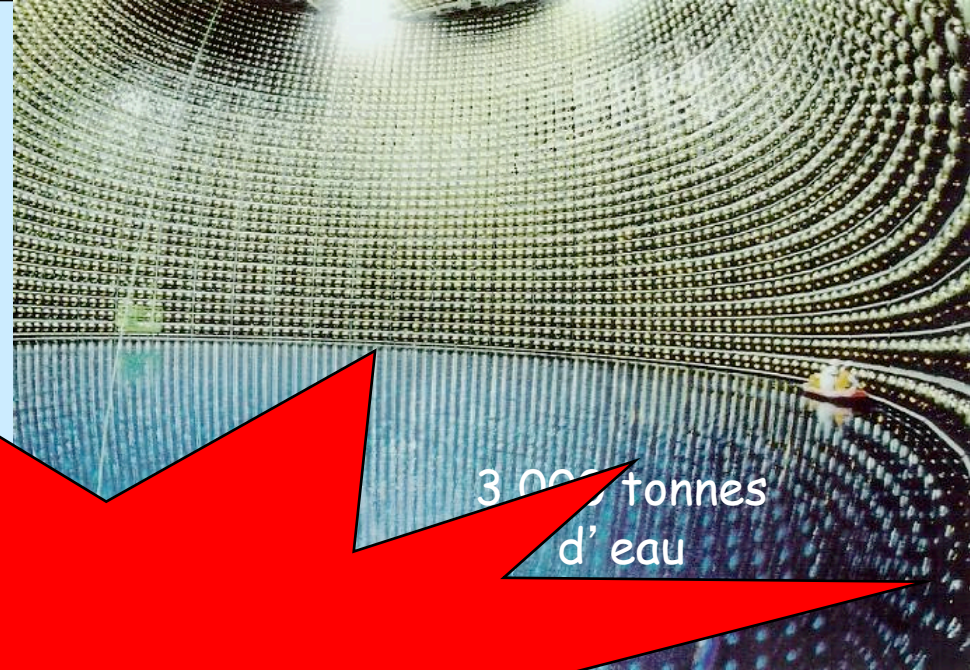
23 février 1987

Découverte de SN1987A
à l'œil nu !



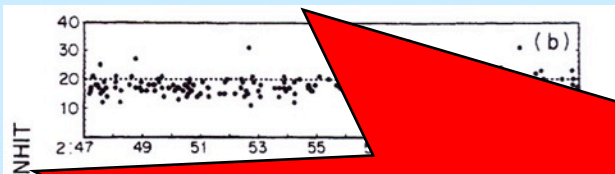
... et avec un télescope !

23 février 1987
Mine de Kamioka



La lumière des neutrinos !

2h47



4h34



6h37



7h32

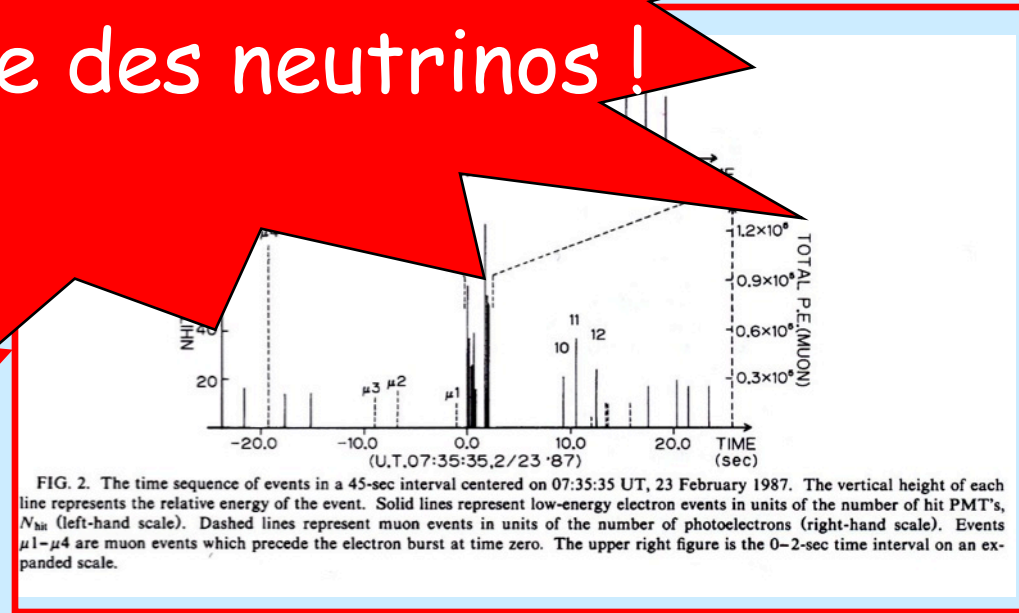
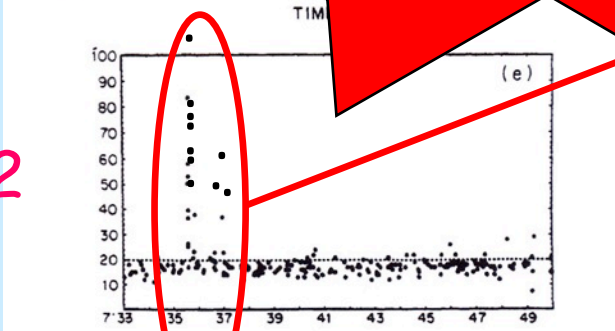
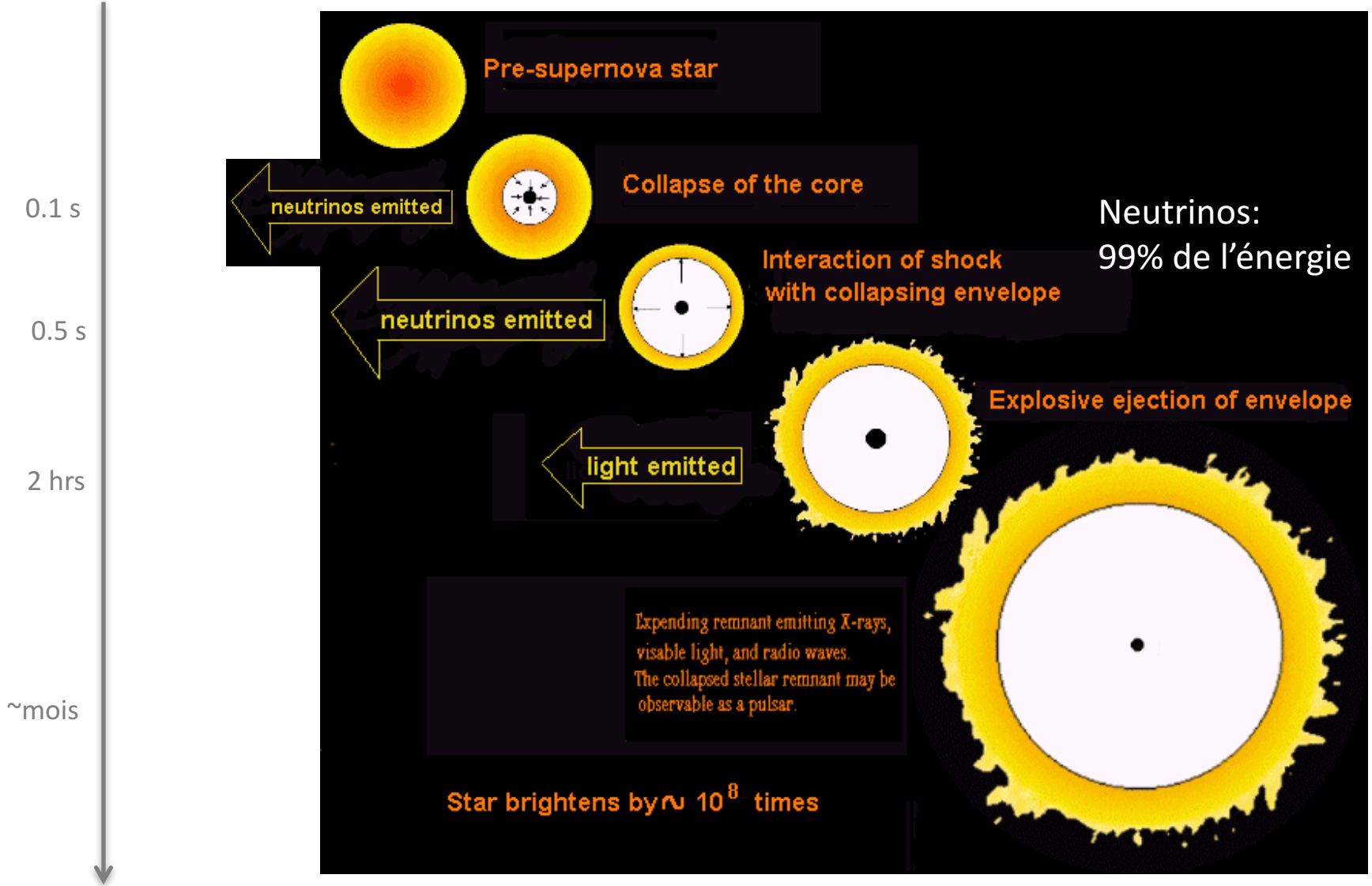


