

Sources de neutrinos et interactions

École de physique Subatomique de printemps - Subatech

Mathieu BONGRAND
mathieu.bongrand@in2p3.fr

22 mai 2025



Table des matières

Interactions des neutrinos

- L'interaction faible dans le Modèle Standard

- Les trois saveurs de neutrinos

- Les interactions des neutrinos

Sources de neutrinos

- Neutrinos solaires

- Neutrinos de supernova

- Neutrinos atmosphériques

- Neutrinos de réacteur nucléaire

- Neutrinos astrophysiques

Table des matières

Interactions des neutrinos

- L'interaction faible dans le Modèle Standard

- Les trois saveurs de neutrinos

- Les interactions des neutrinos

Sources de neutrinos

- Neutrinos solaires

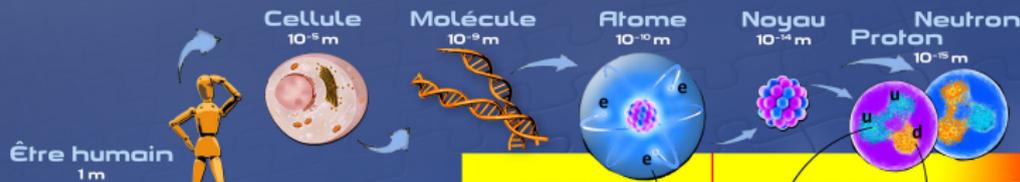
- Neutrinos de supernova

- Neutrinos atmosphériques

- Neutrinos de réacteur nucléaire

- Neutrinos astrophysiques

Composants élémentaires de la matière



Être humain
1m

Terre
10⁷ m

Soleil
10⁹ m

Galaxie
10²¹ m

	LEPTONS		QUARKS		BOSON de HIGGS H
1^{re} famille Constituants de la matière usuelle	ν_e neutrino électronique $m = 2.3 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	e électron $m = 0.511$ GeV/c ²	u haut / up $m = 2.3$ GeV/c ²	d bas / down $m = 4.8$ GeV/c ²	Le boson de Higgs est la manifestation du champ de Higgs. Par son interaction avec les constituants élémentaires de la matière, ce champ est responsable de leur masse. Il provoque aussi la séparation entre interactions électromagnétique et faible.
2^e famille Réplique plus massive de la 1 ^{re} famille	ν_μ neutrino muon $m = 2.2 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	μ muon $m = 0.106$ GeV/c ²	c charm / charm $m = 1.273$ GeV/c ²	s étrange / strange $m = 0.5$ GeV/c ²	
3^e famille Réplique plus massive des 1 ^{re} et 2 ^e familles	ν_τ neutrino tau $m = 2.3 \cdot 10^{-36}$ GeV/c ²	τ tau $m = 1.777$ GeV/c ²	t top $m = 173.2$ GeV/c ²	b beau / beauty / bottom $m = 4.2$ GeV/c ²	

INTERACTIONS FONDAMENTALES



Chaque interaction fondamentale est transmise par des **particules** qui lui sont associées

Bosons Z, W[±]	Désintégrations radioactives (β ⁻ et β ⁺) de certains noyaux instables
Photon γ	Électricité, magnétisme, cohésion des atomes et des molécules, chimie
Gluons g	Cohésion des protons, des neutrons et des noyaux, énergie nucléaire
Graviton (?)	Gravité, pesantier, système solaire, galaxies

Chacune des quatre interactions fondamentales joue un rôle dans le fonctionnement des étoiles qui peuplent les galaxies, et en particulier du Soleil :

- la gravitation permet la formation des étoiles à partir de nuages de gaz ;
- les interactions faible et forte interviennent lors des réactions de fusion nucléaire ;
- l'interaction électromagnétique est liée à la production de lumière.



Antiproton

ANTIMATIÈRE

À chaque particule correspond une antiparticule. Leurs caractéristiques physiques sont quasiment identiques. Une particule et son antiparticule ont la même masse, mais des charges opposées.

Les bosons W^\pm

La masse des bosons W^\pm est très grande :

$$m_W = 80.3692 \pm 0.0133 \text{ GeV}$$

D'après leur **largeur** Γ_W de décroissance :

$$\Gamma_W = 2.085 \pm 0.042 \text{ GeV},$$

les bosons W^\pm ont une durée de vie très courte :

$$\begin{aligned}\tau_W &= \hbar / \Gamma_W \\ &= \frac{h [J][s]}{2\pi \times e [J][eV]^{-1} \times \Gamma [eV]} \\ &= \frac{6.626 \times 10^{-34}}{2\pi \times 1.602 \times 10^{-19} \times 2.085 \times 10^9} \\ &= 3.157 \times 10^{-25} \text{ s}\end{aligned}$$

La **portée** de l'interaction faible est donc réduite ($\sim 10^{-17}$ m).

La désintégration bêta

Par rapport à la théorie de Fermi, la description moderne de la désintégration bêta fait intervenir les quarks et les bosons W^\pm .

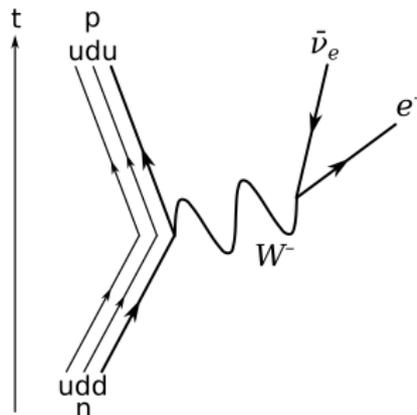


Diagramme de Feynman représentant une désintégration β^- dans la théorie du Modèle Standard.

La saveur d'un neutrino est déterminée à partir du lepton chargé qui l'accompagne lors de sa création ou de son interaction

Le boson Z^0

La masse du boson Z^0 est très grande :

$$m_Z = 91.1880 \pm 0.0020 \text{ GeV}$$

D'après sa **largeur** Γ_Z de décroissance :

$$\Gamma_Z = 2.4955 \pm 0.042 \text{ GeV}$$

le boson Z^0 a une durée de vie très courte :

$$\begin{aligned}\tau_Z &= \hbar / \Gamma_Z \\ &= \frac{h [J][s]}{2\pi \times e [J][eV]^{-1} \times \Gamma [eV]} \\ &= \frac{6.626 \times 10^{-34}}{2\pi \times 1.602 \times 10^{-19} \times 2.4955 \times 10^9} \\ &= 2.638 \times 10^{-25} \text{ s}\end{aligned}$$

La **portée** de l'interaction faible est donc réduite ($\sim 10^{-17}$ m).

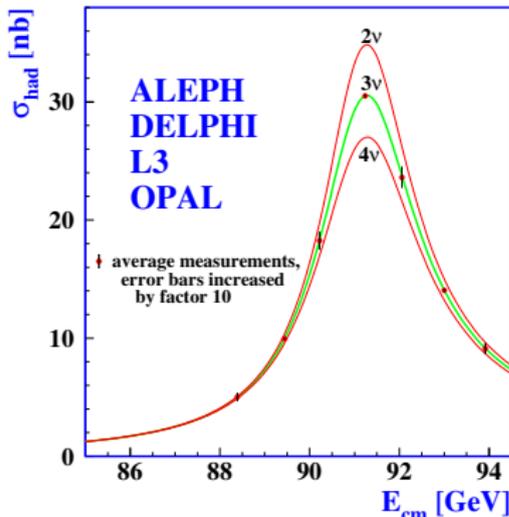
Les trois saveurs des neutrinos

La mesure des désintégrations du Z^0 au collisionneur LEP (e^+e^-) du CERN a prouvé qu'il n'existait que trois saveurs de neutrinos.

