

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

Alexia HOCINE

*Physicienne subatomique & Développeuse*

Université de Rouen-Normandie & Université de Claude Bernard Lyon 1  
alexia.hocine@proton.me

Les Vendredis de l'Astronomie

<https://github.com/alexhxia/LVA/tree/main>

Vendredi 12 Avril 2024



# LES MESSAGERS

## INTRODUCTION

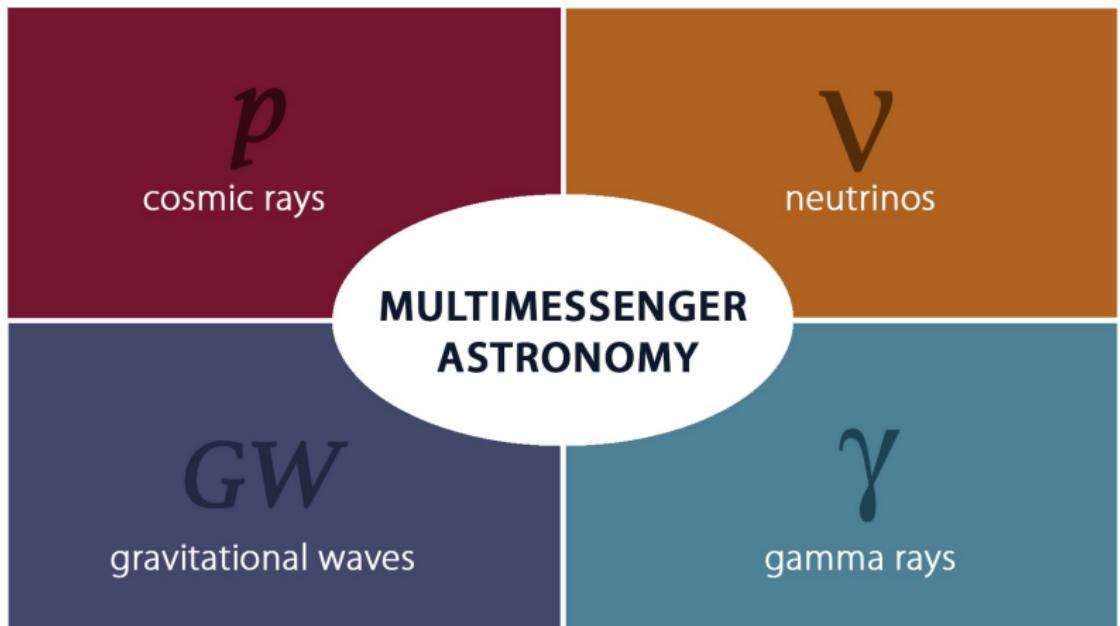


FIGURE 1

# PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## INTRODUCTION

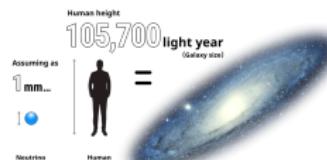
$1\text{ cm}^3 = 300$

500ml plastic bottle  
Neutrino

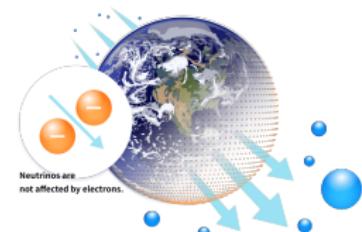
150,000



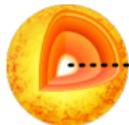
(A) Population



(B) Dimension



(C) Interaction des flux



From the inside of the sun to the earth,  
a neutrino takes

while light takes 10 million years and 8 minutes

8

minutes



(D) Vitesse

FIGURE 2 – Sources Kamiokande

# LES MODÈLES STANDARDS

## Définition (Modèle)

- ▶ Un cadre représentatif, idéalisé
- ▶ Approximatif et schématique
- ▶ Répond à un but donné :
  - ▷ prévoir
  - ▷ agir sur la nature
  - ▷ la connaître mieux
  - ▷ etc

## Modèle Standard des Particules

La théorie des constituants élémentaires :

- ▶ La Matière
- ▶ Les Forces

## Modèle Standard de la Cosmologie

L'étude de l'Univers :

- ▶ de sa composition
- ▶ de sa structure
- ▶ de son origine
- ▶ et de son évolution

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

SOMMAIRE

UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

CONCLUSION

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

SOMMAIRE

UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

CONCLUSION

LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

# UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

## Le Modèle Standard des Particules

La Physique Quantique

## Les Symétries

#### Une Découverte récente

La Physique des Neutrinos

La Détection des Neutrino

Expériences sur les Neutrino

## Le Nombre de Neutrino

La Masse des Neutrinos

## Panique à bord

Le Compte n'est pas bon

Le Compte n'est toujours pas bon

Et si c'était autre chose

Un indice pour les Supernovae

## Un indice pour comprendre notre Galaxie

### Un indice pour comprendre les Trous noirs

## CONCLUSION

# QU'EST-CE QU'UNE PARTICULE ?

## Définition (Particule)

Ce sont les constituants élémentaires de la matière et les rayonnements.

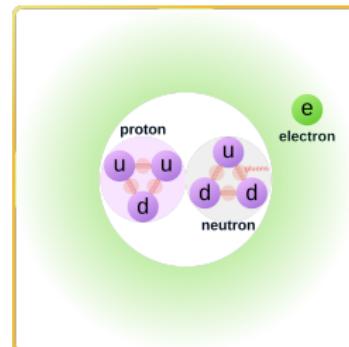
## Particule élémentaire

Ce sont les particules *supposées sans constituants internes*.

<b>QUARKS</b>	$\rightarrow$	$2.3 \text{ MeV/c}^2$	$1.275 \text{ GeV/c}^2$	$173.07 \text{ GeV/c}^2$	$0$
charge	=	2/3	2/3	2/3	0
spin	=	1/2	1/2	1/2	1
					
up		charm		top	gluon
$4.8 \text{ MeV/c}^2$	$\rightarrow$	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	$0$
down					
strange					photon
$6.611 \text{ MeV/c}^2$	$\rightarrow$	$-1$	$10.67 \text{ MeV/c}^2$	$1.777 \text{ GeV/c}^2$	$\pm 2 \text{ GeV/c}^2$
electron					
muon					boson $Z^0$
<b>ELETONS</b>	$\rightarrow$	$<2 \text{ eV/c}^2$	$<1.17 \text{ MeV/c}^2$	$<15.5 \text{ MeV/c}^2$	$0.4 \text{ GeV/c}^2$
neutrino électronique					
					boson $W^\pm$
					<b>OSONS DE L'AGE</b>

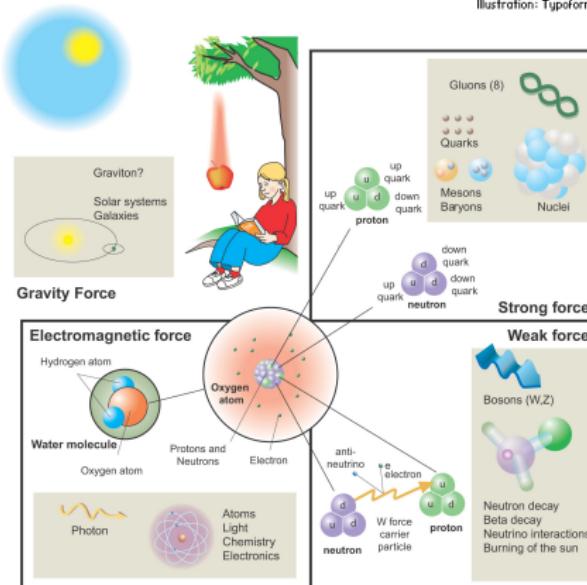
## Particule composite

Une particule qui est composée d'autres particules.



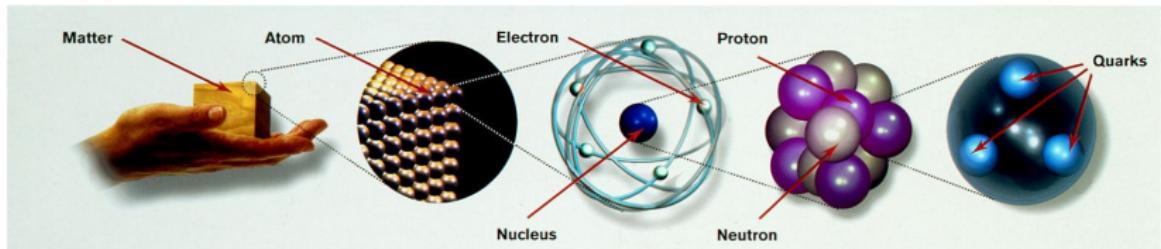
# QUELLES SONT LES FORCES DU MODÈLE STANDARD ?

Illustration: Typeform



**FIGURE 3 –** Les quatre forces (ou interactions) de la nature, leurs particules porteuses de force et les phénomènes ou particules qu'elles affectent. Les trois interactions qui régissent le microcosme sont toutes beaucoup plus puissantes que la gravité et ont été unifiées par le modèle standard.

## VERS L'INFINIMENT PETIT



**FIGURE 4 –** Schéma expliquant les constituants de la matière (Jan 1995, Jean-Luc Caron)

# LE MODÈLE STANDARD DES PARTICULES

## Définition (Modèle Standard des Particules)

Théorie qui classifie et explique les comportements des particules élémentaires.

### Physique

- ▶ la Physique Quantique
- ▶ les Symétries

Validé expérimentalement :

- ▶ jusqu'à un certain niveau d'énergie

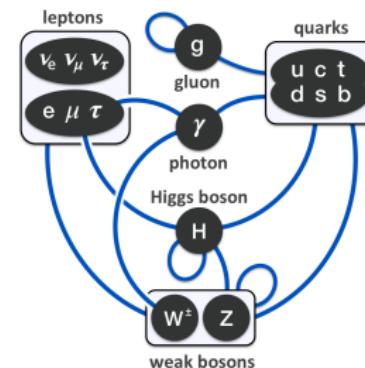


FIGURE 5 – Interaction entre les particules élémentaires du Modèle Standard

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

Le Modèle Standard des Particules

**La Physique Quantique**

Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

Une Découverte récente

La Physique des Neutrinos

La Détection des Neutrino

Expériences sur les Neutrino

Le Nombre de Neutrino

La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

Panique à bord

Le Compte n'est pas bon

Le Compte n'est toujours pas bon

Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

Un indice pour les Supernovae

Un indice pour comprendre notre Galaxie

Un indice pour comprendre les Trous noirs

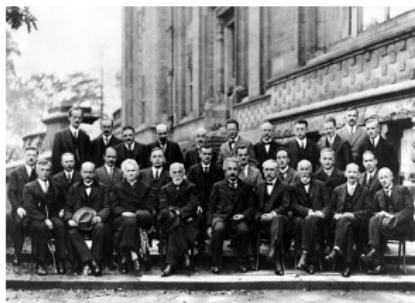
### CONCLUSION

# LA PHYSIQUE QUANTIQUE

## Historique

**1897** : J.J. Thomson découvre l'électron, la 1<sup>re</sup> particule subatomique

**1924** : Louis Victor de Broglie suggère que ces minuscules particules puissent parfois se comporter comme des ondes

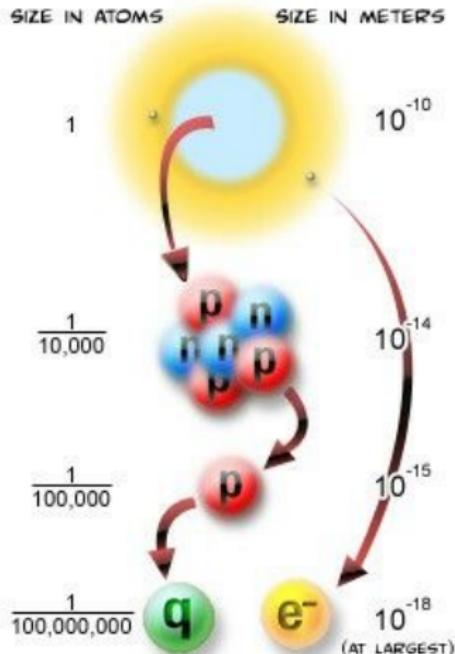


**FIGURE 6** – Congrès Solvay de 1927 sur la Mécanique Quantique

## Physique Quantique [1]

- ▶ Décrit le comportement de l'Univers dans l'infiniment petit.
- ▶ Régit les comportement et les interactions des constituants fondamentaux.

# VERS L'INFINIMENT PETIT



## Dimensions quantiques [1]

Phénomènes qui se produisent à des échelles extrêmes.

## Définition (Longueur de Planck[1])

$$10^{-35} \text{ m}$$

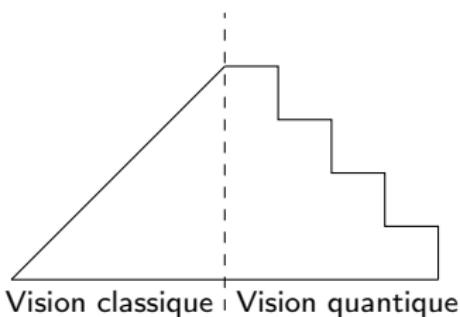
- ▶ La plus petite longueur mesurable.
- ▶ La plus petite unité de longueur possible.
- ▶ En dessus, nos théories ne s'appliquent plus, donc plus de prédition.

# PRINCIPE QUANTIQUE

## LA QUANTIFICATION

### Définition (Quantifié(e) [2])

Toute grandeur physique qui ne peut avoir que certaines valeurs discrètes.



### Exemples :

▷ Énergie quantifiée

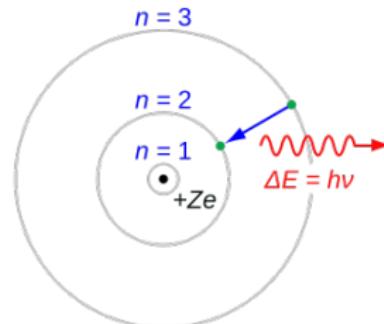


FIGURE 7 – Un atome ne possède que certains niveaux d'énergie [2]

## ÉTAT D'UN OBJET QUANTIQUE

### Définition (Observable [2])

Toute *variable dynamique* d'un objet quantique qui **peut**, en principe, **être mesurée**.