FIG. 2. The time sequence of events in a 45-sec interval centered on 07:35:35 UT, 23 February 1987. The vertical height of each line represents the relative energy of the event. Solid lines represent low-energy electron events in units of the number of hit PMT's, N_{hit} (left-hand scale). Dashed lines represent muon events in units of the number of photoelectrons (right-hand scale). Events $\mu 1-\mu 4$ are muon events which precede the electron burst at time zero. The upper right figure is the 0-2-sec time interval on an expanded scale.

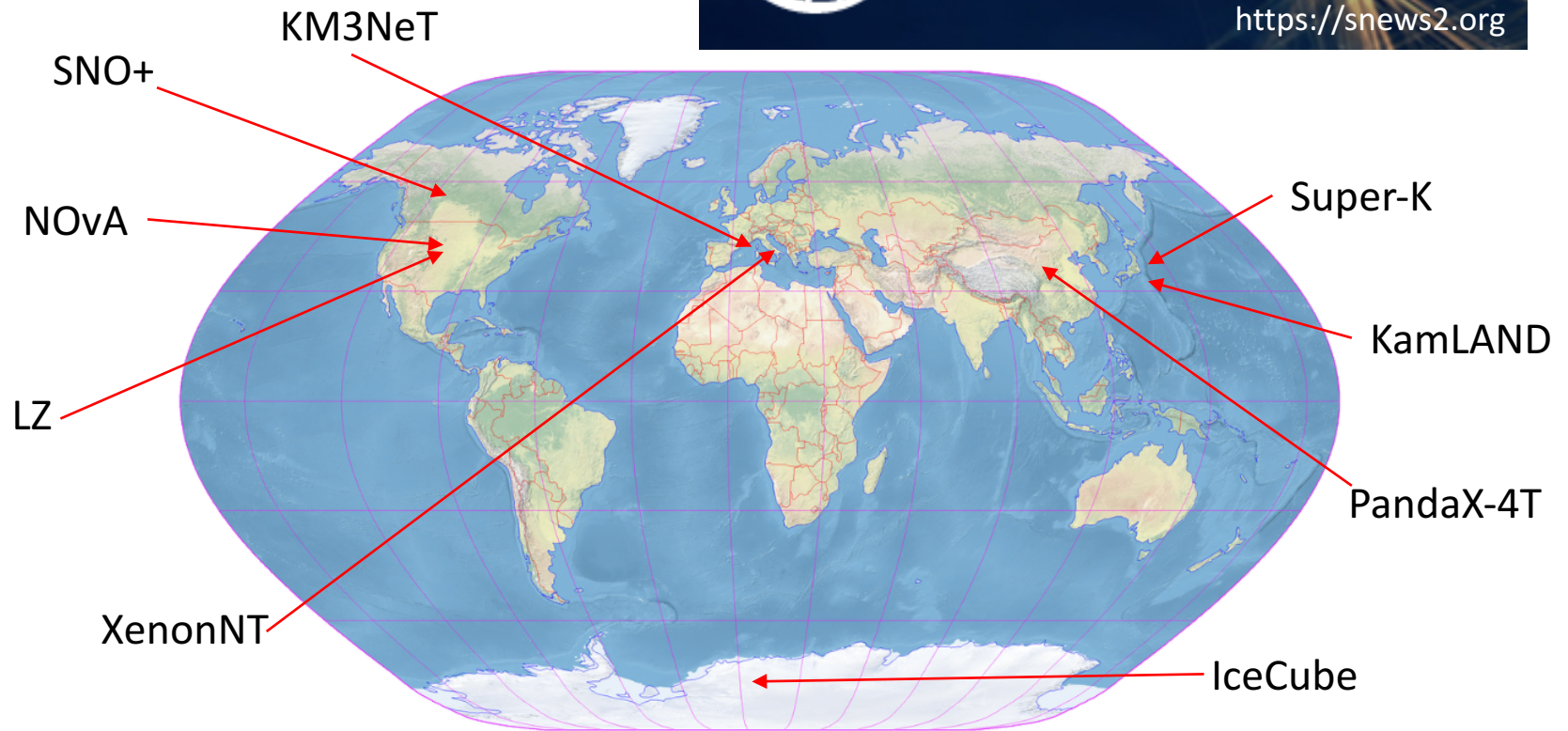
➤ 10 interactions en 10 secondes !

Neutrinos de SuperNovae

temps



En attendant la prochaine SuperNova...



If you are interested in being notified about the occurrence of a neutrino burst from SNEWS, please [sign up for our alert list](#).

Les neutrinos, messagers de la vie et de la mort des étoiles

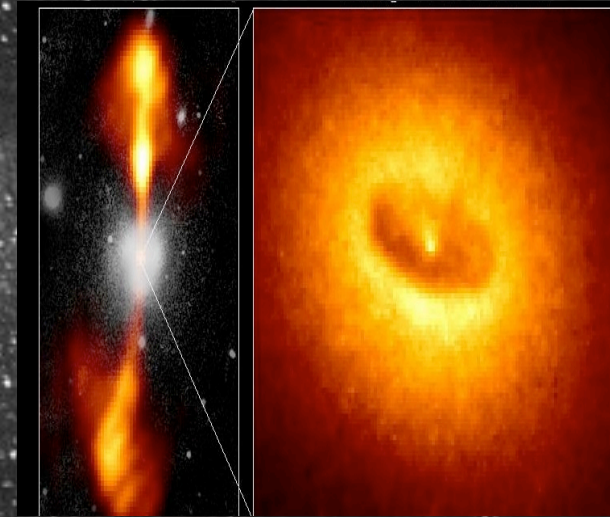
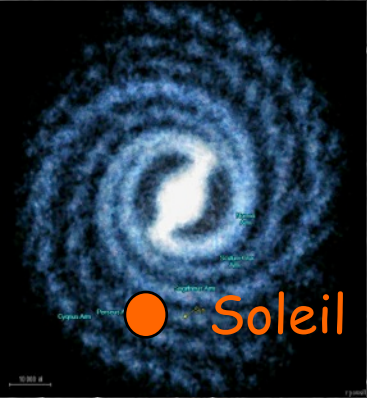


NOBEL PRIZE FOR PHYSICS 2002
one half jointly to Raymond Davis Jr.
and Masatoshi Koshiba *"for pioneering
contributions to astrophysics, in particular
for the detection of cosmic neutrinos"*



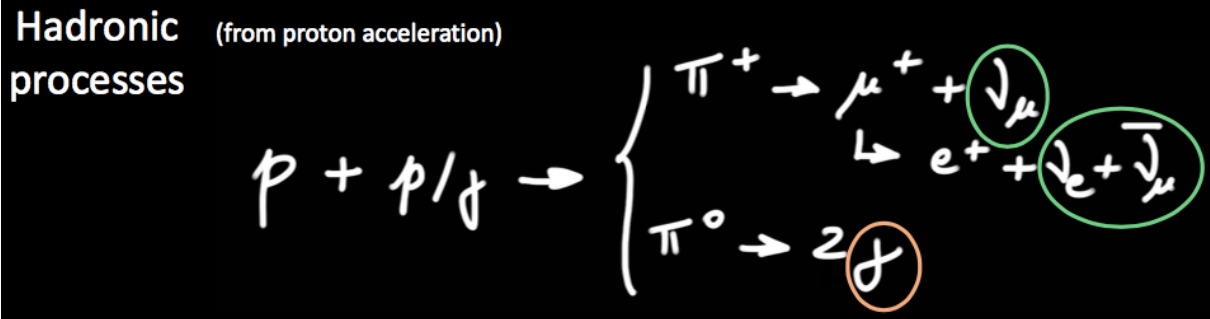
Encore plus loin...