La largeur de désintégration du Z^0 vers le canal *invisible*, les neutrinos $Z^0 \rightarrow \nu\bar{\nu}$. Il s'agit d'une courbe de **résonances** qui représente un pic centré sur la masse de la particule et dont la largeur représente l'inverse de sa durée de vie.

Z DECAY MODES

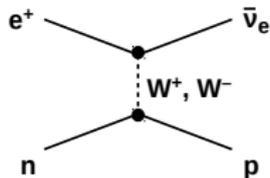
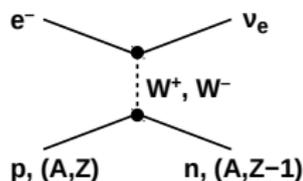
Mode	Fraction (Γ_i / Γ)	Scale factor/ Conf. Level	P(MeV/c)
Γ_1	e^+e^-	(3.3622 ± 0.0042)%	45594
Γ_2	$\mu^+\mu^-$	(3.3682 ± 0.0006)%	45594
Γ_3	$e^+\mu^-$	(3.3696 ± 0.0083)%	45559
Γ_4	$e^+\tau^-$	0%	(3.3638 ± 0.0023)%
Γ_5	$\mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$		45593
Γ_6	$e^+\tau^-\tau^+\tau^-$	0%	(4.55 ± 0.17) × 10 ⁻⁴
Γ_7	invisible	(30.000 ± 0.005)%	
Γ_8	hadrons	(69.311 ± 0.056)%	
Γ_9	$(s\bar{s} + c\bar{c})/2$	(11.6 ± 0.6)%	
Γ_{10}	$(d\bar{d} + u\bar{u} + b\bar{b})/3$	(15.6 ± 0.4)%	
Γ_{11}	$c\bar{c}$	(12.03 ± 0.31)%	
Γ_{12}	$b\bar{b}$	(15.12 ± 0.49)%	



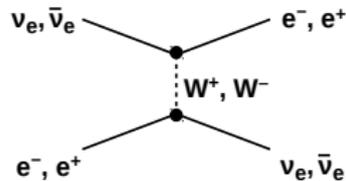
Les interactions des neutrinos

Pour détecter un neutrino, il faut considérer sa saveur (e, μ, τ), son énergie et le messager de l'interaction (bosons Z^0 ou W^\pm).

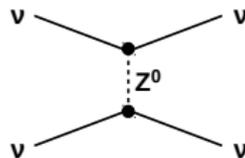
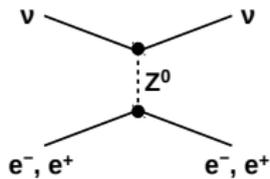
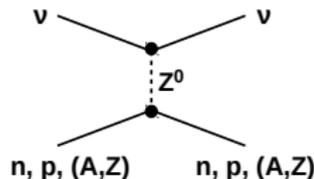
CC β -processes



CC scattering process



NC scattering processes ($\nu = \nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$)



Interactions des neutrinos par courant chargé (CC) ou courant neutre (NC) [arXiv:1702.08713].

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Les interactions des neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

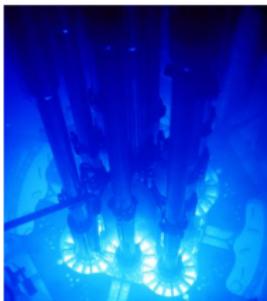
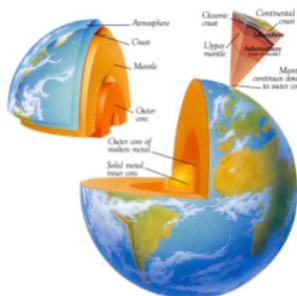
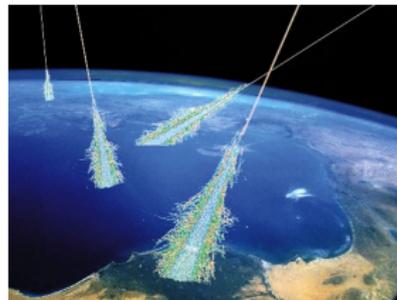
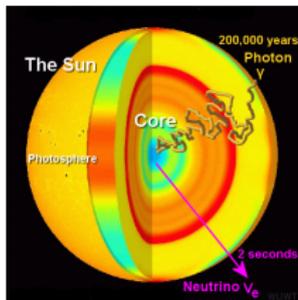
Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

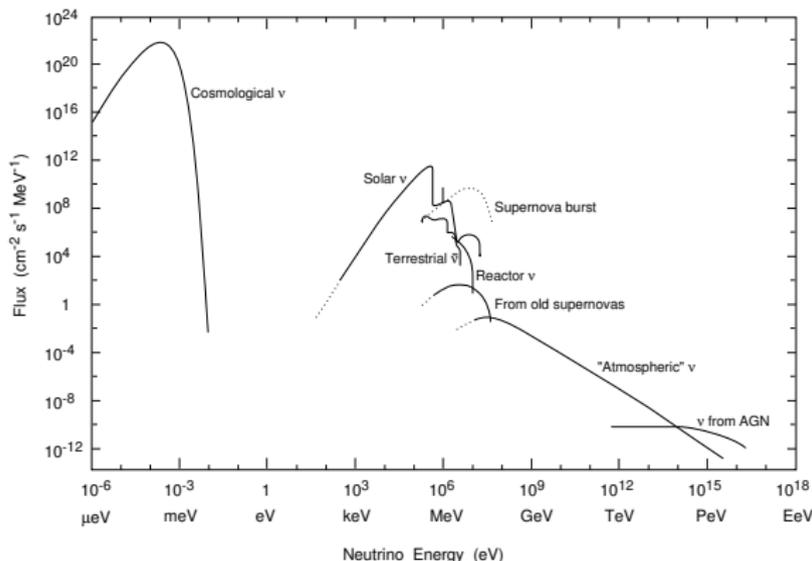
Sources de neutrinos

Après la découverte du neutrino auprès des réacteurs nucléaires, des trois saveurs de neutrinos et des courants de l'interaction faible, les expérimentateurs ont cherché à détecter de nouvelles sources de neutrinos.



Sources variées de neutrinos

Aujourd'hui, nous sommes en mesure de détecter une grande variété de sources de neutrinos, à des énergies et flux très variés.



Flux et énergies des différentes sources de neutrinos détectables sur Terre.

Chaque fois que nous avons détecté des neutrinos d'une nouvelle source, les scientifiques ont eu des surprises !