**Exemples :**

- ▷ *Position, Quantité de mouvement, Énergie cinétique*

### Définition (Nombre quantique [2])

- ▶ Des ensembles de nombres définissant l'**état quantique** d'un système.
- ▶ Ce sont des nombres entiers ou demi-entiers :
  - ▷ les grandeurs observables sont quantifiées

**Exemples :**

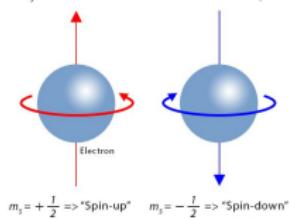
- ▷ *Énergie, Spin, Moment angulaire*

## PROPRIÉTÉ QUANTIQUE

## SPIN

## Définition (Spin [3, 2])

- ▶ Observable quantique
- ▶ Propriété fondamentale des particules
- ▶ Moment cinétique : objet en rotation autour d'un axe

Spin Quantum Number ( $m_s$ ) $m_s$  indicates the orientation of the electron spin

## Fermion

## Particules de Spin demi-entier :

$$\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$$

## Exemples :

- ▷ 12 particules élémentaires
- ▷ 12 anti-particules élémentaires
- ▷ Nucléons : protons, neutrons

## Boson

## Particules de Spin entier :

$$0, 1, 2, \dots$$

## Exemples :

Spin 0 Boson de Higgs

Spin 1 Bosons médiateurs ( $\gamma$ ,  $W$ ,  $Z$ ,  $g$ )

Spin 2 Graviton

## PROPRIÉTÉ QUANTIQUE

## HÉLICITÉ

Définition (Hélicité,  $h$ )

La projection du spin  $\vec{S}$  sur la direction de la quantité de mouvement  $\vec{p}$  :

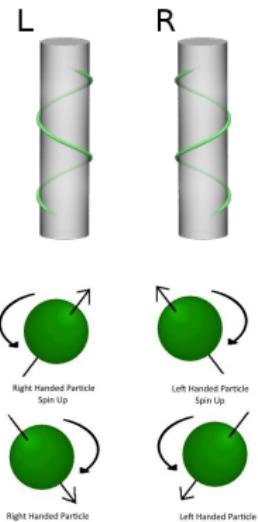
$$h = \vec{S} \cdot \hat{p}$$

Hélicité positive :  $h > 0$

- ▶ Hélicité **droite**
- ▶ Si le spin est dans le sens du mouvement de la particule

Hélicité négative :  $h < 0$

- ▶ Hélicité **gauche**
- ▶ Si le spin est dans le sens opposé du mouvement de la particule



## DUALITÉ ONDE-PARTICULE

## QU'EST-CE QU'UNE ONDE ?

## Définition (Onde)

Propagation d'une perturbation produisant sur son passage une variation réversible des propriétés physiques locales du milieu.

## Mécaniques

Déformation de la matière.

*Exemples :*

- ▷ *Vagues*
  - ▷ *Ondes sismiques*
  - ▷ *Ondes sonores*

Électromagnétiques

## Oscillations du champs électriques et magnétiques

*Exemples :*

- ▷ *Ondes lumineuses*
  - ▷ *Ondes radios*

## Gravitационnelles

## Déformations de la géométrie de l'espace-temps

### **Exemples :**

- ## ▷ *Ondes gravitationnelles*

# DUALITÉ ONDE-PARTICULE

ONDE VS PARTICULE

## Onde

- Position :** Non localisée  
**Propagation :** Toutes les directions  
**Comptage :** Indénombrable

## Particule

- Position :** Localisée  
**Propagation :** Trajectoire  
**Comptage :** Dénombrable

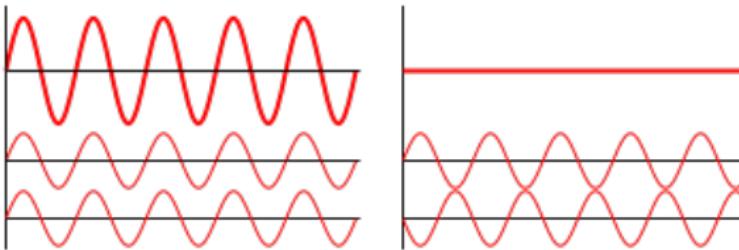


FIGURE 8 – À gauche, interférence constructive. À droite, interférence destructive.

# DUALITÉ ONDE-PARTICULE

## PRINCIPE QUANTIQUE

Définition (Dualité Onde-Particule)

Toutes les particules peuvent se comporter comme des ondes selon l'expérience effectuée.

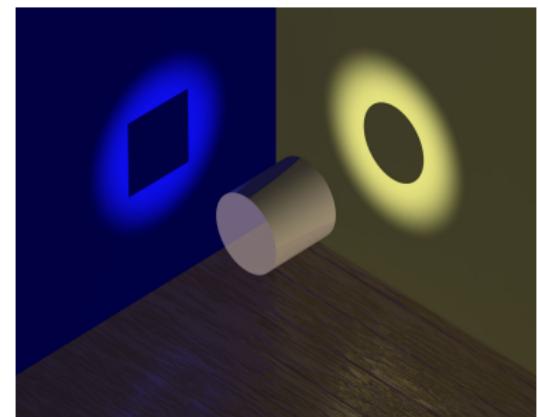


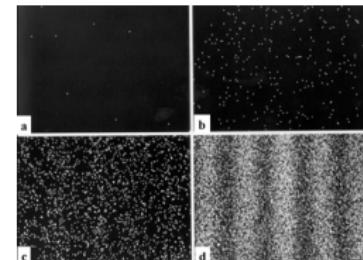
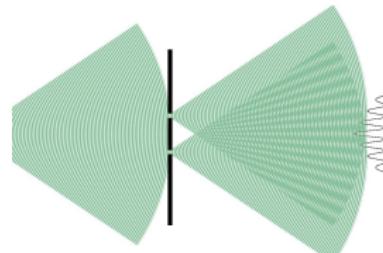
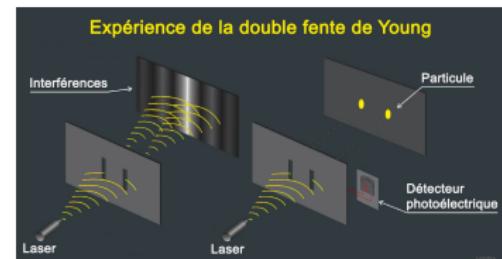
FIGURE 9 – Métaphore du cylindre : perçue comme un cercle ou un rectangle en fonction du point de vue.

## DUALITÉ ONDE-PARTICULE

#### **EXEMPLE (LA LUMIÈRE)**

## Expérience des doubles fentes, 1801

- ▶ Interprétation ondulatoire & corporelle
  - ▶ Prévision d'impacts uniquement probabiliste



## PRINCIPE DE SUPERPOSITION

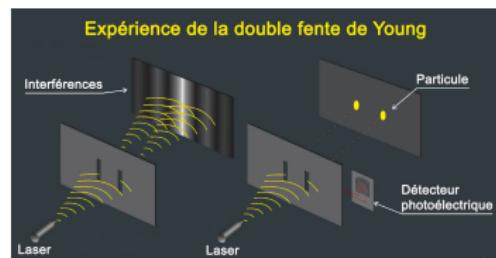
## PRINCIPE QUANTIQUE

### Définition (Superposition [2])

État quantique composé de deux ou plusieurs autres états. Pareil état possède certaines probabilités de manifester les propriétés des états dont il est composé.

## Expérience des doubles fentes

- ▶ Chaque particule se retrouve dans un état superposé à la suite du franchissement des fentes.
  - ▶ « On peut dire que la particule est passée par les deux fentes en même temps. »



MESURE QUANTIQUE

## PRINCIPE QUANTIQUE

## Avant la mesure

- L'objet est dans une superposition d'état.

---

  - Impossible de mesurer plusieurs états superposés.

## Après la mesure

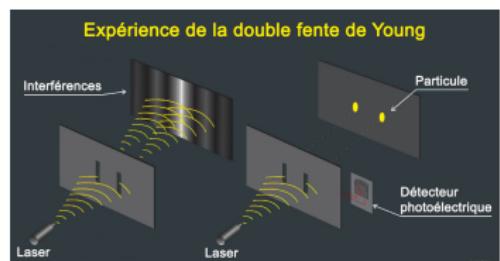
- La particule est mesurée dans un seul état

---

  - Impossible de prédire quel état on observera

## Expérience des doubles fentes

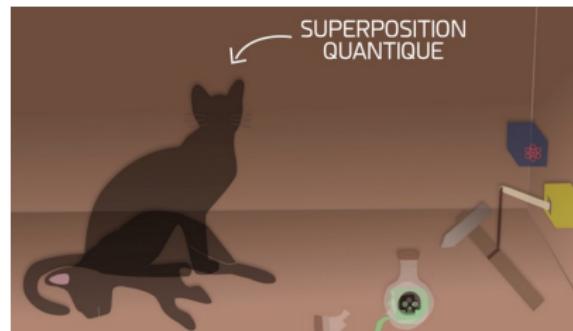
- On mesure par quelle fente passe la particule.
  - Mais l'interférence disparaît
  - On ne peut pas connaître la fente traversée, sans éliminer le phénomène d'interférence.



## PRINCIPE DE SUPERPOSITION

CHAT DE SCHRÖDINGER [10]

- ▶ Expérience de pensée imaginée par Schrödinger,
  - ▶ Met en évidence les difficultés conceptuelles liées à une opération de mesure.
  - ▶ Un chat est enfermé dans une boîte qui contient également un atome radioactif, lequel a une chance sur deux de se désintégrer.
  - ▶ Si la désintégration a eu lieu, un mécanisme libère un poison qui tue le chat.
  - ▶ L'observateur, ouvrant la boîte, voit un chat mort soit un chat vivant avec des probabilités égales à 1/2 chacune. La « mesure » que constitue l'ouverture de la boîte a projeté l'état du chat sur l'un des deux états « vivant » ou « mort » ;
  - ▶ mais avant cette « mesure », l'état du chat était une superposition des états « vivant » et « mort »...



## LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

# UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

## Le Modèle Standard des Particules

La Physique Quantique

## Les Symétries

## Une Découverte récente

## La Physique des Neutrinos

La Détection des Neutrino

Expériences sur les Neutrino

## Le Nombre de Neutrino

La Masse des Neutrino

## Panique à bord

Le Compte n'est pas bon

**Le Compte n'est toujours pas bon**

Et si c'était autre chose

## Un indice pour les Supernovae

### Un indice pour comprendre notre Galaxie

### Un indice pour comprendre les Trous noirs

## Conclusion

# LES SYMÉTRIES

## LE THÉORÈME DE NOETHER

### Le Théorème de Noether

Équivalence entre les **quantités conservés** et les **invariance d'un système sous une transformation (symétries)**.

Ce théorème fut qualifié par Albert Einstein de « monument de la pensée mathématique » dans une lettre recommandation à Hilbert.

### Emmy Noether (1882-1935)



« *Le génie mathématique créatif le plus considérable produit depuis que les femmes ont eu accès aux études supérieures* », pour Einstein

### Définition (Principe de Conservation [2])

Une grandeur physique se conserve dans tous les processus physiques.

Exemples de quantités conservés :

- Énergie, Moment Cinétique, Nombre Leptonique (partiel)...

SYMÉTRIE C

#### TRANSFORME UNE PARTICULE EN SON ANTIPARTICULE

## Définition (Symétrie $\mathcal{C}$ )

- ▶ Symétrie par **inversion de charge**
  - ▶ Théorie invariante sous la transformation de toutes les charges  $Q$ , c'est-à-dire :

$$Q \mapsto -Q$$

## Quantités conservées

**Massé :**  $m \rightarrow m$

**Spin :**  $\vec{\sigma} \rightarrow \vec{\sigma}$

**Vitesse :**  $\vec{v} \rightarrow \vec{v}$

## Quantités inversées

**Nombre leptonique :**  $L \rightarrow -L$

## SYMÉTRIE $\mathcal{P}$

### Définition (Symétrie $\mathcal{P}$ )

- ▶ Symétrie par **inversion de l'espace** ou **Parité**
- ▶ Théorie invariante sous la transformation d'inversion de l'espace, c'est-à-dire :

$$\vec{x} \longmapsto -\vec{x}$$

#### Quantités conservées

**Énergie** :  $H \rightarrow H$

**Vitesse** :  $\vec{v} \rightarrow \vec{v}$

**Spin** :  $\vec{\sigma} \rightarrow \vec{\sigma}$

#### Quantités inversées

**Position** :  $\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

SOMMAIRE

UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

CONCLUSION

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

#### Une Découverte récente

- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

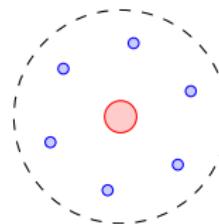
### CONCLUSION

## VERS LE POSTULAT DU NEUTRINO

## LE MODÈLE DE L'ATOME DE RUTHERFORD DE 1909

## Modèle de l'Atome de Rutherford de 1909

- L'atome est principalement du vide :
    - ▷  $\approx 0.01\%$  est occupé
    - ▷ sans charge
  - Noyau :
    - ▷ très petit, au centre
    - ▷ de charge positive
  - Électron :
    - ▷ "gravitent" autour du noyau
    - ▷ de charge négative



**FIGURE 10 –** Représentation de l'atome dans l'expérience de Rutherford

# VERS LE POSTULAT DU NEUTRINO

## HYPOTHÈSE “NEUTRON”

### La Radioactivité $\beta^-$ (*beta*)

- ▶ En 1911, Lise Meitner et Otto Hahn montrent une disparition de l'énergie. Contredit la conservation de l'énergie.
- ▶ Lors d'une désintégration, un neutron se transforme en proton en émettant un électron.
- ▶ *Premières preuves expérimentales du neutrino.*



FIGURE 11 – En 1912 Otto Hahn et Lise Meitner à l'Institut de chimie d'Emil Fischer à Berlin, en 1909.