Voie lactée

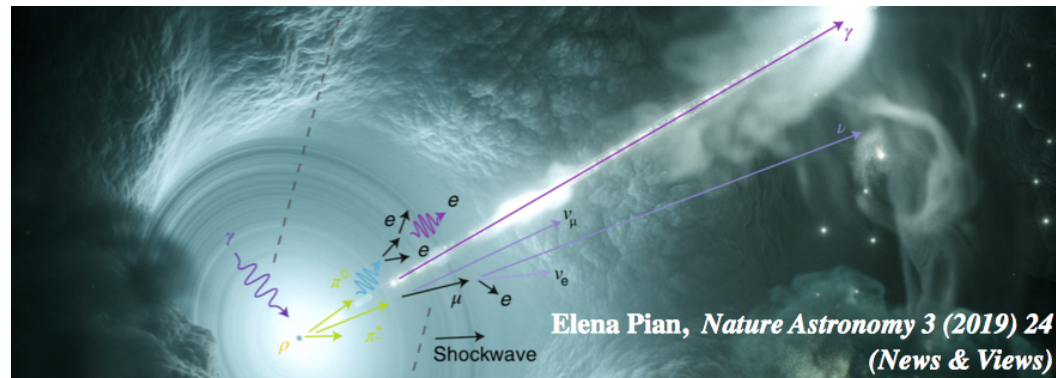


Neutrinos de très haute énergie

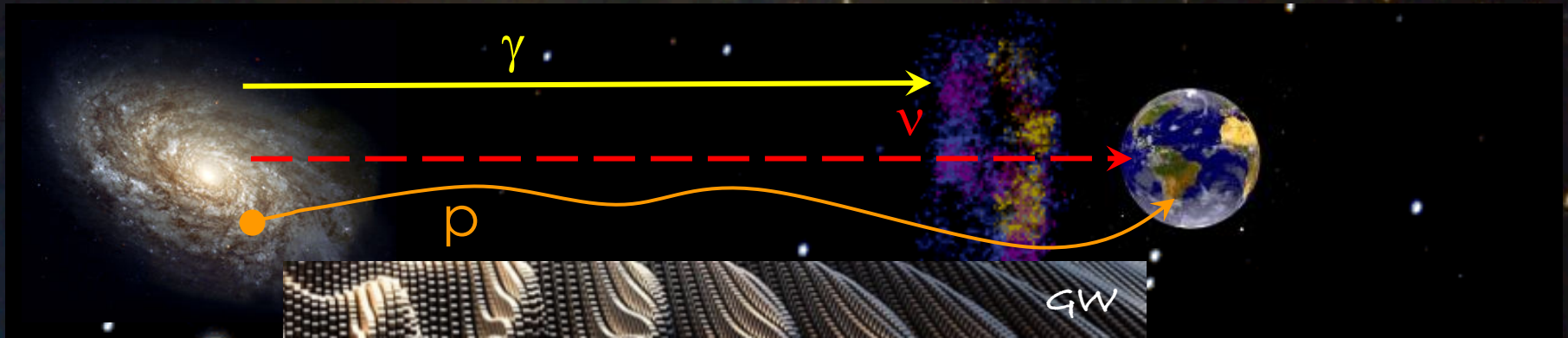
- Sources astrophysiques : Active Galactic Nuclei (AGN), Gamma Ray Bursts (GRB), Star Burst Galaxies...
- Interactions de protons accélérés



G. De Wasseige
ICHEP2022



Neutrinos, new messengers of the Universe



Astronomie multi-messagers



KM3NeT

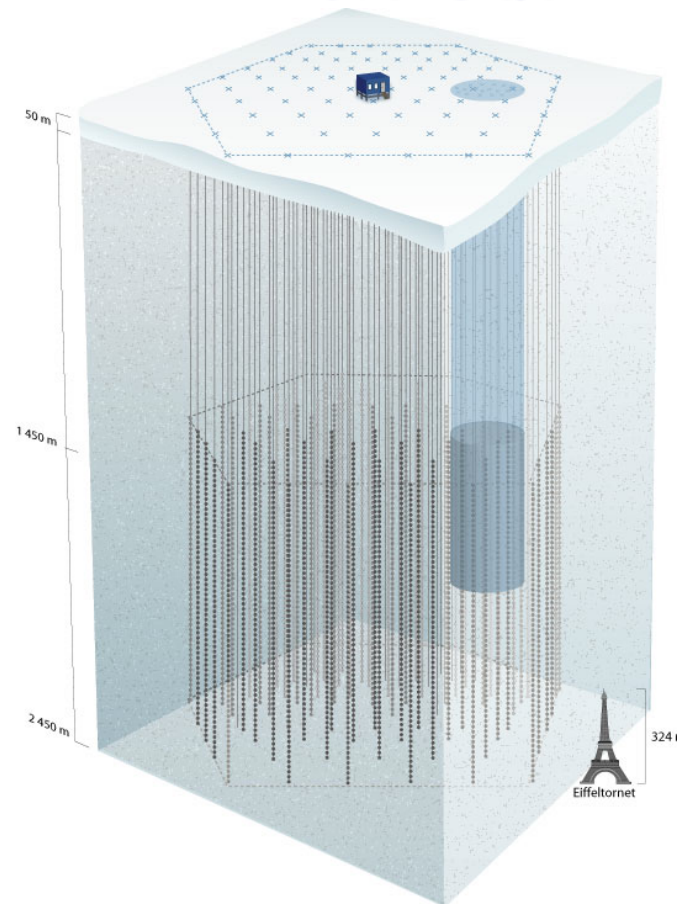
Observing the sky deep underwater (mer Méditerranée)