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Les interactions des neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

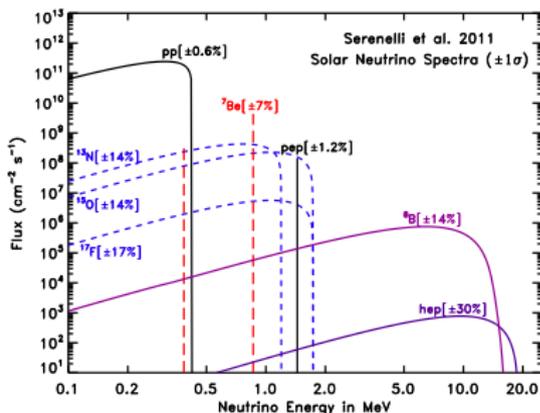
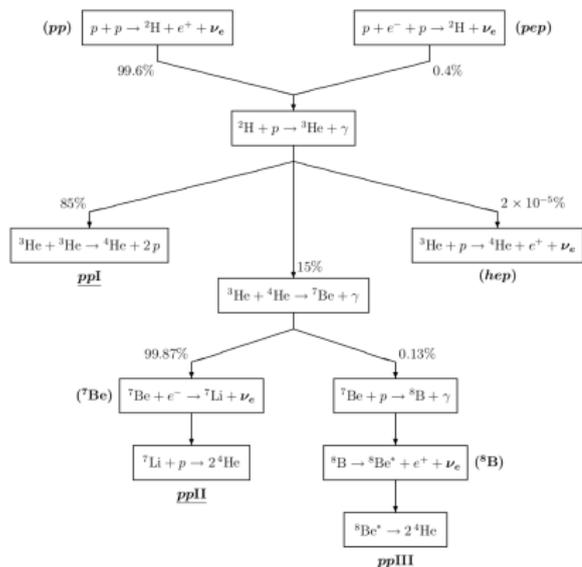
Neutrinos solaires

Dans les années 60, les chercheurs se sont intéressés aux **neutrinos solaires** :

- On commence à comprendre que contrairement à la chaleur de la Terre, le Soleil ne produit pas son énergie à partir de la radioactivité (chaînes ^{238}U , ^{232}Th et ^{40}K).
- Le Soleil produit son énergie grâce à la **fusion thermonucléaire de protons**, qui conduit à la synthèse d'éléments plus lourds.
- Le travail pionnier de J. Bahcall permet de prédire le flux de neutrinos solaires attendus sur Terre et leurs énergies.

Lecture de Franck Close - *Neutrino* - Oxford Press Libri - 2012

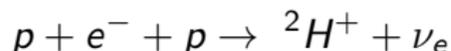
Chaîne de fusion thermonucléaire et neutrinos solaires



Chaîne de fusion thermonucléaire au sein du Soleil produisant des neutrinos.
Flux et énergie des neutrinos correspondants à chaque réaction.

Exercice 1

Exercice 1 : Calculer l'énergie (en eV) des neutrinos produits par la fusion proton-proton avec capture électronique (*pep*) au cœur du Soleil, suivant la réaction :



Données :

$$m_e = 5.485\,799 \times 10^{-4} \, u, \quad m_p = 1.007\,276 \, u,$$

$m_n = 1.008\,665 \, u$ et $M(2, 1) = 2.014\,102 \, u$ étant la masse atomique (noyau + électron).

$$u = 931.494 \, \text{MeV}/c^2$$

Exercice 1 (correction)

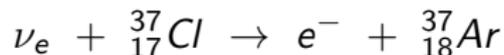
Le noyau produit est très lourd par rapport au neutrino, c'est donc ce dernier qui emportera toute l'énergie Q libérée par la réaction, sous forme d'énergie cinétique.

$$\begin{aligned} Q &= m_p + m_e + m_p - [M(2, 1) - m_e] - m_\nu \\ &= 2 \times 1.007\,276 + 0.000\,548\,6 \text{ u} - 2.014\,102 + 0.000\,548\,6 \text{ u} \\ &= 0.001\,547 \text{ u} \times 931.494 \text{ MeV} \\ &= 1.441 \text{ MeV} \end{aligned}$$

On peut d'ailleurs constater sur la figure précédente un pic en énergie $E_{pep} = 1.441 \text{ MeV}$.

Expérience Chlorine de R. Davis

- R. Davis, avait déjà essayé de détecter les neutrinos auprès d'un réacteur nucléaire, sans savoir qu'il s'agissait d'anti-neutrinos, et que la réaction envisagée était impossible.
- Suivant une proposition de B. Pontecorvo, Davis chercha la réaction des neutrinos sur le chlore :

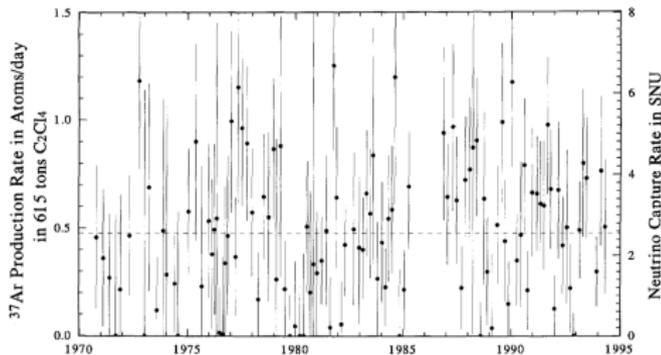


- Davis réunit environ 400 m³ de C₂Cl₄ et construisit l'expérience Chlorine dans la mine à Homestake.
- L'argon produit étant un gaz rare, il peut être extrait par bullage d'hélium dans le détecteur.
- L'argon-37 étant radioactif ($T_{1/2}^{ec} = 35$ j) on peut l'accumuler dans un compteur et mesurer le nombre de décroissances.

Résultats de l'expérience Chlorine



- Bahcall prévoit un taux de 9.3 ± 1.3 SNU
(Solar Neutrino Unit : $1 \text{ SNU} = 10^{-36}$ capture/target atom/s)
- Mais Davis mesure un taux de 2.56 ± 0.16 (stat.) ± 0.15 (syst.) SNU



Tank contenant 400 m^3 de chlorure dans la mine de Homestake et le taux d'argon-37 détecté en fonction des années.

Détection des neutrinos solaires

- La détection des neutrinos solaires fut un véritable exploit qui confirma l'origine de l'énergie produite au cœur du Soleil par la fusion et ouvrit la voie de l'astronomie utilisant les neutrinos.
- Mais le taux de neutrinos détectés ne correspondait pas au nombre de neutrinos attendus d'après le modèle du Soleil : on ne détecte qu'environ 30% des neutrinos attendus.
- Ce *problème des neutrinos solaires* persista pendant plus de 30 ans avant qu'on obtienne enfin une explication.

L'expérience Super-Kamiokande

- D'abord imaginée pour la recherche de la désintégration du proton ($p \rightarrow e^+ \pi^0$), l'expérience Super-Kamiokande s'est révélée décisive pour la physique des neutrinos.
- C'est un détecteur de 50 000 t d'eau instrumenté par 13 000 PMTs qui permet de distinguer les neutrinos électroniques ou muoniques, grâce à l'effet Cherenkov.
- Installée dans la mine Kamioka au Japon.