*Un deuxième problème : le spin de l'atome d'azote 14 était de 1, en contradiction avec la prédiction de Rutherford de 1/2.*

## VERS LE POSTULAT DU NEUTRINO

## HYPOTHÈSE DU NEUTRINO

## Lettre du 4 Décembre 1930 de Pauli

- ▶ Pour sauver la conservation de l'énergie
  - ▶ Pauli postule une nouvelle particule :
    - ▷ Extrêmement neutre
    - ▷ Nommaît « neutron »
    - ▷ Appartient à l'atome
    - ▷ Serait émis lors de la désintégration  $\beta$
    - ▷ Spin 1/2
    - ▷ Très faible masse ( $\sim 1\% m_p$ )
    - ▷ Emporte une partie de l'énergie dans la désintégration  $\beta$
  - ▶ Mais pas encore observé.
  - ▶ En 1931, Enrico Fermi renomme le « neutron de Pauli », neutrino

Hypical - Photocopy of TLC 0393

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der  
Gesamtversammlung zu Biberach.

Abstract

Physikalisches Institut  
der Eidg. Technischen Hochschule

Ditrich, Inc. Dec. 1930  
Standard Avenue

Males, Radicals, and Women

Wie der Untersucher dieser Zeiten, den ich hervorhebe, schrieb er: „Innen der schweren Atomkernenderivate kann, ihm die angehörige der ‚leichten‘ Statistik der  $\Delta$  und  $\Lambda$  Kerne, sowie das kontinuierliche Hebe-Spektrum auf einer verweilenden Stelle ausgenutzt werden, um die Energie des Elektrons zu erhöhen, um es leichter zu retten.“ Möglicher die Möglichkeit, so könnten elektrisch neutralen Teilchen, die kein Neutronen nehmen will, in den Kerne eintreten, welche den  $10^{-12}$  cm und den  $10^{-13}$  cm-Radius besitzen, und dann sie sich mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen könnte von gewissen Größenwerten, wie die Aktektone sein und diese könnten sich leichter überwinden, um die Kerne zu retten. Das bedeutet, dass sie sich vielleicht unter der Anzahl, die sie haben, befinden. Weiter wird mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert, wird, soweit, dass die Summe der Energien des Neutrons und Elektrons

Man handelt so jetzt weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell ist das der Neutronen scheint mir ein wellenmechanischer Druck (ähnliches dem des Unterdrückers dieser Zelle) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment ist. Das Experiment verleiht wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann  $\pm 40$  nicht grösser sein als  $\pm 10^4$  e.v.

Ich treue mich vorlaufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertraulich an Euch, liebe Radikale, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis

aus einem solchen Neutronen stände, wenn dieses ein eingeschlossenes oder eben längeres Durchdringungsvermögen bewiesen hätte, wie ein gewisser Herr.

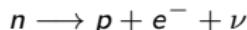
Mr. W. P.

# VERS LE POSTULAT DU NEUTRINO

THÉORIE DE FERMI, 1933

## Théorie de Fermi de la Radioactivité $\beta^-$ (beta)

- Un neutron se transforme en proton en émettant un électron et **un neutrino** :



- Fermi suppose que ce neutrino est :
  - ▷ sans charge électrique
  - ▷ sans masse
- Mais la nature de l'interaction reste inconnue

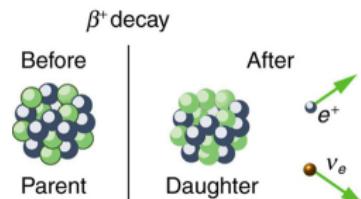


FIGURE 12 – Un neutron du noyau père devient un proton dans le noyau fils en émettant un électron et un neutrino :  
 ${}^A_Z X \xrightarrow{{}^A_{Z+1} Y} {}^0_{-1} \beta^- + {}^0_0 \nu_e$

# VERS LA DÉCOUVERTE DU NEUTRINO

L'ANNONCE DE COWAN ET REINES

Télégramme envoyé le 14 juin 1956 par les physiciens **Fred Reines** et **Clyde Cowan** à **Wolfgang Pauli** pour lui annoncer l'observation, pour la première fois, des neutrinos. Reines recevra le prix Nobel 1995 de Physique pour cette découverte.

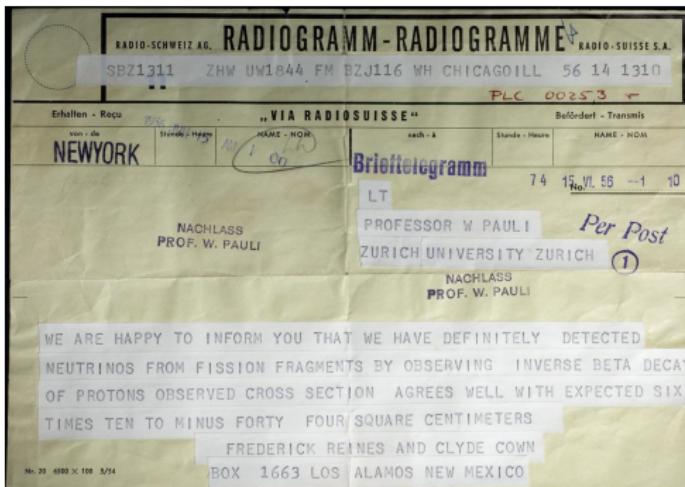


FIGURE 13 – <https://cds.cern.ch/record/970671>

LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

# UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

## Le Modèle Standard des Particules

## La Physique Quantique

Les Symétries

# UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

#### Une Découverte récente

La Physique des Neutrinos

La Détection des Neutrino

Expériences sur les Neutrino

Le Nombre de Neutrino

La Masse des Neutrino

## Panique à bord

## Le Compte n'est pas bon

Le Compte n'est toujours pas bon

Et si c'était autre chose

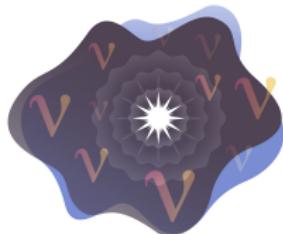
## Un indice pour les Supernovae

### Un indice pour comprendre notre Galaxie

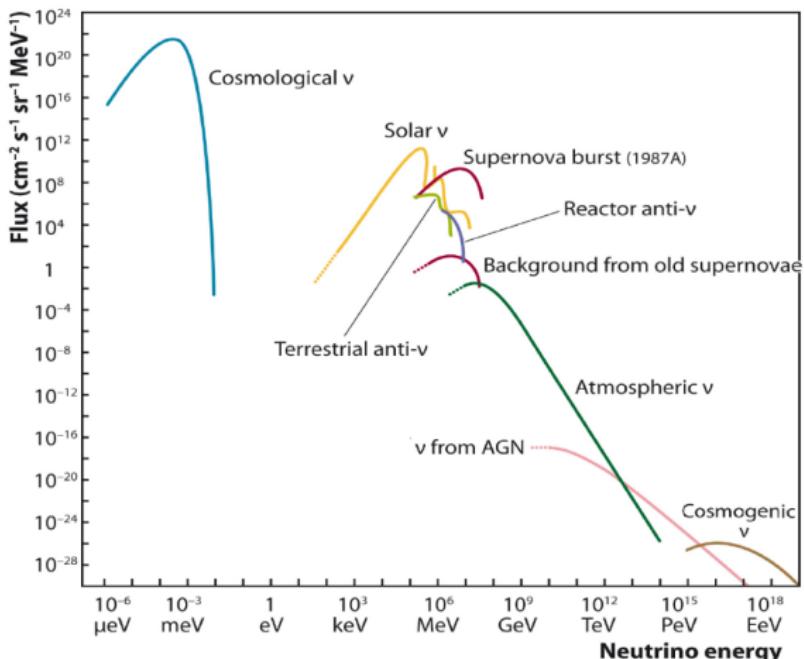
## Un indice pour comprendre les Trous noirs

## Conclusion

# LES SOURCES DE NEUTRINOS



**FIGURE 14 –** Les scientifiques recherchent les gigantesques flux de neutrinos émis par les étoiles en explosion afin d'observer en temps réel la formation des étoiles à neutrons et des trous noirs et d'en savoir plus sur ces objets mystérieux de l'espace.



**FIGURE 15 –** Flux des neutrinos reçus sur Terre

# PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## PROPRIÉTÉS DES PARTICULES

### Propriétés des Neutrinos

- ▶ Particules élémentaires :
  - ▷ Fermions : Spin 1/2
- ▶ Lepton :
  - ▷ Pas de charge de couleur
  - ▷ Pas d'interaction forte
- ▶ Neutre :
  - ▷ Pas de charge électrique
  - ▷ Pas d'interaction électromagnétique
- ▶ Stable

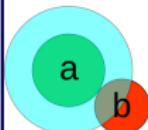
---

*Les neutrinos interagissent très peu avec la matière, ce qui rend leur détection très difficile.*

# INTERACTIONS DES NEUTRINOS

## SECTION EFFICACE

### Définition (Section efficace)



- Grandeur physique
- Probabilité d'interagir d'une particules pour une interaction.
- Équivalent à une surface

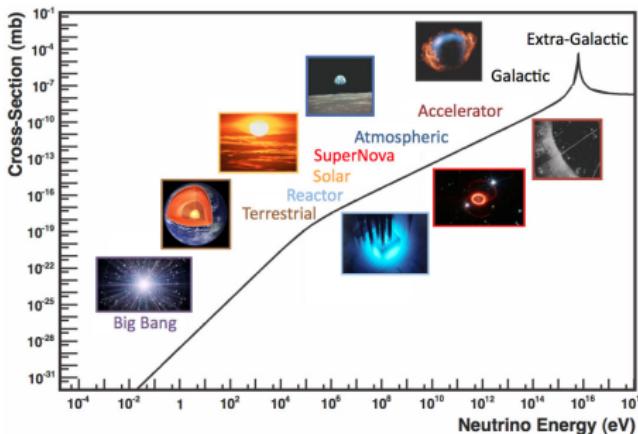


FIGURE 16 – all things neutrino - Fermi National Accelerator Laboratory (USA)

# INTERACTIONS DES NEUTRINOS

## INTERACTION FAIBLE

### Par courant chargé

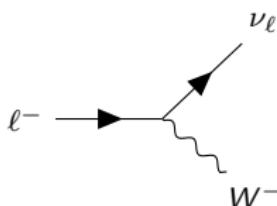
- ▶  $W$  boson médiateur
- ▶ transforme un lepton en anti-neutrino

$$\ell \leftrightarrow \nu_\ell$$

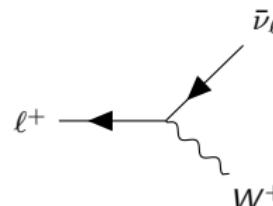
### Par courant neutre

- ▶  $Z$  boson médiateur
- ▶ transforme un neutrino en anti-neutrino

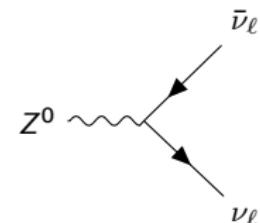
$$\bar{\nu}_\ell \leftrightarrow \nu_\ell$$



(A)  $\ell^- \rightarrow \nu_\ell + W^-$



(B)  $\ell^+ \rightarrow \bar{\nu}_\ell + W^+$



(C)  $Z^0 \rightarrow \nu_\ell + \bar{\nu}_\ell$

FIGURE 17 – Vertex de l'interaction faible avec les neutrinos

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino**
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

# COMMENT DÉTECTER LES NEUTRINOS ?

## EFFET TCHERENKOV

### La vitesse de la lumière dans les milieux

- ▶ La vitesse de la lumière dans le vide est le déplacement maximale de l'énergie !
- ▶ Mais cette vitesse peut être réduite dans un milieu matériel.
- ▶ Donc la lumière peut être « dépassée » dans un milieu matériel.

*Exemples :*

Dans le vide :  $299\ 792\ \text{m s}^{-1}$

Dans l'eau :  $225\ 563\ \text{m s}^{-1}$

### Définition (Lumière de Tcherenkov)

Émise par une particule chargée qui se déplace plus vite que la lumière dans le milieu traversé.

- ▶ Permet la détection et l'étude des particules cosmiques.
- ▶ Expliquer la lumière bleue des piscines de refroidissement des centrales nucléaires.

# COMMENT DÉTECTER LES NEUTRINOS ?

## EFFET TCHERENKOV

### Une particule chargée...

- ▶ Sur son passage, une particule chargée perturbe les couches électroniques des atomes rencontrés
- ▶ Les électrons s'écartent de leur position initiale, puis reviennent à leur place.
- ▶ Ce qui émet des ondes lumineuses :
  - ▷ à toutes les longueurs d'ondes
  - ▷ avec une prédominance dans le bleu et l'ultraviolet
- ▶ Ce qui arrive 10 milliards de fois par mètre.
- ▶ Dans l'eau, ce cône lumineux :
  - ▷ est bleu en surface,
  - ▷ « éteint » à l'intérieur.
  - ▷ s'élargit sur la trajectoire de la particule.
  - ▷ L'axe du cône détermine la direction de la trajectoire de la particule
  - ▷ Son angle d'ouverture indique sa vitesse et sa nature.

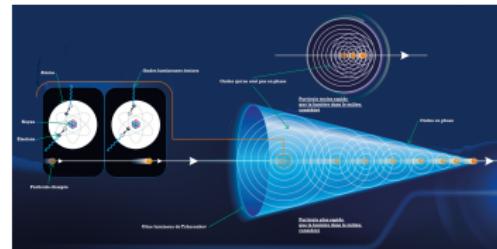


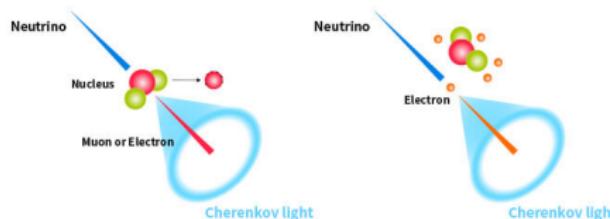
FIGURE 18 – Cône de Tcherenkov

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION

SUPER-KAMIOKANDE (JAPON)

## Rayonnement de Tcherenkov

- Les interactions des  $\nu_\mu$  produisent en majorité des  $\mu^-$ , Les  $\nu_e$  des  $e^-$



# COMMENT DÉTECTER LES NEUTRINOS ?

## LES DÉTECTEURS DE NEUTRINOS

## Caractéristiques des Observatoires

- ▶ Très étendus :
    - ▷ pour en détecter un nombre significatif
    - ▷ puisque les neutrinos interagissent peu avec la matière
  - ▶ Souvent construits sous terre :
    - ▷ pour l'isoler des rayonnements extérieurs
    - ▷ utilisent parfois la Terre pour filtrer le bruit de fond :
      - > interaction des rayons cosmiques avec l'atmosphère
      - > engendrent des muons - captés par le détecteur même plusieurs kilomètres sous terre.
      - > Souvent supérieur au signal attendu des neutrinos.