Télescopes à neutrinos



Mer Méditerranée

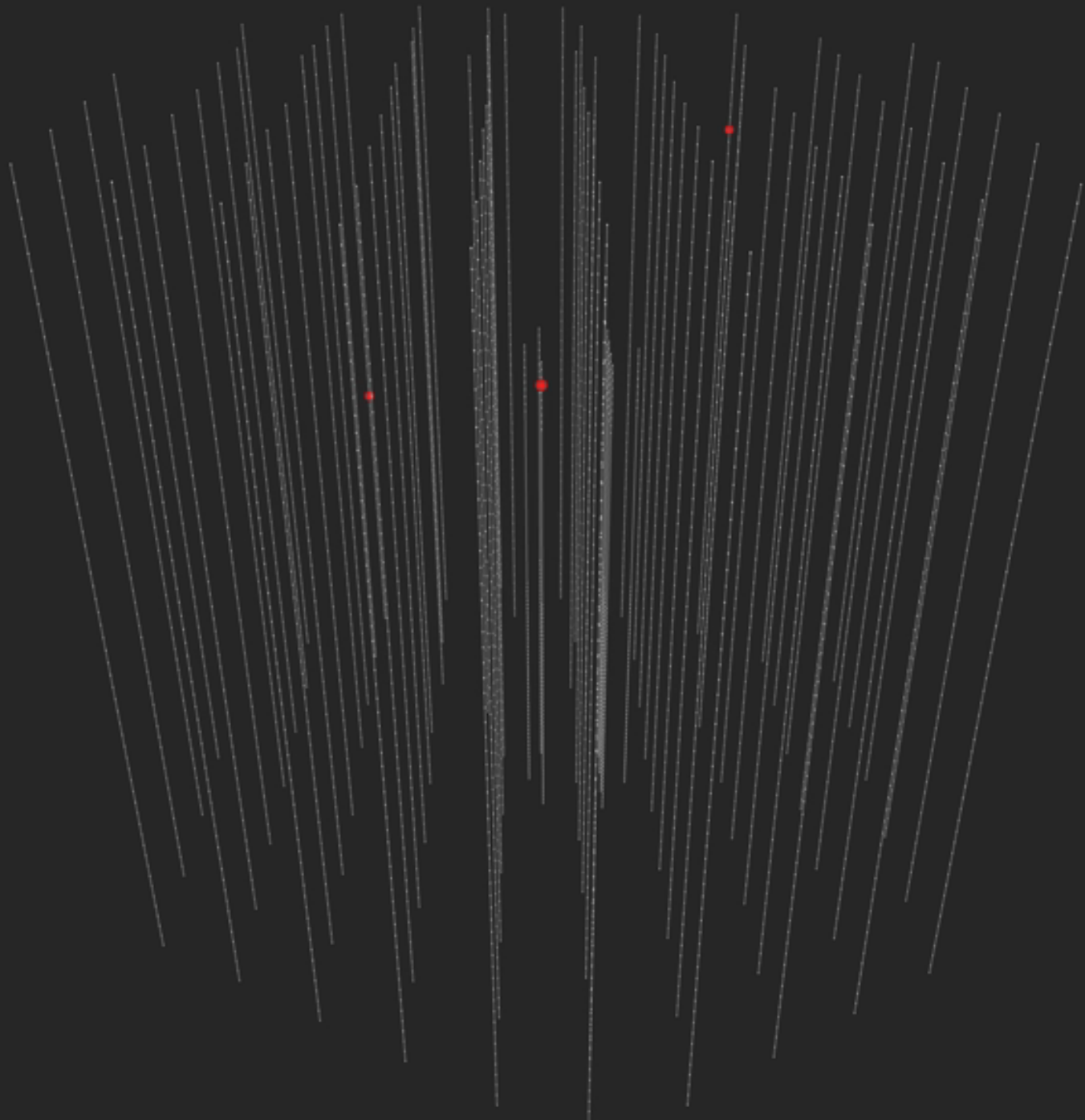
IceCube
Pôle Sud



IceCube

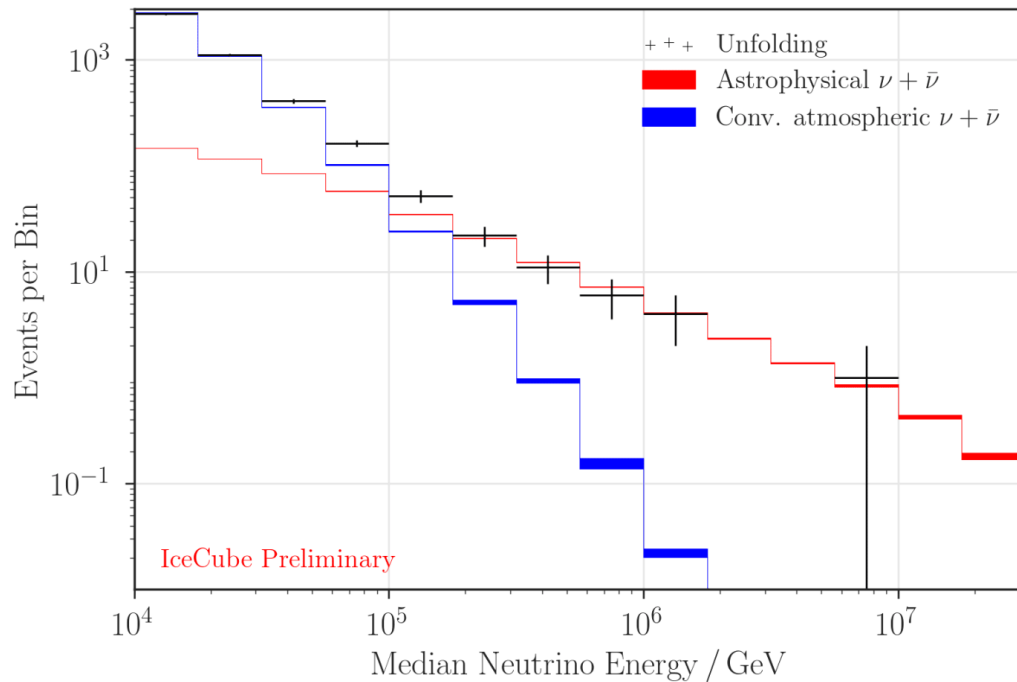
Modules optiques d'IceCube



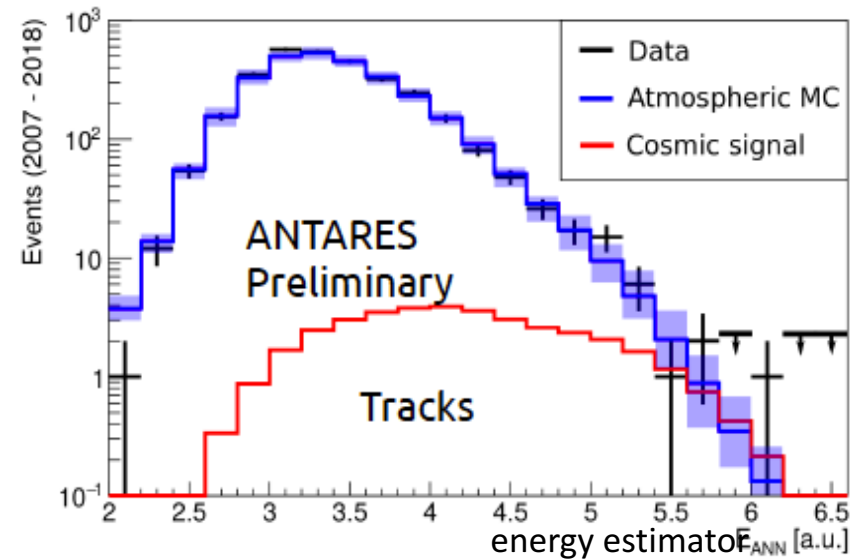


"Neutrino astronomy"

IceCube (7 ans)

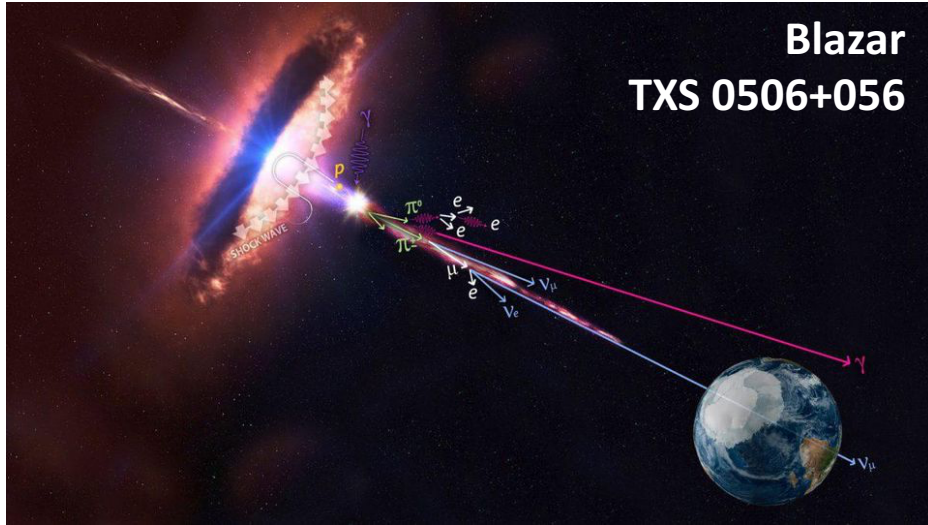


ANTARES (11 ans)