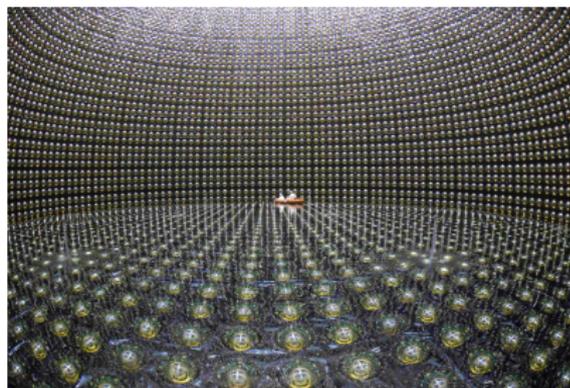
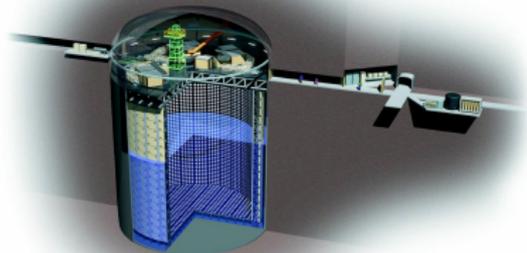
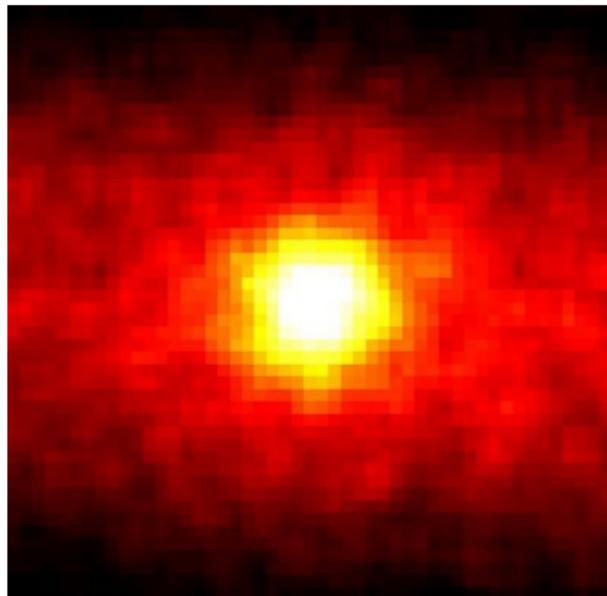
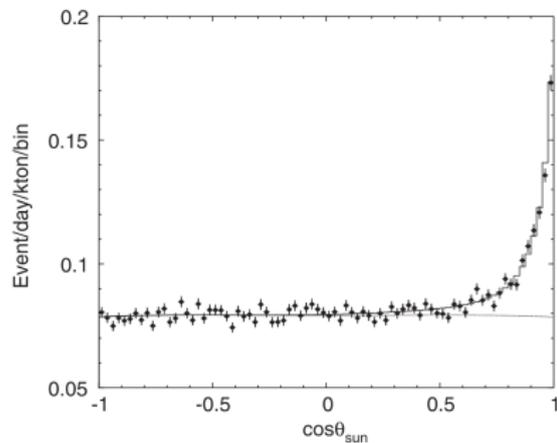


Schéma du détecteur Super-Kamiokande et photo prise lors de son remplissage.

Détection par Super-Kamiokande

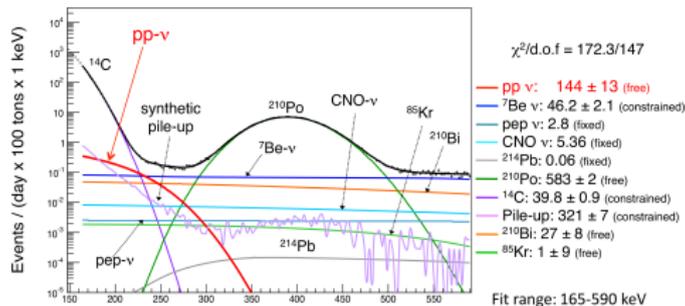
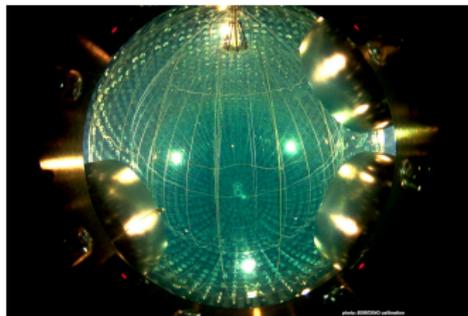
Elle s'est également intéressée aux neutrinos solaires et le déficit d'environ 30% par rapport aux prédictions y a été confirmé.



Détection des neutrinos solaires par l'expérience Super-Kamiokande au Japon.

Neutrinos scolaires dans Borexino

Avec 300 t de liquide scintillant et 2200 PMTs, l'expérience Borexino cherche les neutrinos solaires à très basse énergie.



Détection des différents neutrinos solaires dans l'expérience Borexino en Italie.

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Les interactions des neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

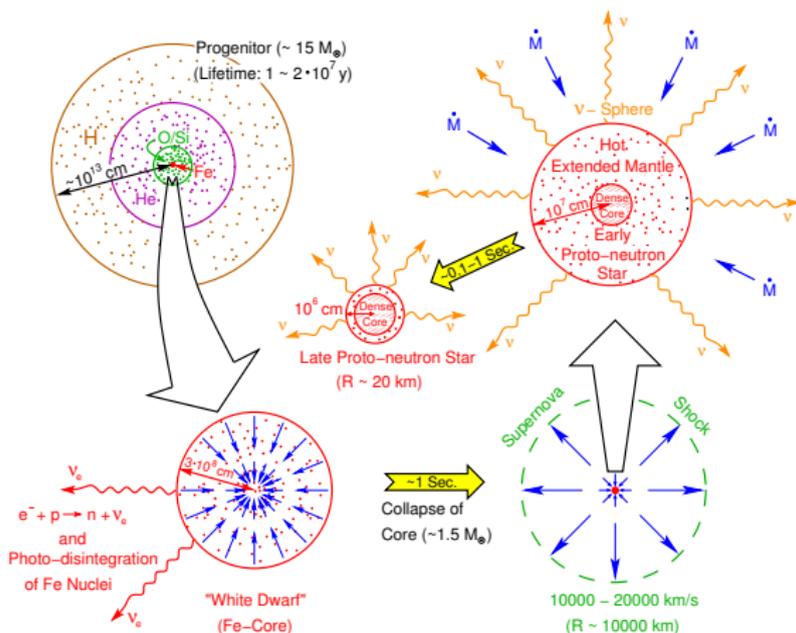
Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Neutrinos de supernova

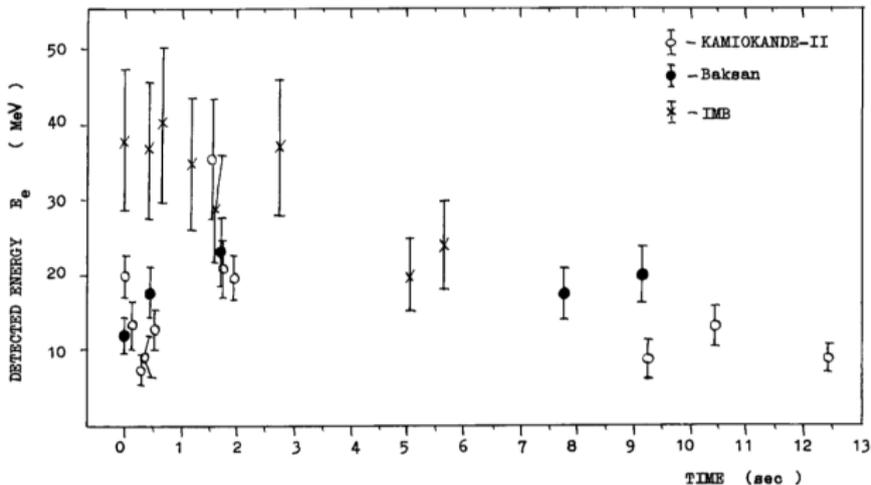
Lorsqu'une étoile massive ($M > 9M_{\odot}$) a brûlé tout son combustible, on assiste à un effondrement de son cœur suivi de l'explosion de l'étoile : c'est une **supernova**.