## Observatoire à Neutrinos

- ▶ Kamiokande (eau),
  - ▶ Sudbury (eau lourde)
  - ▶ Homestake (Chlore)
  - ▶ SAGE, Gallex (Gallium)
  - ▶ MINOS (Scintillateur solide)

## Télescopes à Neutrinos

- ▶ DUMAND,
  - ▶ Baïkal,
  - ▶ NESTOR,
  - ▶ NEMO,
  - ▶ AMANDA, IceCube

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION

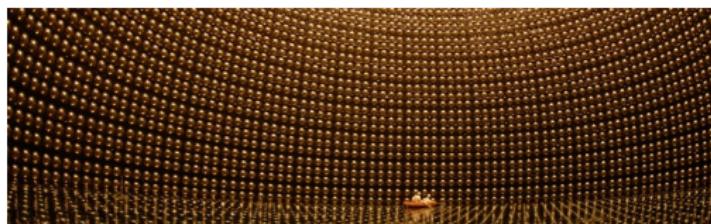
SUPER-KAMIOKANDE (JAPON)

## Détections

- ▶ Les parois de Super-K sont tapissées de plus de 10 000 tubes photomultiplicateurs, qui détectent le cône de lumière Tcherenkov sous forme d'anneau.



(A) Photomultiplicateurs.



(B) Photographie du détecteur Super-Kamiokande.

## EXPÉRIENCE DE DÉTECTION SUPER-KAMIOKANDE (JAPON)

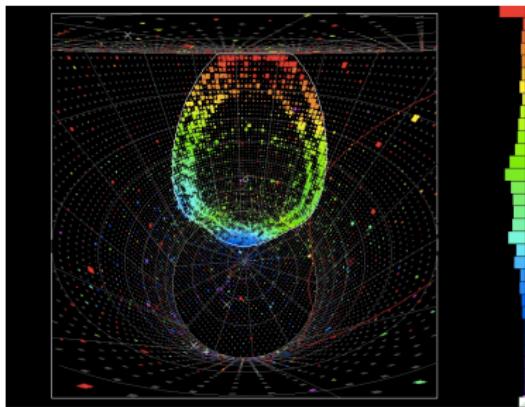


FIGURE 20 – Les muons (produisent un anneau net)

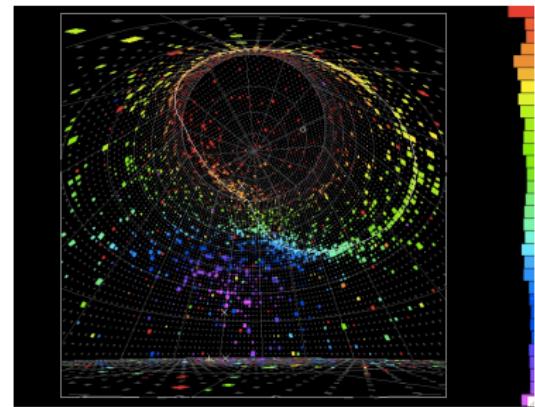


FIGURE 21 – Les électrons (produisent un anneau diffus)

# OBSERVATOIRE À NEUTRINO

ICECUBE

## Schéma du détecteur IceCube

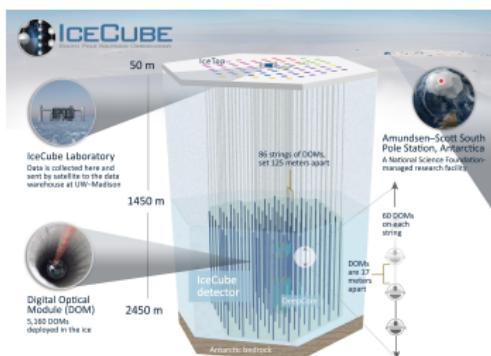


FIGURE 22 – Crédit : IceCube/NSF

- ▶ L'observatoire de neutrinos IceCube instrumente un volume d'environ  $1 \text{ km}^3$  de glace antarctique claire au pôle Sud.
- ▶ Plus de 5 000 modules optiques numériques (DOM) sont gelés à des profondeurs comprises entre 1 450 et 2 450 m.
- ▶ L'observatoire comprend un sous-détecteur densément instrumenté, DeepCore, et un réseau de douches d'air en surface, IceTop.

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino**
  - Le Nombre de Neutrino
  - La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

## EXPÉRIENCE DE DÉTECTION T2K (JAPON)

### T2K (Tokai to Kamioka)

- ▶ Étudie l'oscillation
- ▶ T2K a recherché les oscillations  $\nu_\mu - \nu_e$  :
  - ▷ En Juin 2011 T2K a annoncé les 1<sup>res</sup> preuves expérimentales des oscillations
- ▶ T2K effectue la mesure entre  $\nu_\mu - \nu_\tau$  :
  - ▷ déjà observées par d'autres expériences
- ▶ L'expérience effectuera les mesures les plus précises à ce jour de ces probabilités d'oscillations et de la différence entre les masses des neutrinos

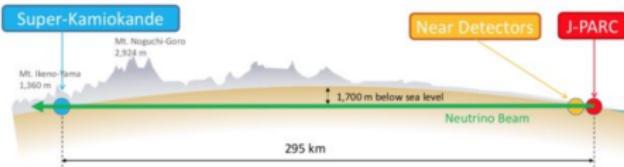


FIGURE 23 – Carte du Japon montrant Tokai et Kamioka

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION T2K

## Le faisceau de $\nu$ de T2K

- ▶ Produit un faisceau de  $\nu_\mu$  à Tokai :
  - ▷  $\langle E(\nu_\mu) \rangle \sim 600$  MeV
  - ▷ Envoyé jusqu'à Kamioka à 295 km.
- ▶ L'énergie des neutrinos du faisceau est importante car les oscillations en dépendent : les neutrinos de faible énergie oscillent sur une distance plus courte que les neutrinos de haute énergie.
- ▶ Prodruit aussi des  $\bar{\nu}_\mu$  depuis 2014 :
  - ▷ Pour révéler des différences entre  $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$
  - ▷ Compare les probabilités d'oscillation des  $\bar{\nu}$  (antimatière) avec celles des  $\nu$  (matière).
- ▶ La théorie du Big Bang produit autant de matière que d'antimatière aux 1<sup>ers</sup> instants de l'univers. Mais aujourd'hui l'Univers est composé de matière.



# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION I

LES DÉTECTEURS DE T2K

## Détecteur INGRID (Interactive Neutrino GRID)

- ▶ Contrôle le faisceau :
  - ▷ La stabilité de sa direction
  - ▷ L'intensité doit être constante dans le temps.
- ▶ Situé à 280 mètres de la cible, au centre théorique du faisceau de neutrinos.

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION II

## LES DÉTECTEURS DE T2K

### Le détecteur proche ND280

- ▶ Situé aussi à 280 mètres de la cible
- ▶ Mesure le nombre de  $\nu_\mu$  avant les oscillations
- ▶  $E(\nu_\mu) > E(\nu_\odot)$  ce qui augmente la probabilité d'interaction.
- ▶ Les  $\nu_\mu$  qui interagissent avec le plastique scintillant ou l'eau du ND280 produisent un muon. :
  - ▷ Une particule chargée
  - ▷ Facile à détecter
- ▶ Ces mesures prédisent le nombre de  $\nu_\mu$  vus dans le "détecteur lointain" sans oscillation.
- ▶ La plupart des neutrinos continueront vers le détecteur Super-Kamiokande à une vitesse proche de celle de la lumière

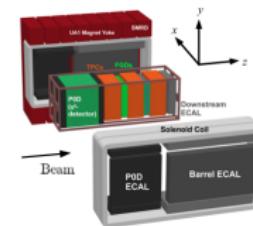


FIGURE 25 – Schéma du détecteur ND280

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION III

## LES DÉTECTEURS DE T2K

### Le détecteur lointain Super-Kamiokande

- ▶ Situé à 1000 mètres sous terre à 295 km de Tokai.
- ▶ Le détecteur SK consiste en une très grande cuve cylindrique d'eau ultra-pure.
- ▶ Même si la plupart des neutrinos passent sans interagir :
  - ▷ mais avec leurs énergies élevées et l'intensité du faisceau
  - ▷ certains vont interagir avec les molécules d'eau.

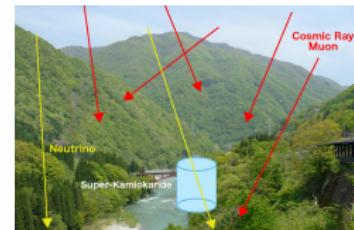


FIGURE 26

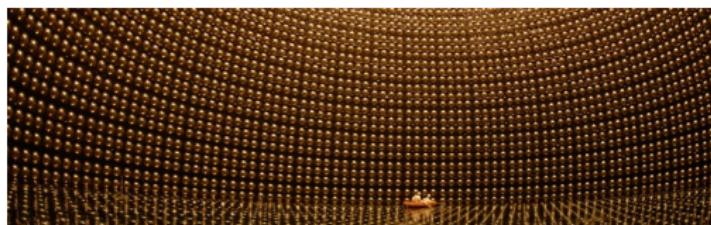
# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION SUPER-KAMIOKANDE (JAPON)

## Détections

- ▶ Les parois de Super-K sont tapissées de plus de 10 000 tubes photomultiplicateurs, qui détectent le cône de lumière Tcherenkov sous forme d'anneau.



(A) Photomultiplicateurs.



(B) Photographie du détecteur Super-Kamiokande.

## EXPÉRIENCE DE DÉTECTION SUPER-KAMIOKANDE (JAPON)

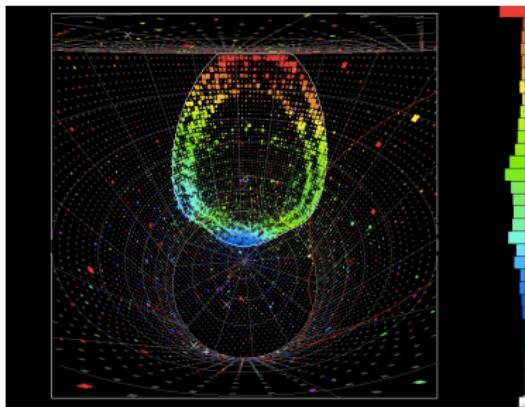


FIGURE 28 – Les muons (produisent un anneau net)

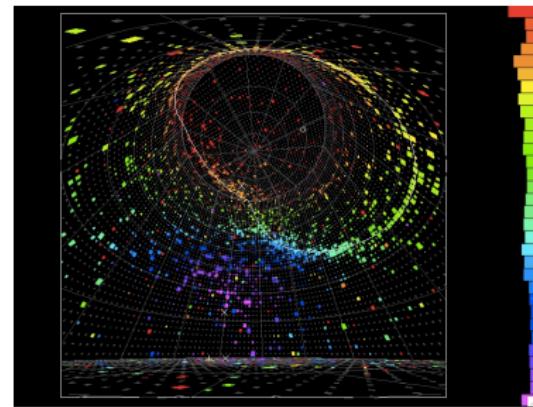


FIGURE 29 – Les électrons (produisent un anneau diffus)

## EXPÉRIENCE DE DÉTECTION

FERMILAB (USA)

### Historique du laboratoire Fermilab

**1970'** : Début des recherches sur les neutrinos.

**1999** : 1<sup>re</sup> expérience de  $\nu$  à longue distance pour étudier l'oscillation par MINOS.

**2000** : 1<sup>re</sup> observation directe d'un  $\nu_\tau$  par l'expérience DONUT.

### Objectifs de Fermilab

L'étude des neutrinos est faite pour

- ▶ comprendre l'origine de la matière,
- ▶ l'unification des forces
- ▶ et le Big Bang



## EXPÉRIENCE DE DÉTECTION

FERMILAB (USA)

### ICARUS

Le détecteur de neutrinos ICARUS recherche des neutrinos stériles dans le cadre du programme de neutrinos à courte base du Fermilab. Le détecteur a vu le jour au laboratoire du Gran Sasso, en Italie, et a été remis en état au CERN avant de rejoindre la chasse aux neutrinos au Fermilab.

### DUNE

L'expérience Deep Underground Neutrino Experiment est une expérience phare internationale visant à percer les mystères des neutrinos. Elle s'appuie sur l'infrastructure de la Long-Baseline Neutrino Facility. Des images supplémentaires sont disponibles auprès de certains partenaires internationaux de DUNE, notamment le CERN et le laboratoire Sanford.

### MicroBooNE

L'expérience MicroBooNE au Fermilab utilise un détecteur de la taille d'un bus scolaire pour étudier les particules fondamentales appelées neutrinos.

## EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)

### Historique (Observation directe du $\nu_\tau$ )

**1994 :** Expérience DONUT approuvée

**1997 :** Début de la prise de données le 14 avril 1997

**2000 :** Annoncé de la 1<sup>re</sup> preuve directe du  $\nu_\tau$  le 21 juillet 2000.

### *Les résultats scientifiques de DONUT*

### À la recherche de la pièce manquante

- ▶ Pour compléter le Modèle Standard des Particules, il manque : le  $\nu_\tau$ .
- ▶ Grâce à 2 ans de données, la collaboration DONUT a annoncé :
  - ▷ la première preuve directe du  $\nu_\tau$ , le troisième type de neutrino connu.
  - ▷ grâce à 4 cas de neutrino interagissant avec un noyau pour produire un lepton  $\tau$ .
- ▶ Ce  $\nu_\tau$  complète la description théorique qui regroupe toutes les particules en 3 générations :
  - 1956 :** La 1<sup>re</sup> génération,  $\nu_e$
  - 1962 :** La 2<sup>e</sup> génération,  $\nu_\mu$
  - 2000 :** La 3<sup>e</sup> génération,  $\nu_\tau$

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

## DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)

### Creating a Tau Neutrino Beam

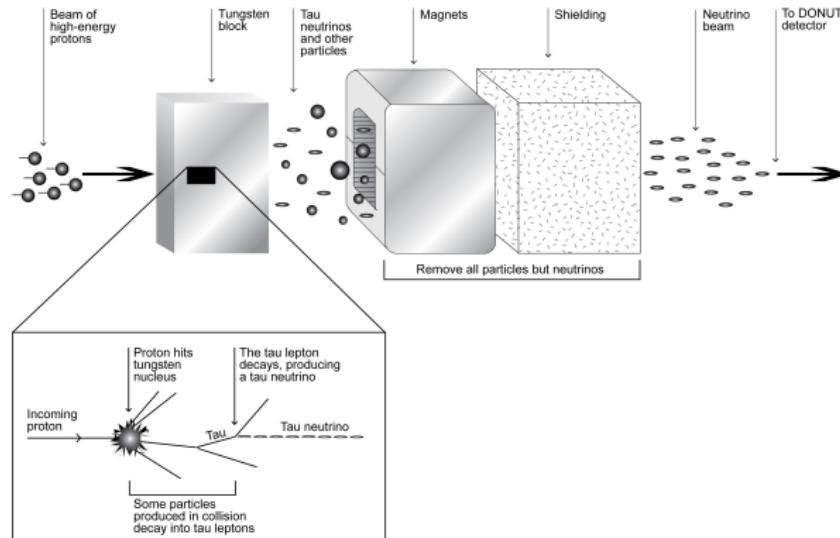


FIGURE 30 – Découverte des  $\nu_\tau$  avec l'expérience DONuT Graphiques - Crédit d'un faisceau de  $\nu_\tau$  pour l'expérience DONuT

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

## DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)

### DONUT Detector

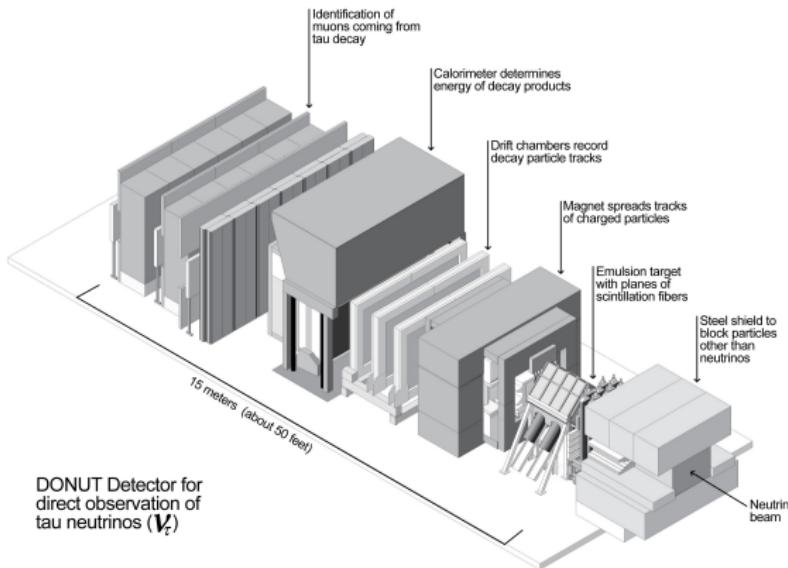
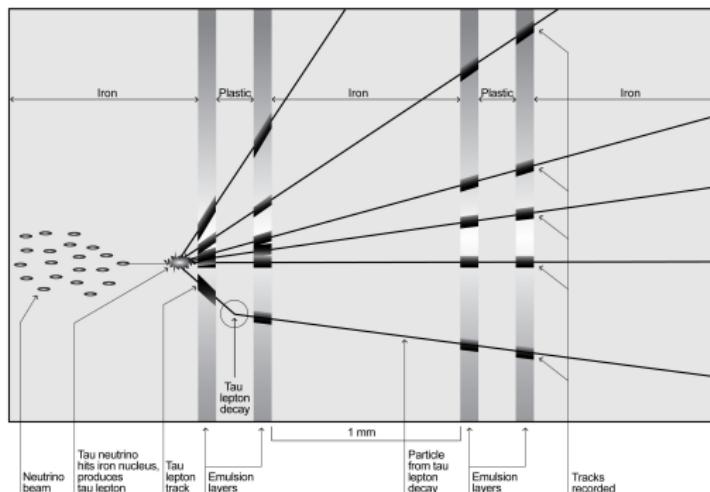


FIGURE 31 – Découverte du  $\nu_\tau$  avec l'expérience DONUT - Le détecteur DONUT

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)

## Detecting a Tau Neutrino



Of one million million tau neutrinos crossing the DONUT detector, scientists expect about one to interact with an iron nucleus.

**FIGURE 32 – Graphique de la découverte d'un  $\nu_\tau$  avec l'expérience DONuT - Détection d'un  $\nu_\tau$  avec l'expérience DONuT**

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

## DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)

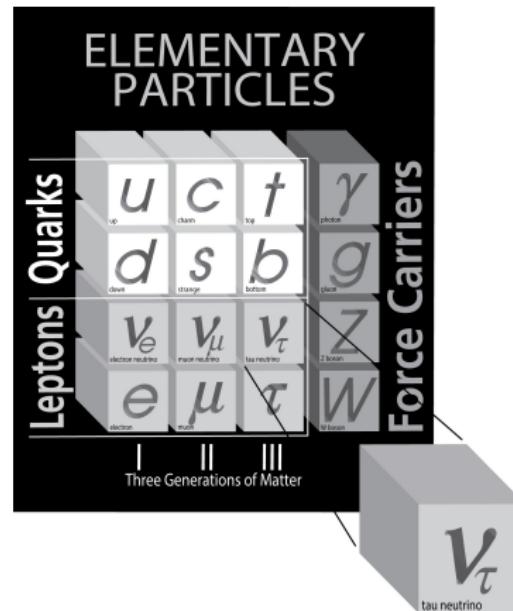


FIGURE 33 – Découverte du  $\nu_\tau$  avec l'expérience DONuT - Le  $\nu_\tau$  - une des particules élémentaires du modèle standard

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)

## DONUT Target Station

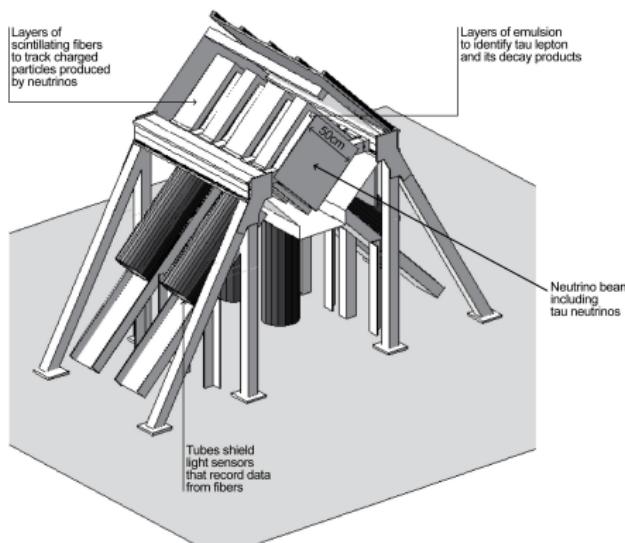


FIGURE 34 – Découverte du  $\nu_\tau$  avec l'expérience DONuT graphiques - La station cible DONuT

## EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)



FIGURE 35 – Aimants dans le tunnel du Tevatron.

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

## DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)



FIGURE 36 – Vue aérienne de la source d'antiprotons

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB DONUT (DIRECT OBSERVATION OF THE NU TAU)



FIGURE 37 – "Lever de lune sur la tour" Coucher de soleil et Wilson Hall.

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

MINOS (MAIN INJECTOR NEUTRINO OSCILLATION SEARCH)

## Historique (Étude des oscillations des neutrinos)

**1990 :** Proposition de l'expérience MINOS

**1995 :** Construction approuvée

**2003 :** Début de la prise de données avec le détecteur lointain

- Détection des neutrinos atmosphériques créés par les rayons cosmiques.

**2013 :** Lancement de la seconde phase, MINOS+

**2016 :** Arrêt de l'expérience.



**FIGURE 38 –** Vue aérienne du site avec NuMI - MINOS BeamLINE et carte du Midwest "Making a Neutrino Beam".

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

MINOS (MAIN INJECTOR NEUTRINO OSCILLATION SEARCH)

## La 1<sup>re</sup> expérience de neutrinos à longue base de Fermilab

- ▶ Le programme de neutrinos a commencé avec la construction :
  - ▷ du faisceau NuMI (Neutrinos à l'Injecteur Principal) :
    - > Situé au Fermilab à Batavia
  - ▷ l'expérience MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search) :
    - > Situé dans l'Illinois à la mine Soudan dans le nord du Minnesota
- ▶ Un détecteur "proche" a analysé le faisceau près de sa source sur le site de Fermilab
- ▶ Un détecteur "loin" plus grand au Minnesota cherche des changements dans le faisceau de neutrinos.
- ▶ Pendant sa course, MINOS impose des contraintes sur les paramètres d'oscillations des neutrinos et sur les propriétés des hypothétiques neutrinos stériles.

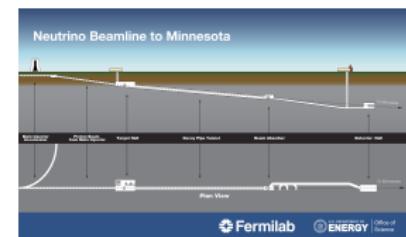


FIGURE 39 – NuMI - Illustration de la ligne de faisceau NuMI au Minnesota pour les expériences NOvA, MINOS et MINERvA

# EXPÉRIENCE DE DÉTECTION CHEZ FERMILAB

MINOS (MAIN INJECTOR NEUTRINO OSCILLATION SEARCH)

## Comprendre les oscillations des neutrinos

- ▶ Expérience de neutrino longue ligne de base
- ▶ Conçue pour observer les phénomènes d'oscillations de neutrinos. :
  - ▷ l'abondance de la matière dans l'univers
  - ▷ ouvrir la voie à une nouvelle physique.
- ▶ Ils étudient l'oscillation des neutrinos de trois façons. :
  - ▷ Mesurent la vitesse d'oscillation des  $\nu_\mu$
  - ▷ Recherche d'autres types de neutrinos
  - ▷ Recherchent l'apparition de  $\nu_e$  à partir de  $\nu_\mu$ , pour mesurer les effets de violation de CP avec des neutrinos.
- ▶ MINOS utilise deux détecteurs :
  - ▷ à la source des neutrinos à Fermilab
  - ▷ à la mine Soudan au nord du Minnesota situé à 450 miles :
    - > un détecteur d'acier de 6 000 tonnes
    - > recherche des neutrinos qui ont changé de saveurs
- ▶ Début de l'expérience en février 2005 :
  - ▷ Sur plus d'un billion de neutrinos qui traversent le détecteur MINOS chaque année, seulement environ 1 500 entrent en collision avec les atomes à l'intérieur du détecteur

# OBSERVATOIRE À NEUTRINO

ICECUBE

## Schéma du détecteur IceCube

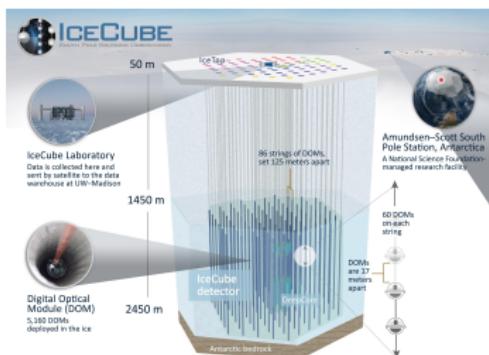


FIGURE 40 – Crédit : IceCube/NSF

- ▶ L'observatoire de neutrinos IceCube instrumente un volume d'environ  $1 \text{ km}^3$  de glace antarctique claire au pôle Sud.
- ▶ Plus de 5 000 modules optiques numériques (DOM) sont gelés à des profondeurs comprises entre 1 450 et 2 450 m.
- ▶ L'observatoire comprend un sous-détecteur densément instrumenté, DeepCore, et un réseau de douches d'air en surface, IceTop.