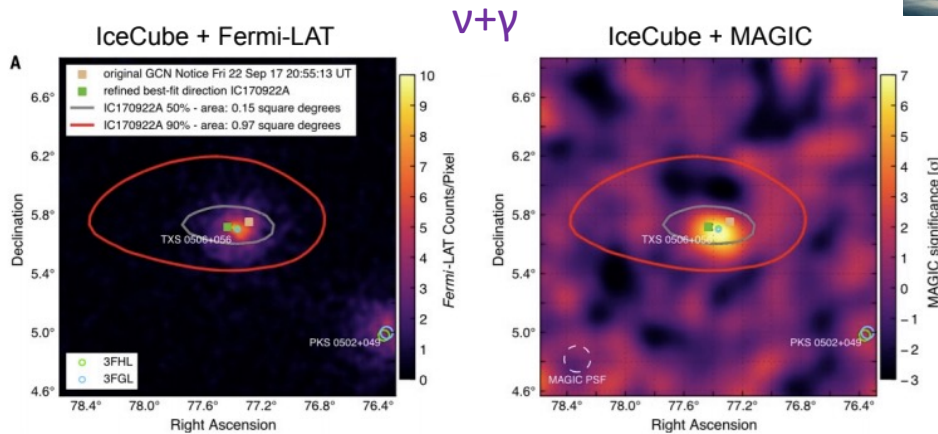
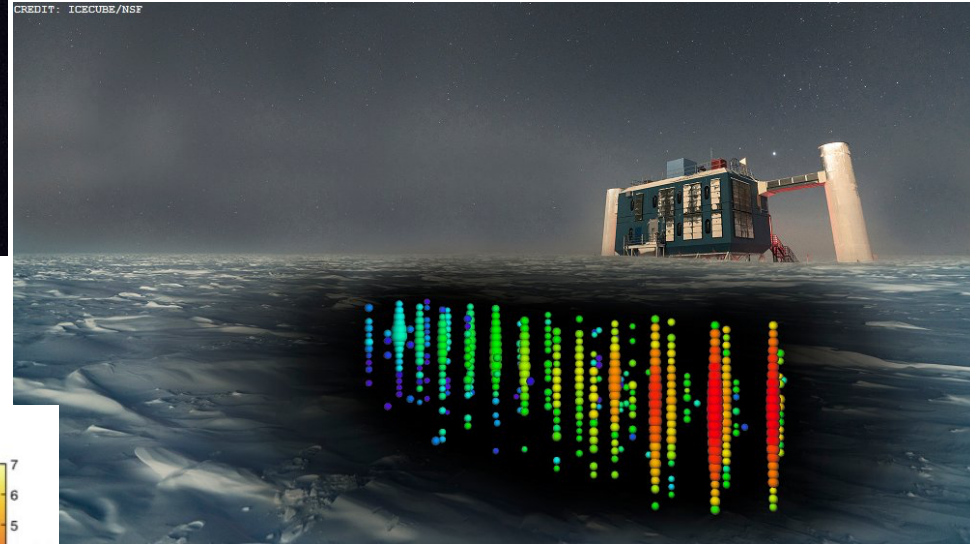


Astronomie multimessagers

Blazar
TXS 0506+056



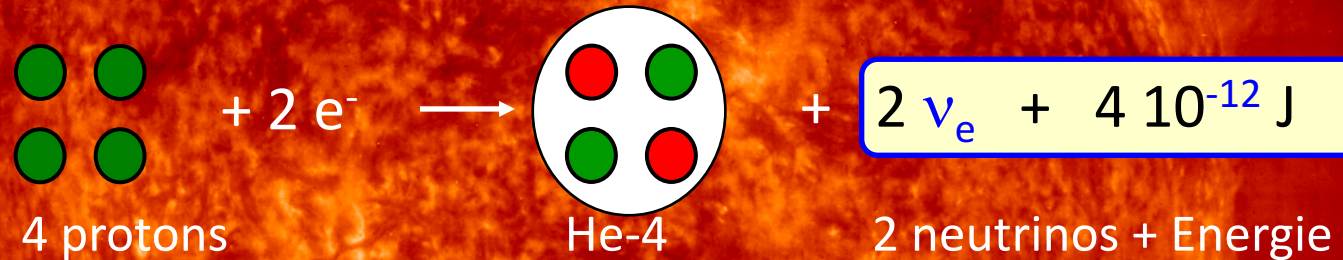
22 September 2017
IceCube-170922A



Localisation de la source

G. De Wasseige
ICHEP2022

Retour dans le soleil...



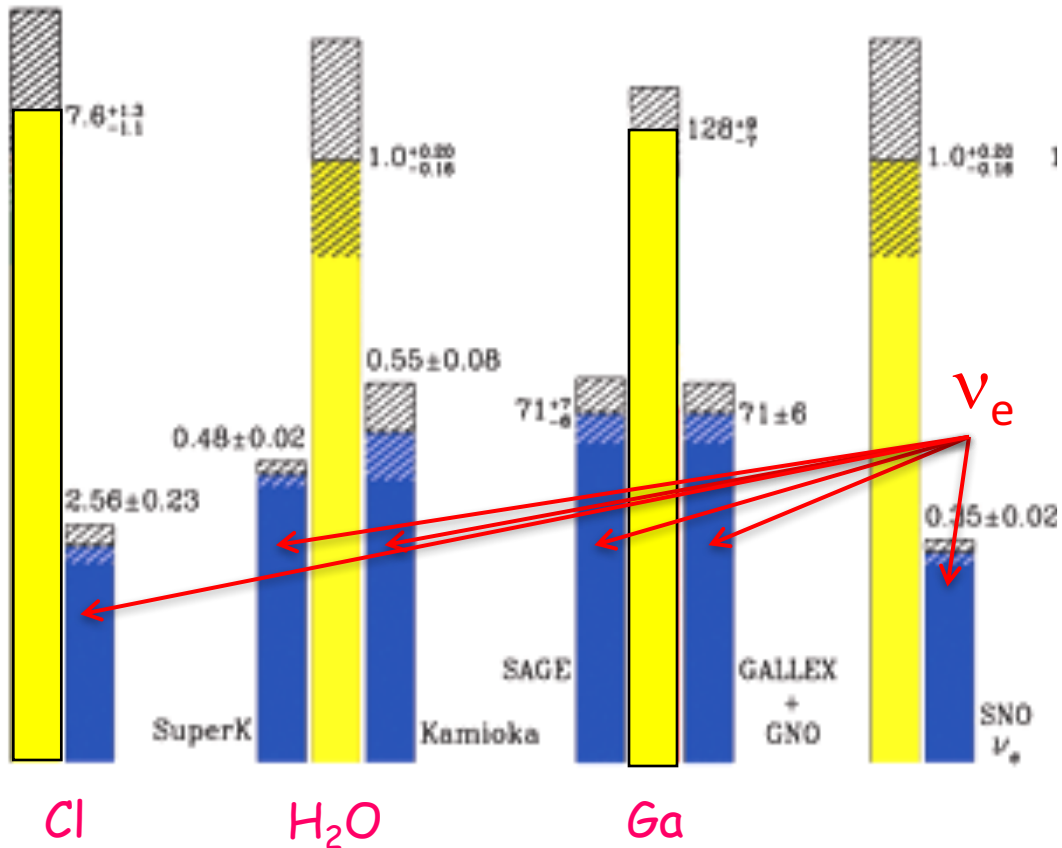
Flux des neutrinos solaires sur Terre :

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

$3,8 \cdot 10^{26} \text{ W}$
 $4 \cdot 10^{-12} \text{ J}$
 $1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$

$6.5 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Neutrinos solaires : mesures ■ et prévisions ■



THE PUZZLE...