Mécanisme d'explosion d'une étoile massive. Plus de 90% de son énergie gravitationnelle est émise sous forme de neutrinos [arXiv:1702.08713].

Neutrinos de la supernova SN1987a

En 1987, en 12 secondes trois expériences sur Terre détectent 25 événements $\bar{\nu}_e$ de 12.5 MeV d'énergie moyenne, provenant d'une supernova du grand nuage de Magellan à 50 kpc (163 000 al).



Détection des anti-neutrinos électroniques de la SN1987a par Baksan (0.2 kt), Kamiokande (2.1 kt) et IMB (6.8 kt).

Depuis, de beaucoup plus grandes expériences attendent la prochaine supernova.

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Les interactions des neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

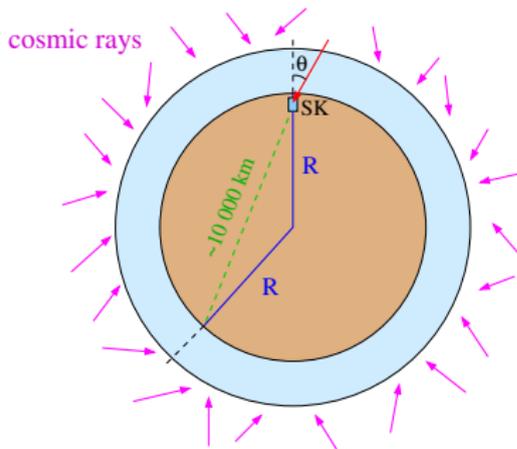
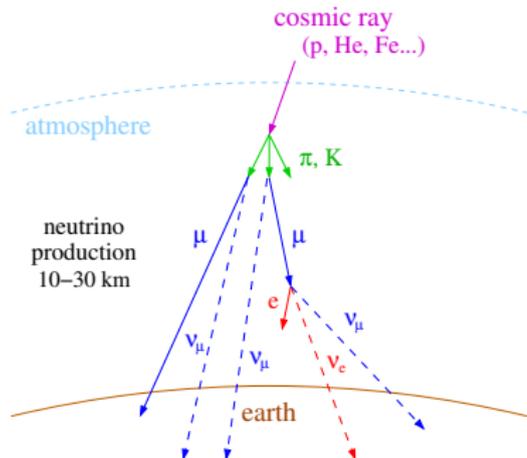
Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Neutrinos Atmosphériques et Super-Kamiokande

La seconde source de neutrinos d'importance pour les scientifiques provient des **neutrinos atmosphériques** produits par interaction des rayonnements cosmiques dans l'atmosphère.

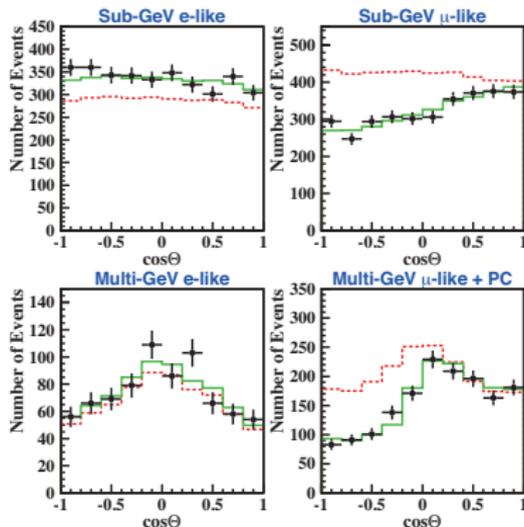


Production de neutrinos par les rayons cosmiques dans l'atmosphère.

Grâce à l'effet Cherenkov, il est possible de distinguer l'interaction de neutrino de type électron ou muon et de déterminer leur direction d'origine.

Oscillation des Neutrinos

En comparant les taux de neutrinos détectés en 1998 en fonction de l'angle et de l'énergie, les scientifiques se sont aperçus que les neutrinos muoniques semblaient disparaître en traversant la Terre.



Détection des neutrinos atmosphériques dans l'expérience Super-Kamiokande.

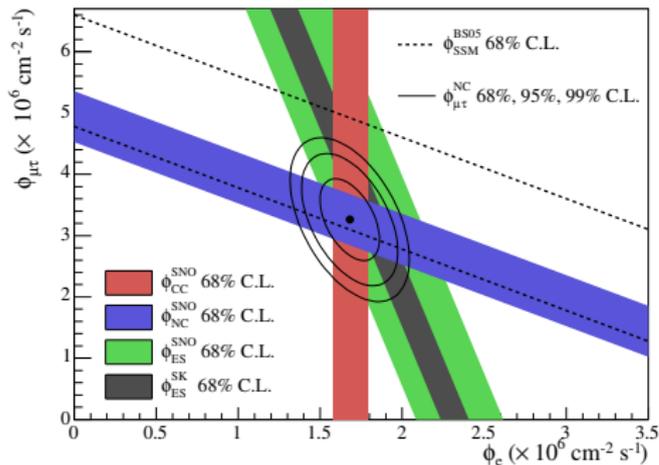
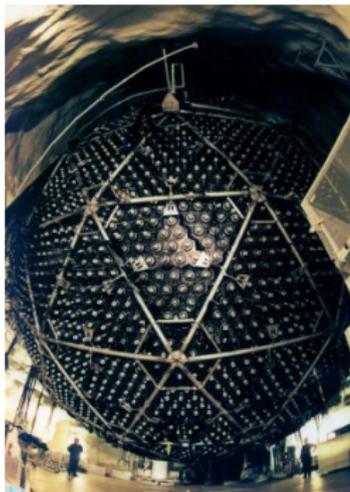
Les neutrinos muoniques changent-ils de saveur (e , μ , τ) en traversant la Terre ?

Résultats de l'Expérience SNO

L'expérience SNO (mine de Sudbury au Canada) apporta en 2000 la compréhension définitive et la solution au problème des neutrinos solaires.

Grâce à l'utilisation d'eau lourde (D_2O), SNO est sensible à toutes les saveurs (e , μ , τ) de neutrino selon des réactions différentes :

ES : $\nu_\alpha e^- \rightarrow e^- \nu_\alpha$, CC : $\nu_e d \rightarrow p p e^-$ et NC : $\nu_\alpha d \rightarrow p n \nu_\alpha$



Vue extérieure de SNO et flux des trois saveurs de neutrinos solaires.

Prix Nobel de Physique 2015

Les portes paroles des expériences Super-Kamiokande et SNO ont été récompensées du prix Nobel de Physique en 2015 pour la découverte des oscillations de neutrinos, qui prouvent que les neutrinos ont une masse.