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino

#### Le Nombre de Neutrino

- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

# COMBIEN EXISTE-T-IL DE SAVEURS DE NEUTRINO ?

## PRÉSENTATION DU LEP

### *Large Electron-Positron Collider [1989 – 2000]*

- ▶ Ancêtre du LHC
- ▶ Collisionneur du CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire)
- ▶ 27 km de circonférence
- ▶ Accélérateur électron-positron
- ▶ Énergie initiale  $\sim 91$  GeV :
  - ▷ usine à Z
  - ▷ Énergie finale  $> 209$  GeV

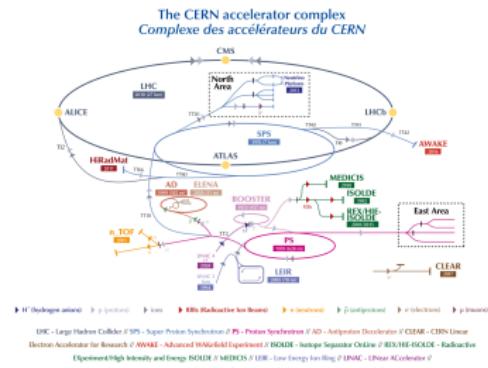
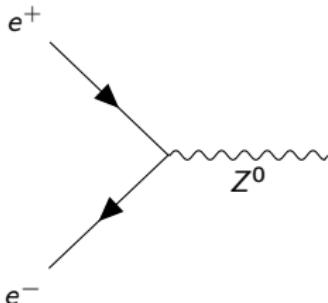


FIGURE 41 – 2022-2024 CERN

# COMBIEN EXISTE-T-IL DE SAVEURS DE NEUTRINO ?

## FONCTIONNEMENT DU LEP

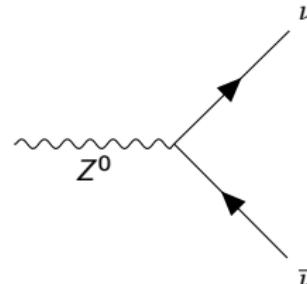
### La collision



**FIGURE 42 – Vertex Interaction Faible par courant neutre**  $e^+ + e^- \longrightarrow Z^0$

- ▶ Lorsqu'un électron et un positron entrent en collision, ils s'annihilent soit un photon, soit un boson Z.
- ▶  $\sim 17$  millions de Z produit

### La désintégration



**FIGURE 43 – Vertex de création de l'interaction faible par courant neutre :**  $Z^0 \longrightarrow \nu + \bar{\nu}$

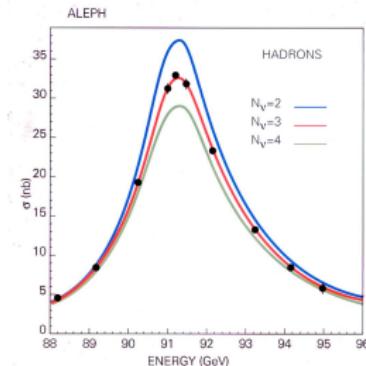
- ▶ Le boson Z se désintègre toute suite
- ▶ Compte le nombre de saveurs de neutrinos qui se couple avec Z

# COMBIEN EXISTE-T-IL DE SAVEURS DE NEUTRINO ?

DÉCOMpte DU NOMBRE DE NEUTRINOS LÉGERS

1989 LEP

- ▶ Résultat :
  - ▷ 3 saveurs de neutrinos légers !
- ▶ Limite de l'expérience :
  - ▷ Nécessite une interaction avec le boson  $Z$
  - ▷ neutrinos « légers » :  $m(\nu) < \frac{m(Z)}{2}$

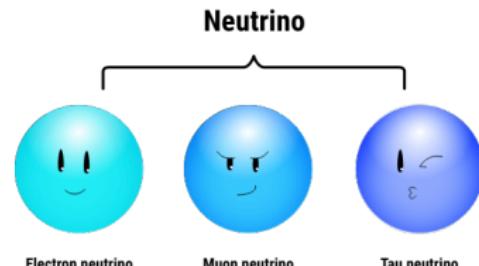


**FIGURE 44 – Mesure précise de la forme de la ligne  $Z^0$  prouvant que la matière est constituée de trois familles de quarks et de leptons**  
CERN-DI-9008004-1

# COMBIEN EXISTE-T-IL DE SAVEURS DE NEUTRINO ?

## LE NOMBRE DE NEUTRINO

### Historique (Découverte des Différentes Saveurs)



**1956 :** Neutrino électronique

**1962 :** Neutrino muonique

**1978 :** Neutrino tauique

**1989 :** Preuve expérimentale du LEP

- ▶ 3 saveurs de neutrinos

- ▶ 3 saveurs de leptons

- ▶ 3 saveurs de quarks

trois générations de matière (fermions)		
I	II	III
masse charge spin	masse charge spin	masse charge spin
$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ u	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ c	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ t
up	charm	top
III	II	I
masse charge spin	masse charge spin	masse charge spin
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ d	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ s	$\approx 41.8 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ b
down	strange	bottom
II	III	III
masse charge spin	masse charge spin	masse charge spin
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ e	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\mu$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ tau
electron	muon	tau
III	II	I
masse charge spin	masse charge spin	masse charge spin
$<1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\nu_e$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\nu_\mu$	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\nu_\tau$
neutrino électronique	neutrino muonique	neutrino tauique

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino**

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

# QUEL EST LA MASSE DES NEUTRINOS ?

## LE MÉCANISME DE HIGGS

### Définition (La vitesse limite, noté $c$ )

$$c \approx 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

- ▶ constante physique de l'Univers
- ▶ vitesse maximale atteignable uniquement par les particules sans masse

### Définition (Mécanisme de Brout-Englert-Higgs-Hagen-Guralnik-Kibble)

- ▶ Les particules sont considérées sans masse
- ▶ Le vide génère un **champ de Higgs**
- ▶ Si une particule interagit avec ce champ, elle ralentit et acquiert sa masse

# QUEL EST LA MASSE DES NEUTRINOS ?

## MESURES ACTUELLES

### Dans le Modèle Standard

Les neutrinos n'ont pas de masse. :

$$m(\nu_e) = m(\nu_\mu) = m(\nu_\tau) = 0 = m(\bar{\nu}_e) = m(\bar{\nu}_\mu) = m(\bar{\nu}_\tau)$$

### Preuves Expérimentales

**Expérience KATRIN<sup>a</sup> de 2019** (*Modèle indépendant*)

$$m(\nu) < 1,1 \text{ eV/c}^2$$

---

a. Karlsruhe Tritium Neutrino

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

SOMMAIRE

UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

CONCLUSION

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

## LA THÉORIE DES TACHYONS

Classement des particules imaginé par Gerald Feinberg en 1968

**Bradyon** : Particules se déplaçant moins vite que la vitesse de la lumière.

**Luxon** : Particules se déplaçant à la vitesse de la lumière.

**Tachyon** : Particules se déplaçant plus vite que la vitesse de la lumière.

Théorie « au-delà » de ce modèle

Définition (Tachyon)

Désigne des particules **théoriques** capables de se déplacer à des vitesses supérieures à celle de la lumière dans le vide.

Ceux qui est impossible selon la Relativité.

# VITESSE DES NEUTRINOS

AU DELÀ DU MODÈLE STANDARD

## 2011, Expérience OPERA, Mesure du temps de vol des neutrinos

**23 septembre 2011** ou *la panique générale*

- ▶ Mesure une vitesse supérieur de  $20 \times 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$  à la vitesse cosmique limite.

**17 novembre 2011** confirmation des résultats

- ▶ Les nouvelles mesures ne changent en rien la conclusion initiale.

**23 février 2012** découverte de 2 effets peuvent influencé les résultats

- ▶ la synchronisations GPS pourrait avoir conduit à **une surestimer**.

- ▶ un connecteur à fibres optiques qui achemine le signal GPS externe jusqu'à l'horloge maîtresse d'OPERA, pourrait ne pas avoir fonctionné correctement au moment où les mesures ont été prises. Ce qui pourrait avoir conduit à **une sous-estimer**.

# VITESSE DES NEUTRINOS

## AU DELÀ DU MODÈLE STANDARD

2011, Expérience OPERA, Mesure du temps de vol des neutrinos

**16 mars 2012** expérience ICARUS au Laboratoire du Gran Sasso

- ▶ une nouvelle mesure qui respecte les limites

**8 juin 2012** Les  $\nu$  envoyés au Gran Sasso par le CERN respectent la limite de vitesse cosmique

- ▶ Borexino, ICARUS, LVD et OPERA ont toutes mesuré un temps de vol des neutrinos inférieur à la vitesse de la lumière
- ▶ mesure initiale d'OPERA est attribuée à un élément défectueux d'un système à fibres optiques de mesure du temps.

## Conclusion

- ▶ Les neutrinos ne sont pas des tachyons
- ▶ Les neutrinos vont à une vitesse inférieure à la vitesse de la lumière :
  - ▷ Les neutrinos ont-ils une masse ?

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon**
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

# COMPTAGE DES NEUTRINOS

## PREMIERS COMPTAGES

### 1968, $\nu_{\text{Solaire}}$

- ▶ Raymond Davis Jr. (et John N. Bahcall)
- ▶ Test de notre compréhension des processus nucléaires du Soleil :
  - ▷ Utiliser des neutrinos pour voir à l'intérieur d'une étoile
  - ▷ Validation directe de l'énergie nucléaire dans les étoiles.

- 
- ▶ Détection des neutrinos solaires
  - ▶ Mais moins que prévu!!!!

### 1987, $\nu_{\text{SN}} 1987A$

- ▶ Supernova dans le Grand Nuage de Magellan :
  - ▷  $20 M_{\odot}$
  - ▷  $\sim 10^{58} \nu$  émis
  - ▷ En 20 s
- ▶ Soit 1000 fois plus d'énergie émise que le Soleil en 4,5 Milliards d'années

- 
- ▶ 11  $\nu$  : Kamiokande
  - ▶ 8  $\nu$  : IMB
  - ▶ Confirmation du manque d' $1/3 \nu$

### 1990, $\nu_{\text{Atmosphérique}}$

- ▶ Le compte des neutrinos est toujours pas bon :
  - ▷ IMB trouve 54% des neutrinos prédict
  - ▷ Kamiokande 57%

# COMPTAGE DES NEUTRINOS

## MANQUE DES NEUTRINOS

### Hypothèses

- 1) Soit les simulations sont fausses
- 2) Soit la prédition du Modèle Standard est fausses
- 3) Soit les données sont mal interprétées

Et si les neutrinos changeaient de type en se déplaçant dans l'espace ?

- Remise en cause de la conservation du nombre leptonique
- Possible si :
  - 1) les neutrinos ont une masse :

$$m(\nu) \neq 0$$

- 2) cette masse est différente pour chaque type :

$$m(\nu_e) \neq m(\nu_\mu) \neq m(\nu_\tau)$$

# COMPTAGE DES NEUTRINOS

## OSCILLATIONS DES NEUTRINOS

### Oscillations des Neutrinos

La probabilité qu'un neutrino change de saveur évolue périodiquement avec la distance.

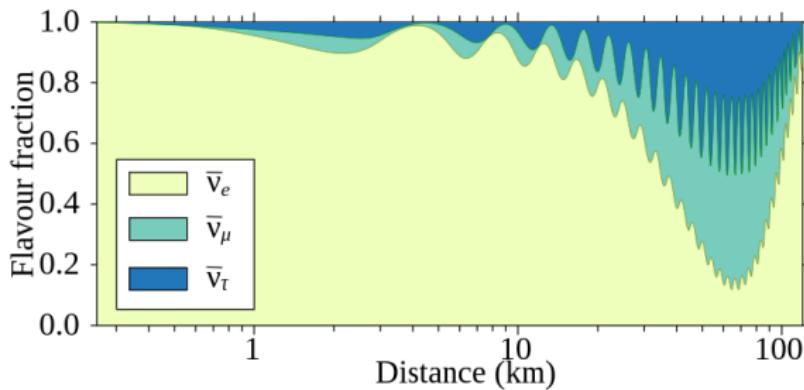


FIGURE 45 – ESA Standard Licence

# COMPTAGE DES NEUTRINOS

ORDRE DE MASSE DES NEUTRINOS

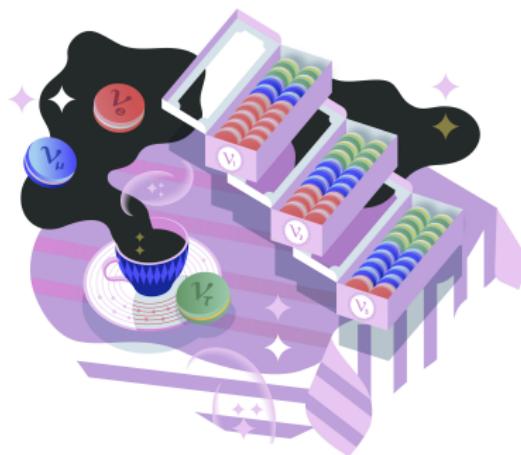


FIGURE 46 – Graphique illustrant la relation entre les états propres de saveur du neutrino et les états propres de masse du neutrino.

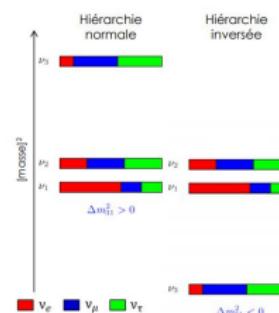


FIGURE 47 –

# COMPTAGE DES NEUTRINOS

## COMPARAISON DES MASSES

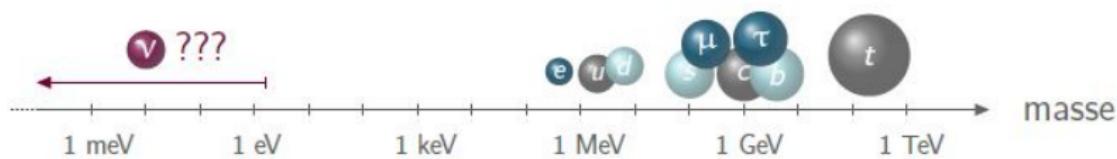


FIGURE 48 –

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon**
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

# LE NOMBRE DE NEUTRINO

## PRÉSENTATION DES NEUTRINOS STÉRILES

### Modèle des neutrinos « stériles »

Neutrinos supplémentaires massifs mais sans interaction électrofaible



$\nu_e$  electron neutrino     $\nu_\mu$  muon neutrino     $\nu_\tau$  tau neutrino     $\nu_s$  sterile neutrino



(A) Des Neutrinos supplémentaires

(B) Un Neutrino plus massif

(C) Un Neutrino qui se mélange

- ▶ Hypothèse sans vérification expérimentale
- ▶ Expliquer une anomalie observée sur le flux des antineutrinos de réacteurs.
- ▶ Nucléosynthèse stellaire :
  - ▷ production de noyaux lourds par des neutrons rapides
  - ▷ au cours des bursts de neutrinos lors de supernova

# NEUTRINO

## HYPOTHÈSE DE MATIÈRE NOIRE

### La « Matière Noire »

- ▶ Matière **hypothétique** du Modèle  $\Lambda$ CDM
- ▶ « Observations indirectes par ses conséquences gravitationnelles »
- ▶ « La majorité de la matière de l'Univers serait invisible » :
  - ▷ Matière Ordinaire :
    - > nuages de gaz
    - > étoiles mortes et naines brunes
    - > trous noirs
- ▶ Expliquerait la vitesse de rotation de galaxie

### L'hypothèse : Neutrino

- ▶ Les neutrinos interagissent très peu avec la matière, sont massifs et très nombreux (2<sup>e</sup> particule la plus abondante après le photon)
- ▶ Mais il ne le sont pas assez pour expliquer toute la masse manquante. :
  - ▷ Au plus 18% de la masse de l'Univers

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose**

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

# LA NATURE DES FERMIONS

FERMION DE DIRAC OU DE MAJORANA

## Fermion de Dirac

- ▶ Fermion qui a une antiparticule différente.