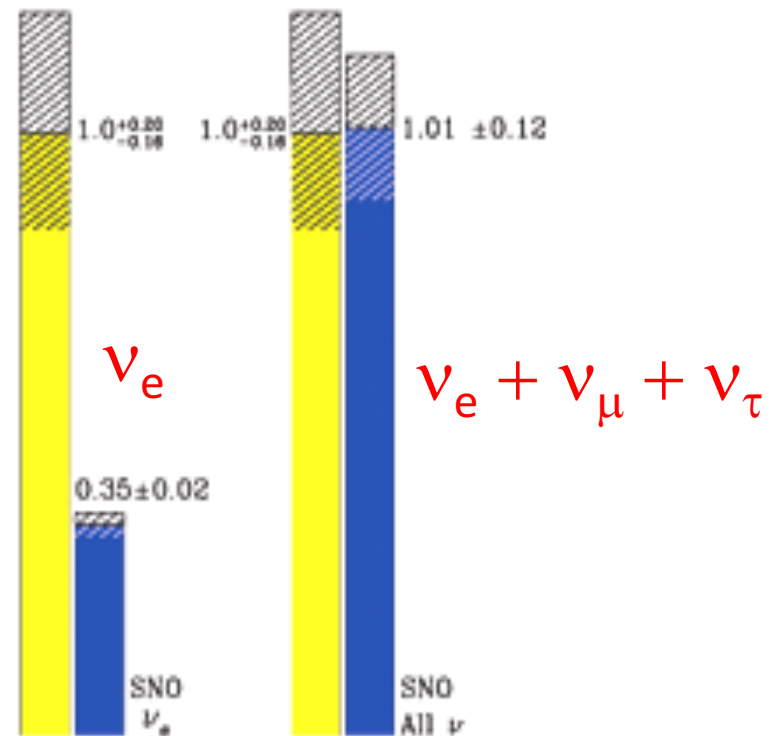
SNO (2022)

Neutrinos solaires : mesures ■ et prévisions ■

1. Preuve que les neutrinos (ν_e) se manifestent différemment (ν_μ ou ν_τ) après la propagation

2. Preuve des modèles solaires

The solution to the puzzle:
oscillation $\nu_e \rightarrow \nu_{\mu,\tau}$



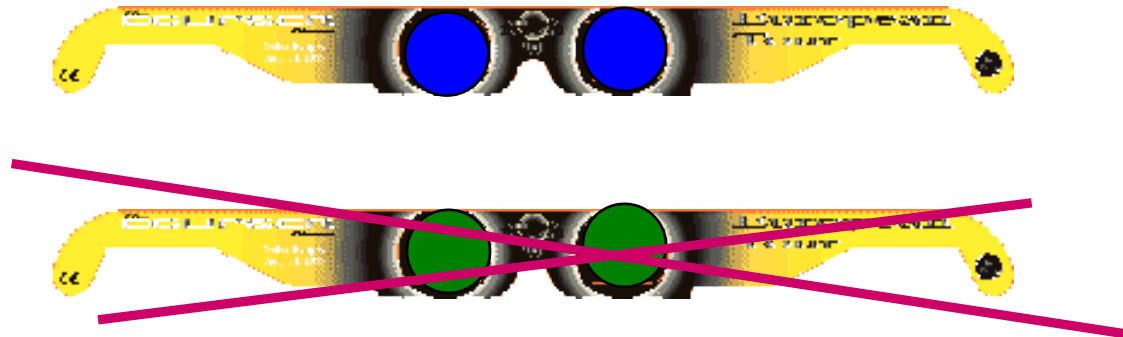
SNO (2002)

L'enigme des neutrinos solaires explique par les oscillations

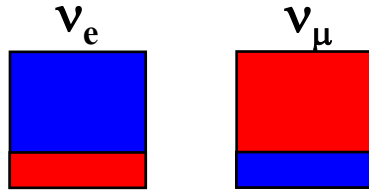
- Les neutrinos se manifestent avec différentes saveurs le long de leur chemin



- Mais, avant SNO, nos détecteurs n'étaient sensibles qu'à la saveur de départ !

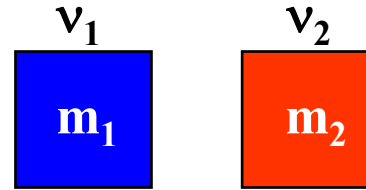


Les oscillations des neutrinos



Etats propres de saveur
(interaction)

≠

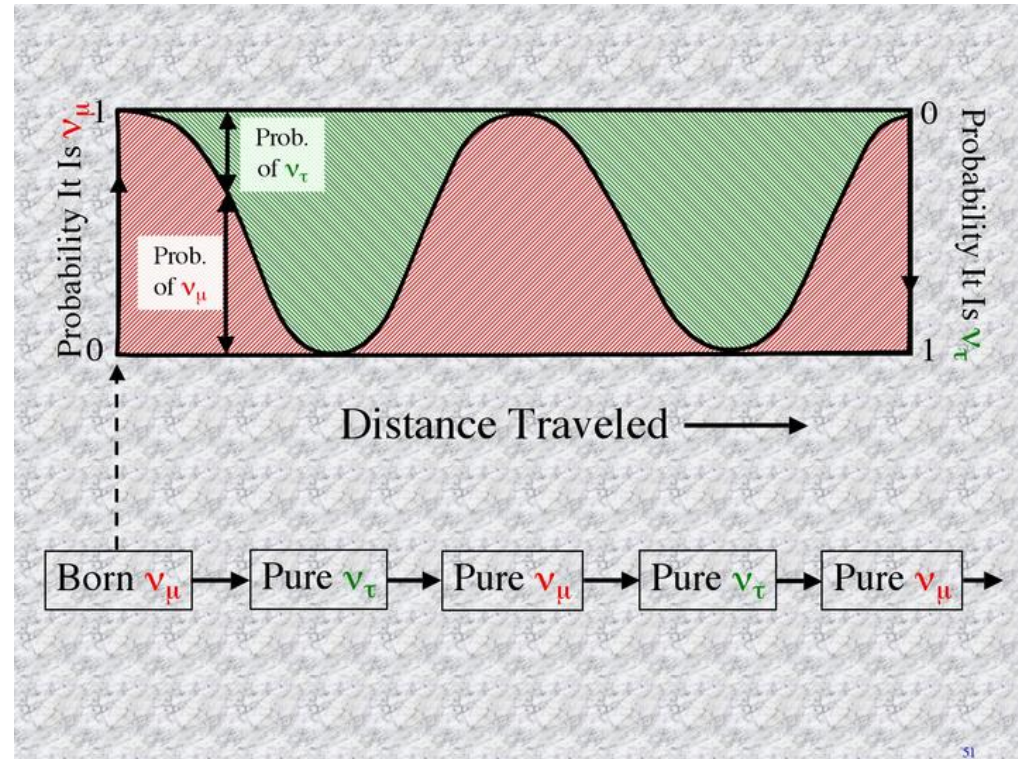


Etats propres de masse
(propagation)

$$P(\nu_i \rightarrow \nu_j) = \sin^2(2\theta) \cdot \sin^2\left(\pi \cdot L(m) \frac{\Delta m^2 (eV^2)}{2.5 E_\nu (MeV)}\right)$$