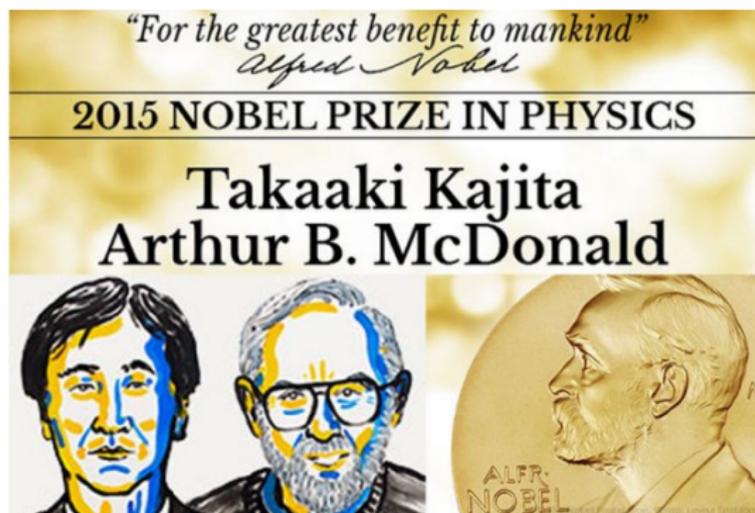


Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Les interactions des neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

Neutrinos atmosphériques

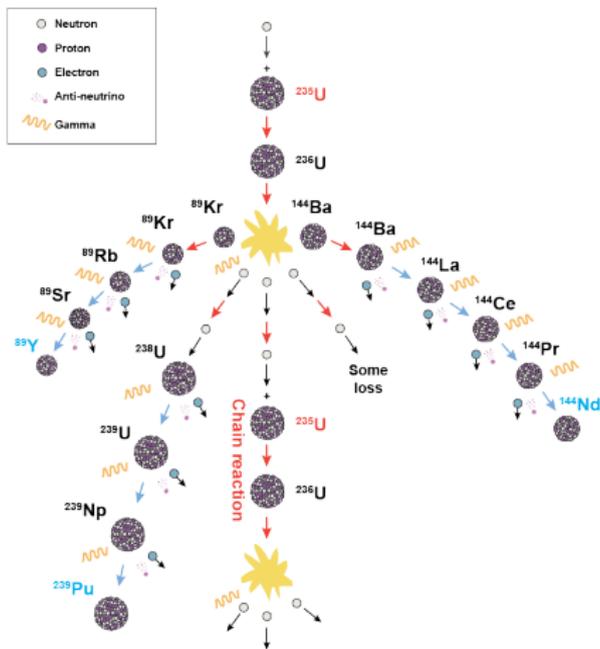
Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Production de neutrinos par fission

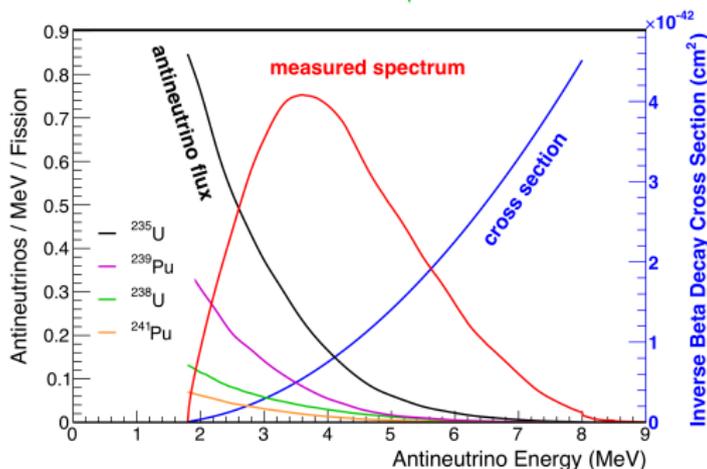
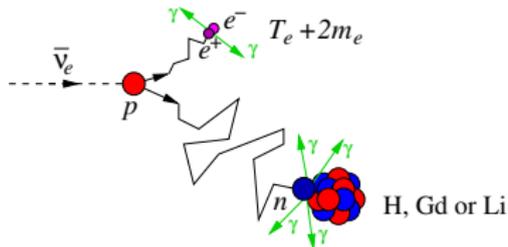
Comme nous l'avons déjà évoqué les neutrinos sont une source extrêmement intense et pure d'anti-neutrinos électroniques.

La fission de l'uranium-235 produit de nombreux émetteurs bêta et on attend environ $6 \bar{\nu}_e$ par fission.



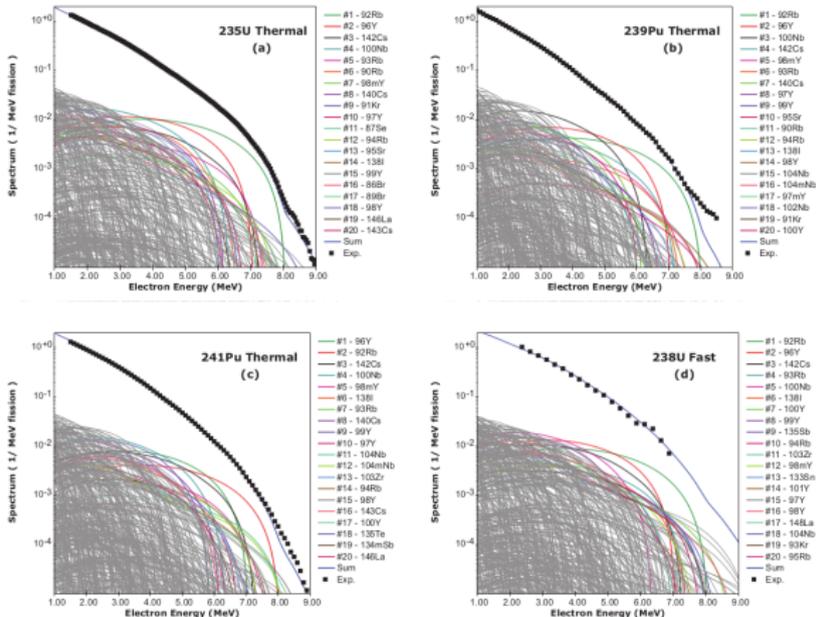
Production de neutrinos par fission

Grâce à nos connaissances en physique nucléaire et de l'interaction des anti-neutrinos par réaction bêta inverse, on peut prédire le taux d'interaction et le spectre en énergie des neutrinos attendus.



Production de neutrinos par fission

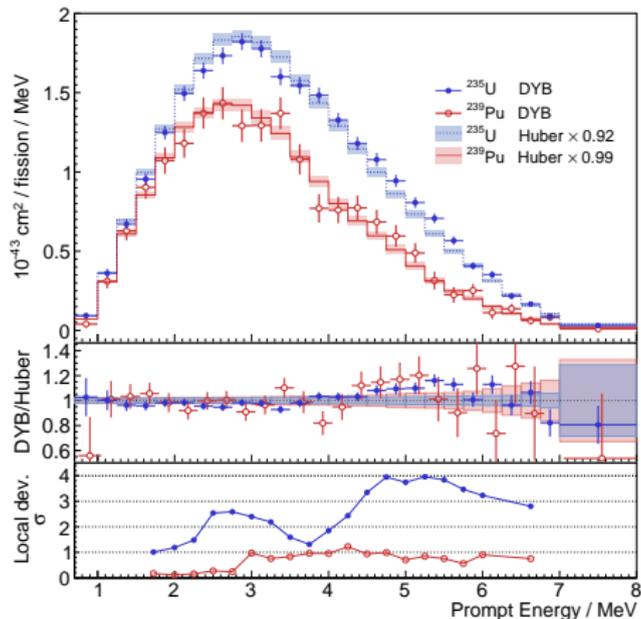
Une grande activité de recherche en physique nucléaire consiste à prédire à chaque instant le spectre et le flux des neutrinos émis par les réacteurs nucléaires.



Sommation de 4×800 fragments de fissions et plusieurs milliers de branches de désintégration bêta des 4 isotopes qui fissionnent dans le cœur du réacteur.