Photo from the Nobel Foundation archive.

Paul Adrien Maurice Dirac  
The Nobel Prize in Physics 1933

Born: 8 August 1902, Bristol, United Kingdom

Died: 20 October 1984, Tallahassee, FL, USA

Affiliation at the time of the award: University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom

Prize motivation: "for the discovery of new productive forms of atomic theory"

Prize share: 1/2

### Exemples :

- ▷ Les fermions chargés
- ▶ Les quarks
- ▶ Les leptons chargés

## Fermion de Majorana

- ▶ Fermion qui est sa propre antiparticule.



**FIGURE 50 – Ettore Majorana (1906-1959)**

### Exemples :

- ▷ Le neutralino<sup>a</sup>

a. particule hypothétique dans les modèles supersymétrique et la théorie des cordes

# LA NATURE DES NEUTRINOS

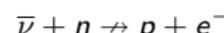
RECHERCHE DE DIFFÉRENCE ENTRE LES  $\nu$  ET LES  $\bar{\nu}$

## Expérience de Davis (1955)

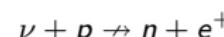
**1953 Hanford**



**1955 Expérience de Davis Prix Nobel 2002**



**1956 Savannah River**



**L'expérience inverse n'est pas détectée !**

## Expériences du Fermilab

- ▶ Des faisceaux d'antineutrinos muoniques sont produits par deux expériences MINOS<sup>a</sup> et BooNE<sup>b</sup> :
  - ▷ Les antineutrinos ne semblent pas se comporter comme des neutrinos, ce qui contredit la théorie (symétrie  $CPT$ )

- 
- a. Main Injector Neutrino Oscillation Search
  - b. Booster Neutrino Experiment

# LA NATURE DES NEUTRINOS

## L'HÉLICITÉ

### Historique

**1958 : preuve expérimentale que le neutrino à une hélicité négative**

► Maurice Goldhaber, Lee Grodzins et Andrew Sunyar

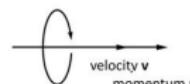
### Hélicité des Neutrinos

- Hélicité négative
- Hélicité gauche
- Les neutrinos se propagent dans le sens de son spin.

### Hélicité des Anti-Neutrinos

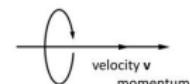
- Hélicité positive
- Hélicité droite
- Les antineutrinos se propagent dans le sens opposé à son spin.

Neutrino (left-handed)



$$\text{helicity} = m_z/s = -1$$

Anti-neutrino (right-handed)



$$\text{helicity} = m_z/s = +1$$

# LA NATURE DES NEUTRINOS

MODÈLE AU DELÀ DU MODÈLE STANDARD

## Modèle de la « balançoire » ou see-saw

**Nombre :** On introduit, par symétrie :

- ▶ un neutrino de chiralité droite
- ▶ un antineutrino de chiralité gauche

**Masse :** Supposés très massifs

- ▶ La masse des neutrinos gauches est inversement proportionnelle à celle des neutrinos droite.
- ▶ Ce qui explique la faible masse des neutrinos gauches.

**Nature :** particules de Majorana.

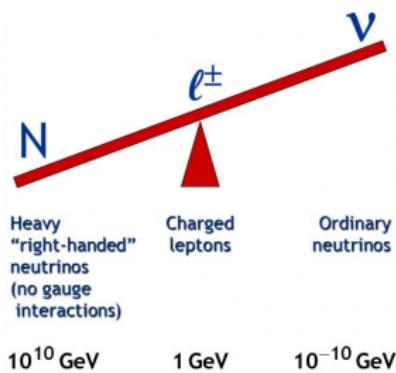


FIGURE 51 – Donc plus les neutrinos droits sont lourds, plus les gauches sont légers.

# LA NATURE DES NEUTRINOS

MODÈLE DU SEE-SAW, AU DELÀ DU MODÈLE STANDARD

## Une explication de l'asymétrie matière/antimatière

- ▶ Les neutrinos droits se sont désintégrés quand l'Univers était très jeune :
  - ▷ La leptogénèse : *la formation des leptons dans l'Univers primitif.*
  - ▷ La baryogénèse : *l'une ou des périodes de formation des baryons au sein de l'univers primordial.*
- ▶ Induit la brisure de la symétrie  $\mathcal{CP}$  des leptons.
- ▶ Expliquer la dissymétrie matière/antimatière de notre Univers

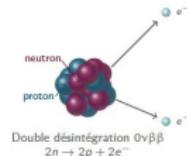
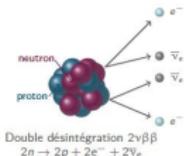
---

### Conditions de Sakharov :

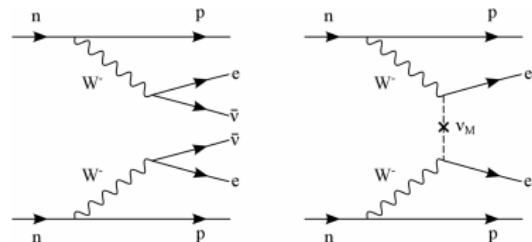
- 1) Loi différente pour la matière et l'antimatière
  - ▶ violation de la symétrie C et de CP
- 2) Violation de la conservation du nombre baryonique
  - ▶ non nul à l'issue de la baryogénèse
- 3) Rupture de l'équilibre thermique
  - ▶ l'équilibre thermique, élimine l'excès de baryons

# LA NATURE DES NEUTRINOS

LES EXPÉRIENCES DE « DOUBLE DÉSINTÉGRATION BÊTA AVEC/SANS ÉMISSION DE NEUTRINOS »



(A) Double désintégration  $\beta$

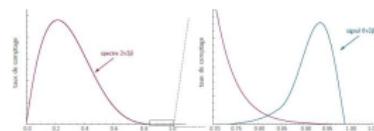


(B)  $2\nu\beta\beta$  et  $0\nu\beta\beta$

Crédit photo : Centre d'Erlangen pour la physique des astroparticules (ecap)

## Les détecteurs de double désintégration $\beta$

- Déetecte le spectre de la double désintégration  $\beta$  avec émission de  $2\nu$  :
  - ▷ afin de chercher l'existence d'une double désintégration  $\beta$  sans émission de  $\nu$ ,
  - ▷ ce qui prouverait que le neutrino et l'anti-neutrino sont une seule et même particule.



# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

SOMMAIRE

UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

CONCLUSION

# LA PHYSIQUE MULTI-MESSAGER

## LE MESSAGER « NEUTRINO »

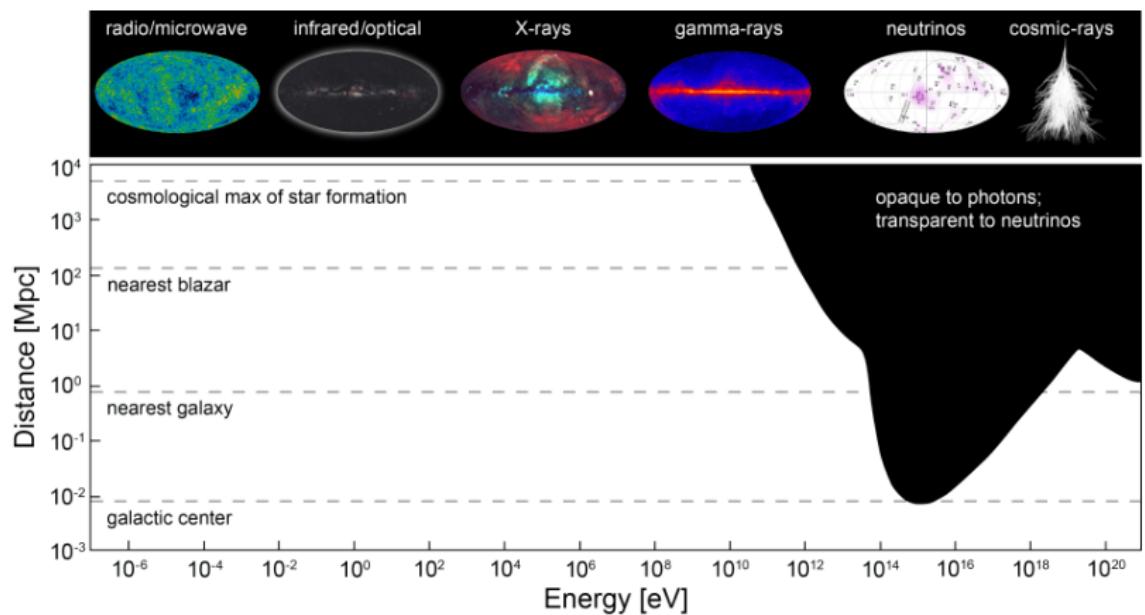


FIGURE 53

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

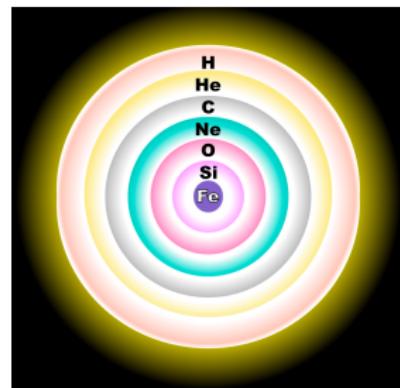
### CONCLUSION

## SOURCE DE NEUTRINOS

# LES NEUTRINOS DE SUPERNOVAE, $\nu_{\text{SUPERNOVAE}}$

## Supernovae à Effondrement de Cœur

- ▶ Coeur du **groupe du fer**
  - ▶ La fusion s'arrête (car plus de création d'énergie)
  - ▶ Le coeur de l'étoile refroidit
  - ▶ La pression de radiation baisse
  - ▶ La pression des électrons se maintient
  - ▶ Quand le coeur de l'étoile atteint la Masse de Chandrasekhar
  - ▶ Effondrement gravitationnel du coeur
  - ▶ **Supernova de type II**



**FIGURE 54 –** Représentation de la structure en « oignon »

# ICECUBE RECHERCHE DES SUPERNOVAE GALACTIQUES À EFFONDREMENT DU NOYAU

## Les Neutrinos de SuperNova, $\nu_{\text{SN}}$

- ▶ Après une nouvelle étoile observée, ou être obscurci par la poussière ou consommé par un trou noir.
- ▶ Émission de  $\nu_{\text{burst}}$  :
  - ▷ Pendant l'effondrement et l'explosion
  - ▷ Faible énergie  $\sim \text{MeV}$  :
    - > Plus leur énergie est faible, plus il est difficile de détecter les neutrinos
    - > 1  $\nu_{\text{burst}}$  sur 500 détecté dans IceCube's.
    - > Cependant,  $\nu_{\text{burst}}$  est extrêmement intense
      - Taux d'excès de neutrinos pour les retracer jusqu'à une supernova en développement.
  - ▷ Seule preuve d'une supernova obscurcie.
- ▶ IceCube :
  - ▷ peut détecter des neutrinos de plus faible énergie.
  - ▷ Recherche de SN à effondrement de coeur galactique caché
  - ▷ IceCube devrait voir plus de 99% des supernovae des futurs magnétar :
    - > 11 ans de données prises par IceCube.
    - > Aucune preuve dans la Voie lactée
    - > Aucune preuve dans les galaxies naines voisines
    - > Normal car le temps moyen entre les explosions de supernova galactique est d'environ 60 ans

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie**
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

# NOTRE GALAXIE VUE À TRAVERS UNE NOUVELLE LENTILLE

LES NEUTRINOS DÉTECTÉS PAR ICECUBE

- ▶ 1<sup>re</sup> image de la Voie Lactée en utilisant des neutrinos :
  - ▷ 10 ans de données IceCube
  - ▷ 60 000 neutrinos détectés
  - ▷ Nouvelle vue de notre galaxie du ciel méridional :
    - > centre de notre galaxie - majorité des émissions de  $\nu$  du plan galactique
- ▶ Preuves de l'émission de  $\nu$  à haute énergie de la Voie lactée.
- ▶ Perspectives (avec ces  $\nu$  à haute énergie) :
  - ▷ Recherche leurs sources dans la galaxie.
  - ▷ Recherche nouvelles caractéristiques cachées de notre galaxie.

PARTICULES

NEUTRINOS

UN INDICE POUR COMPRENDRE NOTRE GALAXIE

## NOTRE GALAXIE VUE À TRAVERS UNE NOUVELLE LENTILLE

LES NEUTRINOS DÉTECTÉS PAR ICECUBE



**FIGURE 55 – La Voie lactée en neutrinos.**

Composition d'artiste de la Voie lactée vue à travers une lentille à neutrinos (bleu).

Credit: IceCube Collaboration/U.S. National Science Foundation (Lily Le & Shawn Johnson)/ESO (S. Brunier)

## ICECUBE EXTRAIT AVEC SUCCÈS LES NEUTRINOS COSMIQUES DE PLUS BASSE ÉNERGIE DANS LE CIEL MÉRIDIONAL

- ▶ Un nouvel ensemble de données consistant à démarrer des événements de piste pour mesurer le flux de neutrinos astrophysiques de plus faible énergie.
- ▶ Identification des neutrinos muoniques à des énergies  $< 100$  TeV d'origine cosmique :
  - ▷ Difficile car l'arrière-plan dépassait en nombre les neutrinos cosmiques d'un sur 10 millions
- ▶ Une analyse future utilisera le nouvel ensemble de données pour confirmer l'émission de neutrinos à haute énergie de la Voie lactée.
- ▶ L'ensemble de données permettra de mieux différencier les émissions de neutrinos diffuses ou ponctuelles de la Voie lactée.