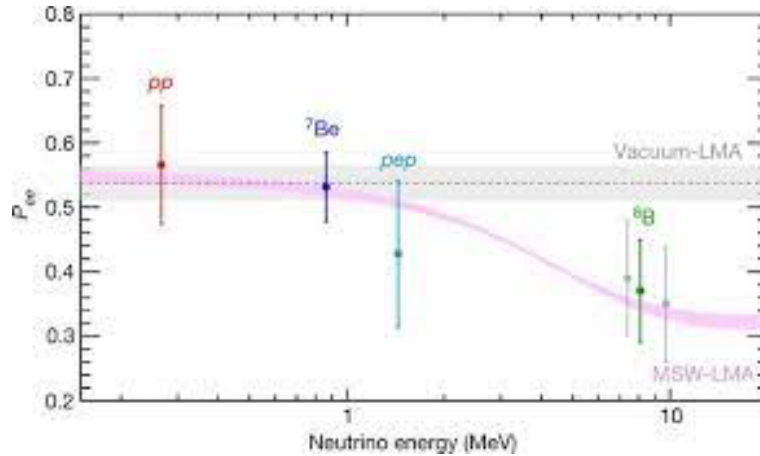
Angle de mélange

Différence de masse

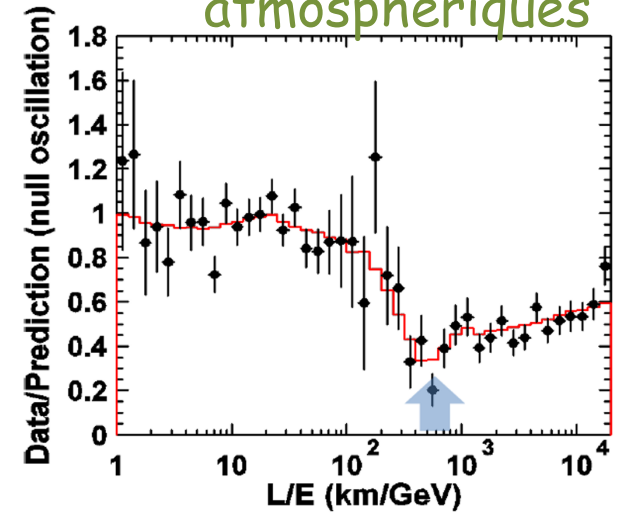


Les oscillations des neutrinos

solaires



atmosphériques



de réacteur

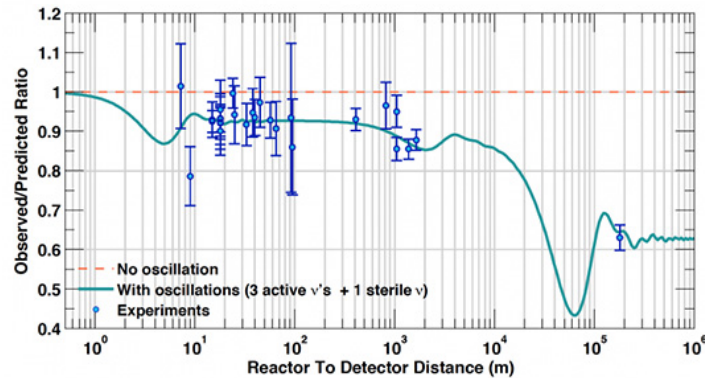
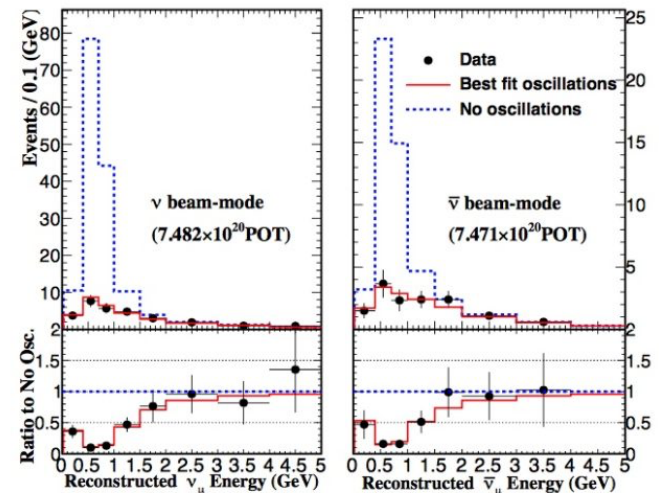


Figure 1: Ratio of the observed electron antineutrino flux to the prediction versus distance between reactor and detector. The experimental data are better described when an additional neutrino is introduced (blue curve). (Image source: <http://irfu.cea.fr>)

d'accélérateur

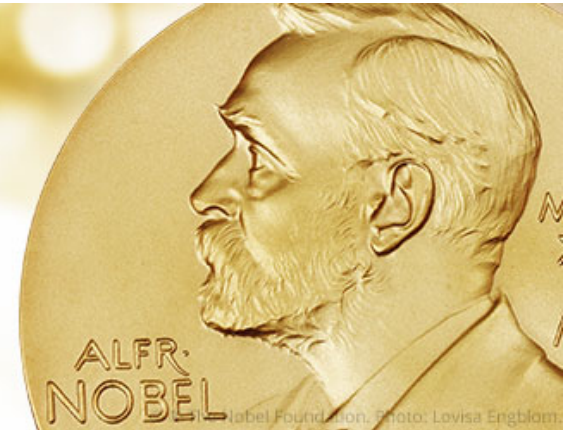


Les oscillations des neutrinos

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Takaaki Kajita
Arthur B. McDonald



Les neutrinos oscillent => ont une masse



Ill: N. Elmehed. © Nobel Media 2015

2015 Nobel Prize in Physics

The [Nobel Prize in Physics 2015](#) was awarded jointly to [Takaaki Kajita](#) and [Arthur B. McDonald](#) "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass".

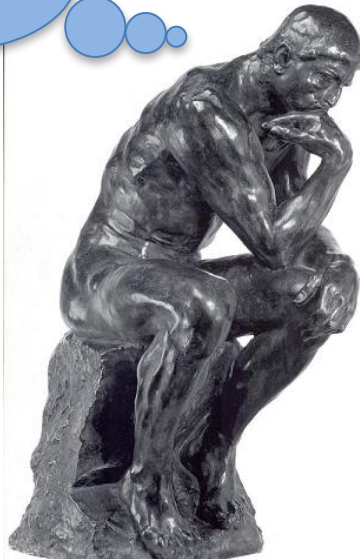
Mais alors... nous savons tout ?

Neutrinos et anti-neutrinos se comportent de la même façon ?

Si non, pouvons-nous comprendre la différence entre matière et anti-matière dans l'Univers ... ?

Quel neutrino est le plus lourd ?

3 ou plus ?



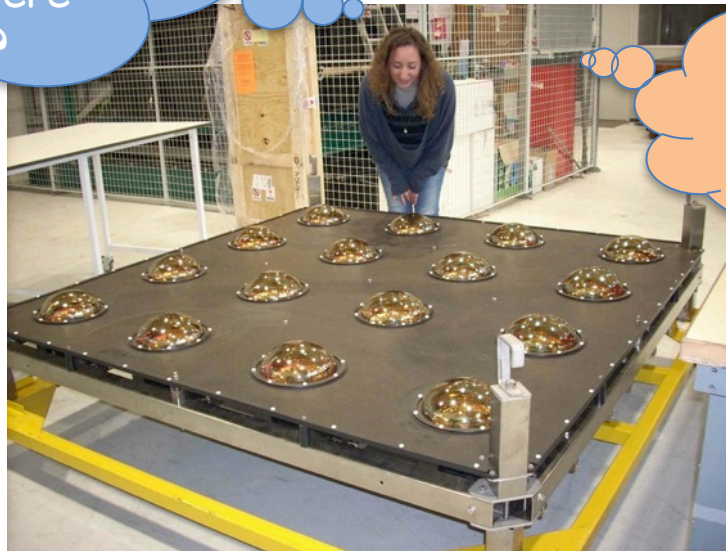
Mais alors... nous savons tout ?

Neutrinos et anti-neutrinos se comportent de la même façon ?

Si non, pouvons-nous comprendre la différence entre matière et anti-matière dans l'Univers ... ?

Quel neutrino est le plus lourd ?

3 ou plus ?