Mesure du spectre en énergie

La mesure la plus précise du spectre en énergie a été réalisée pendant plusieurs années par l'expérience Daya Bay en Chine.

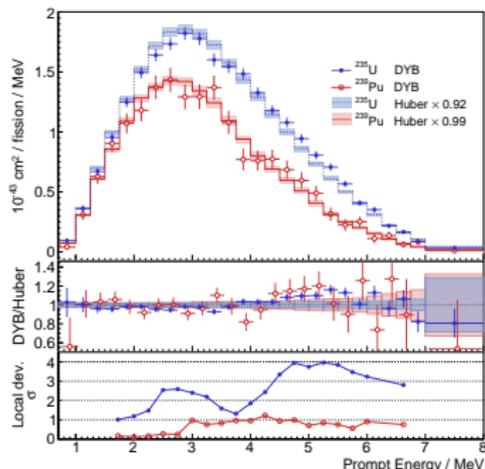
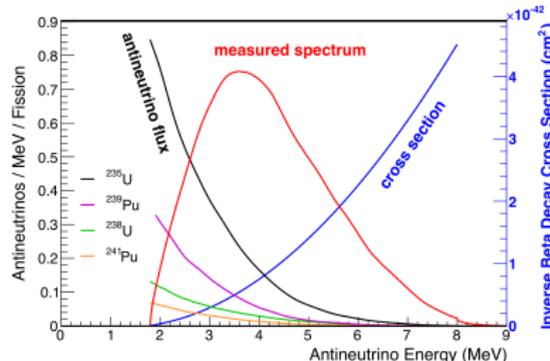


Comparaison des spectres d'uranium-235 et de plutonium-239 mesurés par Daya Bay à la prédiction de Huber-Mueller.

Exercice 2

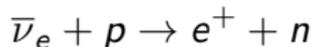
Exercice 2 : Pourquoi le seuil en énergie mesuré par l'expérience Daya Bay montre un seuil autour de 0.8 MeV alors que le spectre théorique commence à 1.8 MeV ?

Données :



Exercice 2 (correction)

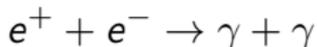
La réaction utilisée pour détecter les anti-neutrinos de réacteur est la réaction bêta inverse :



Nous avons calculé le seuil au premier cours : $E_{IBD}^{\bar{\nu}_e} > 1.805 \text{ MeV}$.

Le liquide scintillant répond à l'excitation (scintillation) des particules qui y déposent leur énergie (ionisation). Dans cette réaction bêta inverse c'est le positron qui dépose son énergie.

Mais le positron va s'annihiler avec un électron dans le milieu :



Ces deux γ vont à leur tour déposer leur énergie dans le détecteur, avec l'énergie $E_{anni} = 2 \times E_\gamma = 2 \times 511 \text{ keV} = 1022 \text{ keV}$.

L'énergie visible sera donc : $E_{vis} > 1.805 - 1.022 = 783 \text{ keV}$.

Table des matières

Interactions des neutrinos

L'interaction faible dans le Modèle Standard

Les trois saveurs de neutrinos

Les interactions des neutrinos

Sources de neutrinos

Neutrinos solaires

Neutrinos de supernova

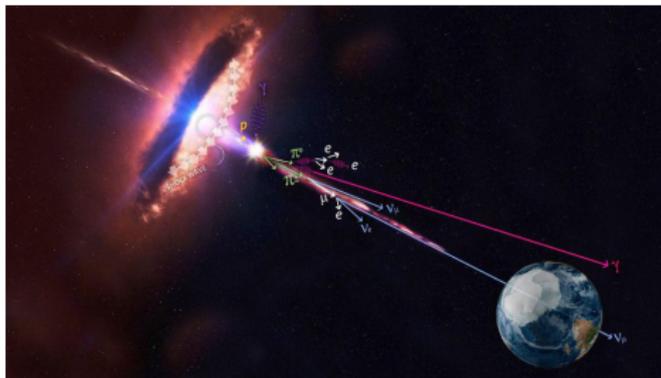
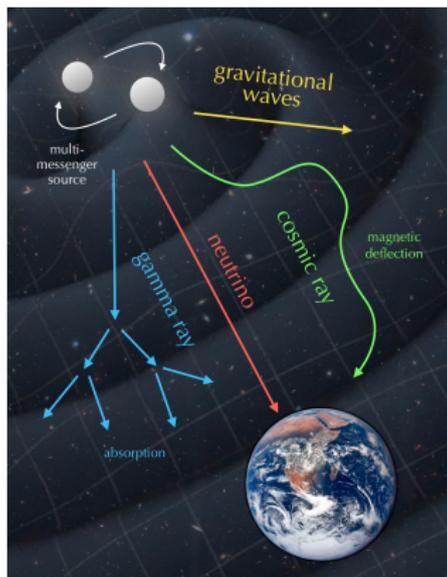
Neutrinos atmosphériques

Neutrinos de réacteur nucléaire

Neutrinos astrophysiques

Les neutrinos astrophysiques

Comme pour le Soleil et les Supernova dont nous avons parlé, les neutrinos sont des messagers astrophysiques uniques



(gauche) Illustration des différents messagers émis lors de la fusion de deux trous noirs (ou étoiles à neutrons). (droite) Émission de particules de ultra-haute énergie par un *noyau actif de galaxie*.

Télescope à neutrinos KM3NeT

Des modules optiques, constitués de PMTs, assemblés en lignes sont plongés à 2500 m (ORCA en France) et 3500 m (ARCA en Sicile) sous la mer Méditerranée

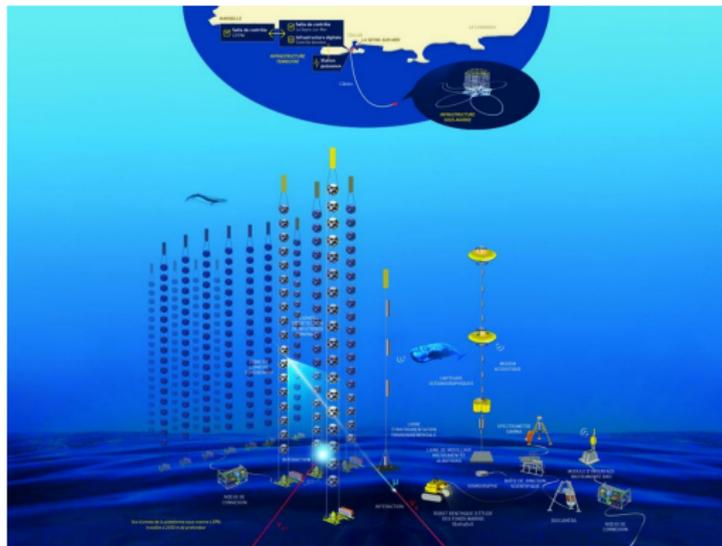


Illustration d'ORCA avec les lignes de modules optiques et ses systèmes annexes. Deux types de neutrinos interagissants sont représentés : ν_e (boule de lumière) et ν_μ (cône Cherenkov). (CNRS/CPPM et Sciences et Avenir) .

Le neutrino le plus énergétique jamais détecté

En février 2023 KM3NeT a détecté un neutrino record d'environ 220 PeV (10^{15} eV) - son origine est encore inconnue

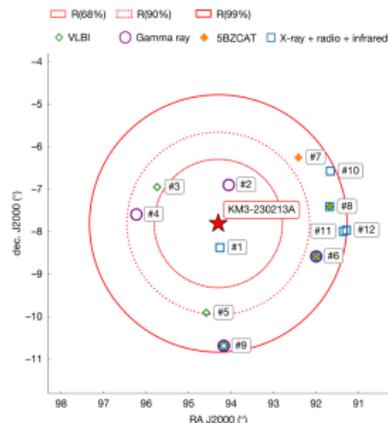
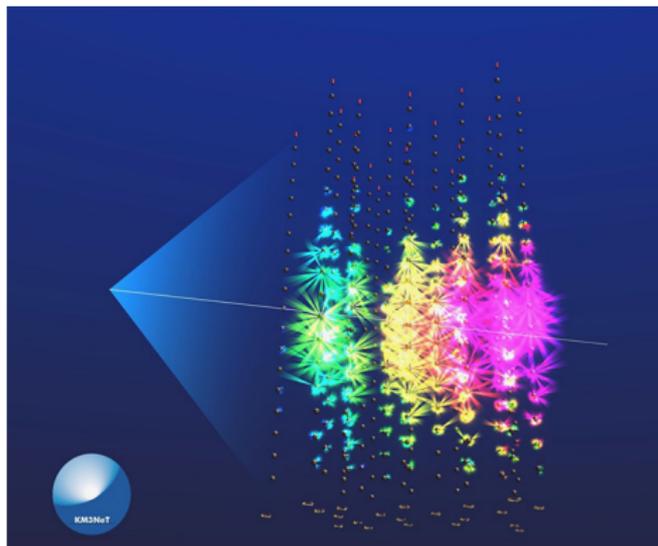


Fig. 4 | Sky map in the direction of KM3-230213A. KM3-230213A is indicated by the red star, with the error regions within R(68%), R(90%) and R(99%) shown as dotted, dashed and solid contours, respectively. The directions of the selected source candidates are shown as coloured markers, whose colours and marker type indicate the criterion according to which the source was selected. The sources are numbered according to their proximity to KM3-230213A, as reported in Methods.

Illustration de l'événement KM3-20230213A détecté par 21 lignes composées de 18 modules optiques. Les cônes colorés indiquent l'intensité du signal lumineux détecté et la couleur correspond à sa durée (de violet vers le bleu). La ligne blanche symbolise la trajectoire du neutrino et avec son cône Cherenkov.

Exercice 3

Exercice 3 : Comparer l'énergie de ce neutrino ultra-énergétique (220 PeV) à celle d'un moustique en vol.

Données :

$$m_{moustique} = [2.5; 10] \text{ mg et } v_{moustique} = [1.6; 2.4] \text{ km h}^{-1}$$

$$e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Exercice 3 (correction)

L'énergie cinétique du moustique est donnée par :

$$\begin{aligned} E_{moustique} &= \frac{1}{2} \times m_{moustique} [kg] \times v_{moustique}^2 [m]^2 [s]^{-2} \\ &= 0.5 \times 5 \times 10^{-6} [kg] \times \left(\frac{2 \times 10^3}{3600} \right)^2 [m]^2 [s]^{-2} \\ &= 0.5 \times 5 \times 10^{-6} [kg] \times \frac{4}{12.96} [m]^2 [s]^{-2} \\ &= 7.7 \times 10^{-7} \text{ J} \end{aligned}$$

On peut convertir cette énergie en électronvolts :

$$E_{moustique} [eV] = \frac{E_{moustique} [J]}{e [J][eV]^{-1}} = \frac{7.7 \times 10^{-7}}{1.602 \times 10^{-19}} = 4.8 \times 10^{12} \text{ eV} = 4.8 \text{ TeV}$$

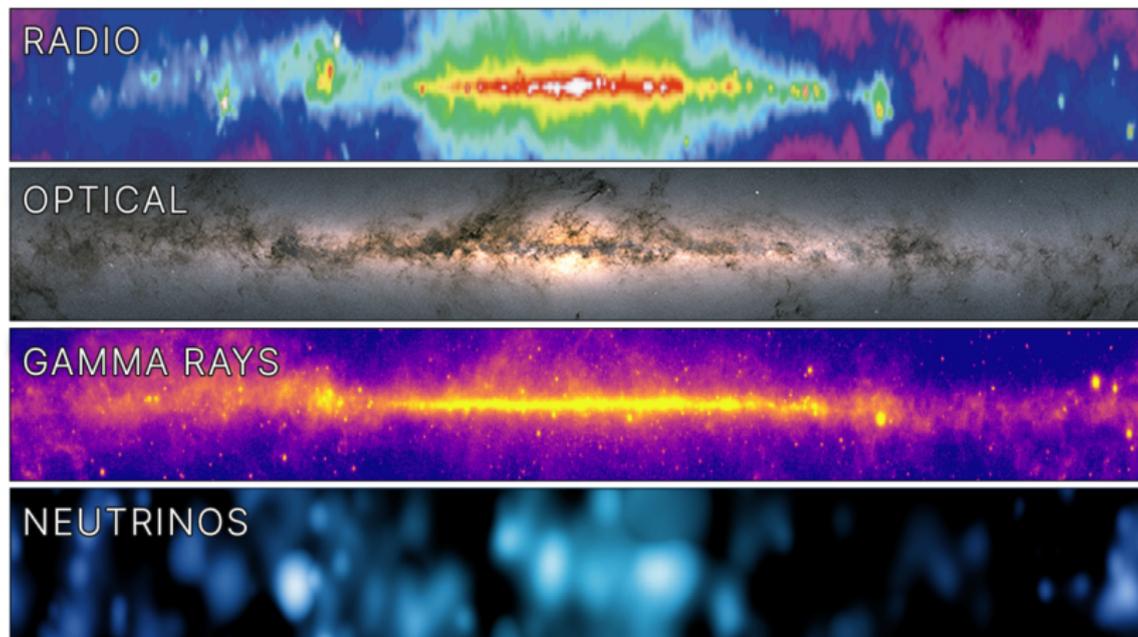
Ce neutrino possède donc l'énergie d'environ 46 000 moustiques.

Sur Terre, le record est l'énergie d'un proton accéléré au LHC du CERN (14 TeV / 2).

Résumé et conclusion

- Nous avons détaillé les différentes sources de neutrinos que l'on peut détecter sur Terre.
- Dès les années 70, un déficit d'environ 30% de neutrinos solaires est découvert.
- On observe également un déficit de neutrino atmosphériques muoniques traversant la Terre (expérience Super-Kamiokande).
- L'expérience SNO a montré qu'il y a un changement de saveurs (e, μ, τ) lors de la propagation des neutrinos.
- On appelle ce phénomène l'oscillation de saveur des neutrinos que nous expliquerons au prochain cours.
- Le télescope KM3NeT a détecté le neutrino le plus énergétique jamais observé.

Notre galaxie vue par différents messagers



Ressources

- Lecture du livre (en anglais) de Franck Close - *Neutrino* - Oxford Press Libri - 2012
- <https://www.cnrs.fr/fr/presse/premiere-detection-dun-neutrino-dultra-haute-energie>
- <https://lejournal.cnrs.fr/articles/un-neutrino-eblouit-lastrophysique>
- <https://www.pourlascience.fr/sd/physique-particules/un-neutrino-flashe-avec-une-energie-record-au-fond-de-la-mediterranee-27447.php>