Les Neutrinos

- Sont difficiles à piéger
- Sont des messagers uniques de leurs sources
 - le Soleil, les étoiles, l'Univers...
- Sont des particules un peu spéciales
- Ont encore des secrets

Ressources

Livres



Exposition "À la poursuite des neutrinos" (CEA/CNRS)

<https://www.cea.fr/comprendre/enseignants/Pages/ressources-pedagogiques/expositions/expo-neutrinos.aspx>

"Outreach" des expériences / laboratoires internationaux

- IceCube <https://icecube.wisc.edu/outreach/neutrinos/>
- KM3Net <https://www.km3net.org/km3net-infradev/outreach-material/>
- Fermilab (USA) <https://neutrinos.fnal.gov>



Activités

Réalité virtuelle ou augmentée pour se rendre à l'intérieur d'un détecteur

<http://venu.physics.ox.ac.uk>

<https://apps.apple.com/fr/app/km3net/id1508583421>

<https://www.oculus.com/experiences/rift/1127966500660373/>

<http://www.cherenkov.nl>

<https://icecube.wisc.edu/outreach/interactive-experiences/>

Masterclass

analyse de données et discussion avec chercheurs et autres étudiants à l'étranger

<https://masterclass.icecube.wisc.edu/fr>

La Masterclass d'IceCube

Votre premier jour en tant que vrai chercheur

La dixième édition de la Masterclass d'IceCube aura lieu en mars et avril 2023.

"Dessine-moi un neutrino"

<https://www.km3net.org/draw-me-a-neutrino/>



Les oscillations des neutrinos

C. Giunti

Fields $\nu_{\alpha L} = \sum_k U_{\alpha k} \nu_{kL} \implies |\nu_{\alpha}\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle$ States

initial flavor: $\alpha = e \text{ or } \mu \text{ or } \tau$

$$|\nu_k(t, x)\rangle = e^{-iE_k t + ip_k x} |\nu_k\rangle \implies |\nu_{\alpha}(t, x)\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t + ip_k x} |\nu_k\rangle$$

$$|\nu_k\rangle = \sum_{\beta=e,\mu,\tau} U_{\beta k} |\nu_{\beta}\rangle \implies |\nu_{\alpha}(t, x)\rangle = \sum_{\beta=e,\mu,\tau} \underbrace{\left(\sum_k U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t + ip_k x} U_{\beta k} \right)}_{\mathcal{A}_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}(t, x)} |\nu_{\beta}\rangle$$

$$\mathcal{A}_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}(0, 0) = \sum_k U_{\alpha k}^* U_{\beta k} = \delta_{\alpha\beta} \quad \mathcal{A}_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}(t > 0, x > 0) \neq \delta_{\alpha\beta}$$

$$P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}(t, x) = |\mathcal{A}_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}(t, x)|^2 = \left| \sum_k U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t + ip_k x} U_{\beta k} \right|^2$$

ultra-relativistic neutrinos $\implies t \simeq x = L$ source-detector distance

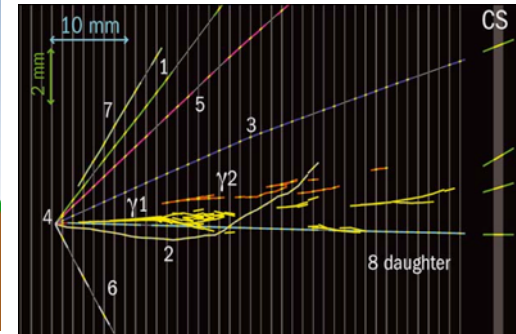
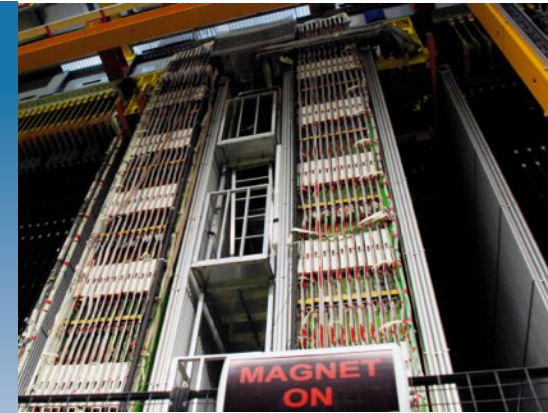
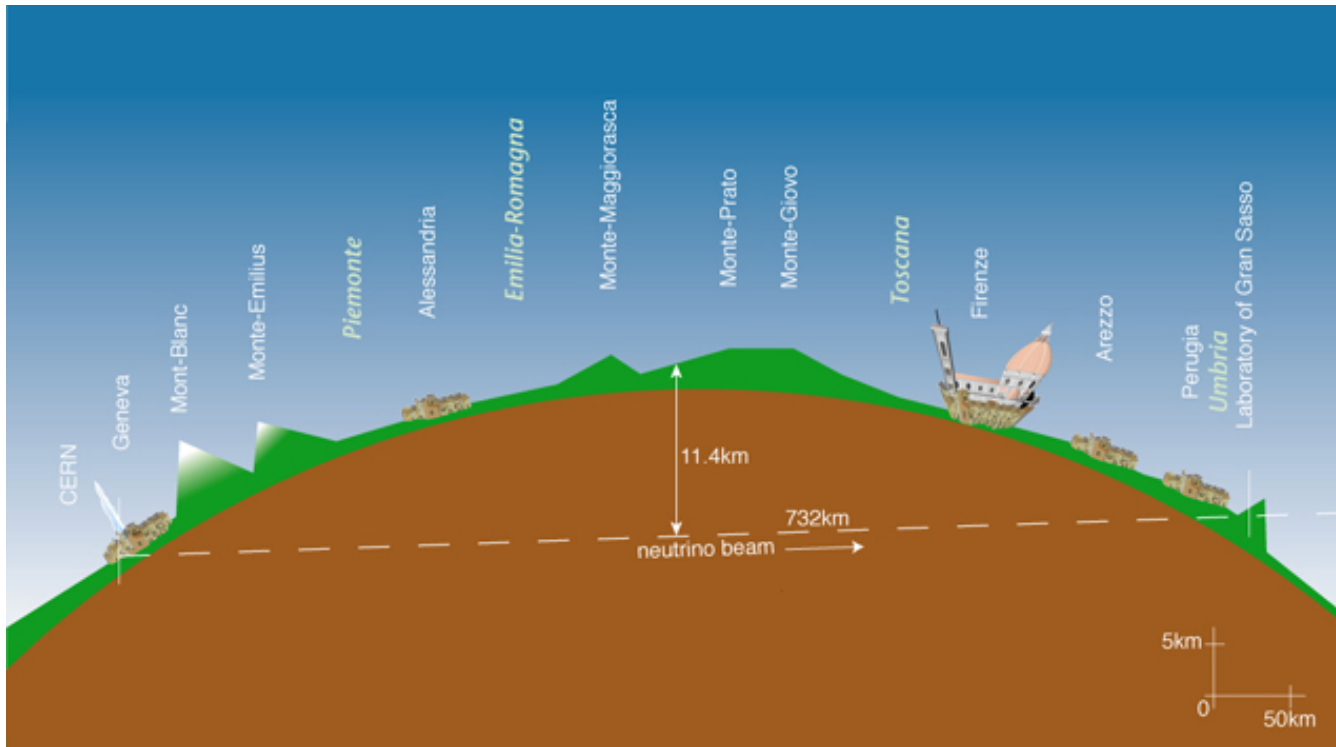
$$E_k t - p_k x \simeq (E_k - p_k) L = \frac{E_k^2 - p_k^2}{E_k + p_k} L = \frac{m_k^2}{E_k + p_k} L \simeq \frac{m_k^2}{2E} L$$

$$\begin{aligned} P_{\nu_{\alpha} \rightarrow \nu_{\beta}}(L, E) &= \left| \sum_k U_{\alpha k}^* e^{-im_k^2 L/2E} U_{\beta k} \right|^2 \\ &= \sum_{k,j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E}\right) \end{aligned}$$

$$\Delta m_{kj}^2 = m_k^2 - m_j^2$$

Les oscillation des neutrinos : évidence directe

CNGS: a neutrino beam from CERN to Gran Sasso



CERN:
 ν_μ produced



OPERA:
 ν_τ detected