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

## SOMMAIRE

### UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

- Le Modèle Standard des Particules
- La Physique Quantique
- Les Symétries

### UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

- Une Découverte récente
- La Physique des Neutrinos
- La Détection des Neutrino
- Expériences sur les Neutrino
- Le Nombre de Neutrino
- La Masse des Neutrino

### OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

- Panique à bord
- Le Compte n'est pas bon
- Le Compte n'est toujours pas bon
- Et si c'était autre chose

### LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

- Un indice pour les Supernovae
- Un indice pour comprendre notre Galaxie
- Un indice pour comprendre les Trous noirs

### CONCLUSION

# LES NEUTRINOS ICECUBE NOUS DONNENT UN PREMIER APERÇU DES PROFONDEURS INTÉRIEURES D'UNE GALAXIE ACTIVE

1<sup>RES</sup> PREUVES DE L'ÉMISSION DE NEUTRINOS DE HAUTE ÉNERGIE DE NGC 1068



**FIGURE 56 – Messier 77 et Cetus dans le ciel.**

Pour la première fois, les scientifiques d'IceCube ont trouvé des preuves de l'émission de neutrinos de haute énergie par **Messier 77** (également connu sous le nom de NGC 1068), une galaxie active. Cette illustration montre Messier 77 situé près du côté gauche de la **constellation de Cetus**. Cette galaxie bien étudiée est située à **environ 47 millions d'années-lumière de la Terre**.

Credit: Jack Pairin, IceCube/NSF; NASA/ESA/A. van der Hoeven (insert)

# LES NEUTRINOS ICECUBE NOUS DONNENT UN PREMIER APERÇU DES PROFONDEURS INTÉRIEURES D'UNE GALAXIE ACTIVE

1<sup>RES</sup> PREUVES DE L'ÉMISSION DE NEUTRINOS DE HAUTE ÉNERGIE DE NGC 1068

## La Galaxie NGC 1068 (ou Messier 77)

### Spirale barré (*comme la Voile Lactée*)

- ▶ vue sous un angle qui **obscurcit sa région centrale du trou noir**

### Active (*contrairement la Voile Lactée*)

- ▶ la plupart des **radiations** ne sont pas produites par les étoiles,
- ▶ mais par la **matière tombant dans un trou noir**
- ▶ plus **massif** que notre trou noir inactif.

### De type Seyfert II

- ▶ un tore de **poussière nucléaire** **obscurcit** la majeure partie du **rayonnement de haute énergie** produit par la masse de gaz dense et de particules qui se dirigent vers son centre.



FIGURE 57 – Image de Hubble de la galaxie spirale NGC 1068

Image de Hubble de la galaxie spirale Messier 77, également connue sous le nom de NGC 1068.

Credit: NASA/ESA/A. van der Hoeven

# LES NEUTRINOS ICECUBE NOUS DONNENT UN PREMIER APERÇU DES PROFONDEURS INTÉRIEURES D'UNE GALAXIE ACTIVE

1<sup>RES</sup> PREUVES DE L'ÉMISSION DE NEUTRINOS DE HAUTE ÉNERGIE DE NGC 1068

## Résultats pour NGC 1068 (ou Messier 77)

- ▶ +80 neutrinos d'énergie TeV de NGC 1068<sup>a</sup> :
  - ▷ 1 neutrino suffit pour distinguer une **source**
  - ▷ Chaque neutrino supplémentaire permet de **révéler le noyau obscurci** par des objets cosmiques
  - ⇒ Insuffisant pour répondre à toutes nos questions
- ▶ « Compréhension des **environnements** des **trous noirs supermassifs** »<sup>b</sup> :
  - ▷ Les environnements des trous noirs **bloque les rayons gamma** .
- ▶ NGC 1068, nouvelle bougie standard des futurs télescopes à  $\nu$ <sup>c</sup> ? :
  - ▷ un objet très étudié par les astronomes
  - ▷ les neutrinos nous donnent une nouveau point de vue de cette galaxie
- ▶ IceCube tente de comprendre l'**origine des rayons cosmiques**.
- ▶ Recherche des **objets similaires non identifier**.

a. Francis Halzen (Pr. à l'Univ. de Wisconsin–Madison et chercheur principal de IceCube)

b. Hans Niederhausen (Université d'État du Michigan)

c. Theo Glauch (Université technique de Munich)

# LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

SOMMAIRE

UNE PARTICULE PARMI LES AUTRES

UNE PARTICULE UN PEU PARTICULIÈRE

OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

LES NEUTRINOS DES MESSAGERS COSMIQUES

CONCLUSION

# CONCLUSION



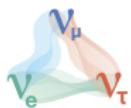
(A) Particules fondamentales



(B) Particules massives les plus abondantes



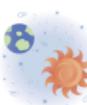
(C) Difficilement mais détectable



(D) Oscillations entre les 3 saveurs



(E) Leurs masses sont si faible qu'elles sont à une vitesse proche de celle de la lumière.



(F) De très nombreuses sources de Neutrino dans l'Univers



(G) 4 types de Neutrinos, dont 1 stérile qui interagit encore moins.

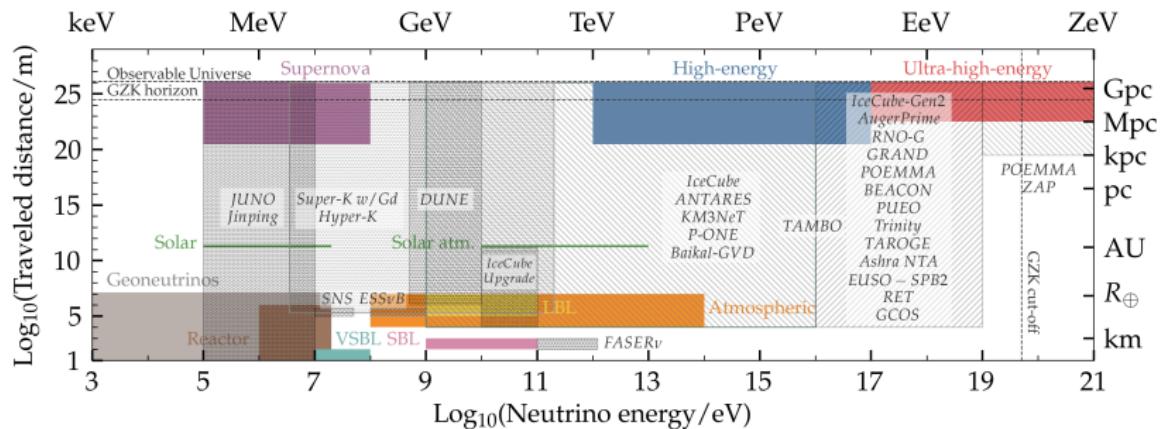


(H) Serait sa propre antiparticule (dissymétrie Matière-AntiMatière)

FIGURE 58 – Les Neutrinos sont...

# CONCLUSION

## LA DÉTECTION DE TOUS LES NEUTRINOS



# UNIFICATION DES FORCES

ICECUBE RECHERCHE LA DÉCOHÉRENCE DES NEUTRINOS À PARTIR DE LA GRAVITÉ QUANTIQUE[4]

## Unification de la théorie quantique et de la gravitation

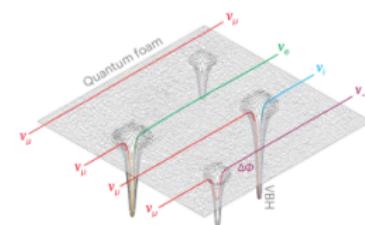
- ▶ **Mystère de la nature quantique de l'espace-temps :**
  - ▷ une fusion des 3 dimensions de l'espace et de la quatrième dimension du temps
  - ▷ soumise au hasard des théories quantiques
  - ▷ fluctuations à de très petites distances et à des moments très courts.
- ▶ **Interaction des  $\nu$  :**
  - ▷ N'interagissent que par la force faible et la gravité,
  - ▷ et isolés car ils se propagent dans l'espace.
- ▶ **L'oscillation des neutrinos est un processus quantique :**
  - ▷ toute perturbation induite par la gravité quantique fausserait la composition de la saveur des neutrinos.
  - ▷ Leurs isolement permet de mesurer la cohérence quantique sur des distances macroscopiques.  
⇒ interféromètres naturels pour sonder la structure de l'espace-temps.

# UNIFICATION DES FORCES

ICECUBE RECHERCHE LA DÉCOHÉRENCE DES NEUTRINOS À PARTIR DE LA GRAVITÉ QUANTIQUE[4]

## Collaboration IceCube

- ▶ Étude qui teste la décohérence des neutrinos à la suite de petites fluctuations dans l'espace-temps causées par la gravité quantique.
- ▶ Aucune preuve de décohérence des neutrinos n'a été observée,
- ▶ mais les contraintes les plus fortes sur les interactions de gravité neutrino-quantique ont été définies.
- ▶ Sonder les petites fluctuations de l'espace-temps qui peuvent émerger de la gravité quantique.
- ▶ Les  $\nu_{\text{atm}}$  - 0,5 à 10 TeV



**FIGURE 59 –** IceCube teste les fluctuations de la métrique de l'espace-temps qui enfreindraient les règles normales de la mécanique quantique pour la propagation des neutrinos.

Credit: IceCube Collaboration

« Nos résultats sont plus d'un million de fois plus forts que les précédents dans des parties bien motivées de l'espace des paramètres » dit Benjamin Jones, un professeur agrégé à l'Université

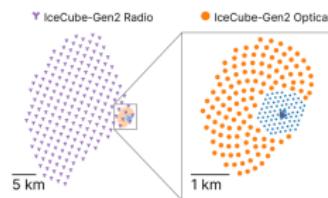
119 / 155

# UNIFICATION DES FORCES

ICECUBE RECHERCHE LA DÉCOHÉRENCE DES NEUTRINOS À PARTIR DE LA GRAVITÉ QUANTIQUE[4]

## Avenir d'IceCube

- ▶ La recherche de la décohérence due à la gravité quantique
- ▶ La dernière d'une série de tests à haute énergie pour IceCube :
  - ▷ y compris la recherche de neutrinos stériles
  - ▷ interactions de neutrinos non standard
  - ▷ la désintégration des neutrinos
- ▶ La poursuite de cette recherche de preuves d'une nouvelle physique au-delà du Modèle standard se poursuivra avec IceCube Upgrade et IceCube-Gen2, et sa promesse d'un ensemble de données plus important et de mesures plus précises.



## CONCLUSION

Merci de votre attention !

# PRÉSENTATION DE LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

CHEZ WIKIPÉDIA

**Neutrino**

**Sommaire** masquer

**Début**

- [Nom](#)
- [Histoire](#)
- [Caractéristiques physiques](#)
- [Vitesse des neutrinos](#)
- [Les neutrinos en physique expérimentale](#)
- [Les neutrinos au-delà du modèle standard](#)
- [Notes et références](#)
- [Voir aussi](#)

**Nom** [ modifier ] [ modifier le code ]

Le substantif masculin<sup>3</sup> *neutrino* est un emprunt<sup>4</sup> à l'italien *neutrino*, dérivé de l'adjectif<sup>5</sup> *neutro*<sup>5, 6</sup> (« neutre ») avec le suffixe<sup>5</sup> diminutif<sup>5, 6</sup> *-ino*<sup>5</sup> (« petit »).

**Histoire** [ modifier ] [ modifier le code ]

En 1930, la communauté des physiciens est confrontée à une énigme : la désintégration  $\beta$  ne semble pas respecter les lois de conservation de l'énergie, de la quantité de mouvement et du spin. Pour satisfaire ces principes, Wolfgang Ernst Pauli postule l'existence d'une nouvelle particule, de charge électrique nulle, qu'il nomme initialement neutron (pour partie neutre, le neutron n'ayant pas été découvert), et dont il estime la masse au moins 100 fois inférieure à celle du proton (lettre du 4 décembre 1930 à Pauli aux participants de la réunion de Tübingen<sup>7</sup>). C'est le physicien italien Edoardo Amaldi qui donne à la nouvelle particule le nom de « neutrino » (en italien : petit neutron), en plaisantant pendant une conversation avec Enrico Fermi à l'Institut de physique des Garçons de la rue Paríspena à Rome, pour le distinguer du neutron, beaucoup plus massif, découvert par James Chadwick en 1932. Fermi utilisa le mot « neutrino » à la

fr.wikipedia.org/wiki/Neutrino

Rechercher sur Wikipédia Rechercher

91 langues ▾

**Neutrinos**

La première observation d'un neutrino dans une chambre à bulles de hydrogène en 1970 : un neutrino (non visible) percute un proton (qui se déplace ensuite le long de la courte ligne, au-dessus de la trace centrale), produisant un muon (à l'origine de la longue trace rectiligne centrale) et un pion (à l'origine de la trace juste en dessous du muon).

Propriétés générales	
Classification	Leptons
Composition	Élémentaires

Propriétés physiques	
Masse	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>v_e &lt; 0,086 \text{ eV}/c^2</math></li> <li><math>v_\mu &lt; 170 \text{ keV}/c^2</math></li> <li><math>v_t &lt; 18 \text{ MeV}/c^2</math></li> <li>la somme des trois &lt; 0,120 <math>\text{eV}/c^2</math> (à 95 % de confiance)<sup>2</sup></li> </ul>
En notant $v_{1,2,3}$ les états propres de masse,	

## RÉFÉRENCES I

-  **La physique quantique en 101 infographies.**  
Larousse, 2022.
-  **Manjit Kumar.**  
*Le grand roman de la physique quantique.*  
Libres Champs, 2020.
-  **Hubert Reeves.**  
*Dernières nouvelles du Cosmos.*  
Points Sciences, 2020.
-  **IceCube Collaboration.**  
Icecube search for neutrino decoherence from quantum gravity.
-  **R. L. Workman and Others.**  
Review of Particle Physics.  
*PTEP*, 2022 :083C01, 2022.
-  **The Nobel Foundation.**  
All nobel prizes in physics.

## RÉFÉRENCES II

-  Jorge Cham and Daniel Whiteson.  
*Tout ce que nous ne savons pas encore.*  
Champs Sciences, 2022.
-  Stephen Hawking.  
*Une brève histoire du temps.*  
Champs Sciences, 2008.
-  Stephen Hawking and Leonard Mlodinow.  
*Y a-t-il un architecte dans l'Univers ?*  
Odile Jacob sciences, 2014.
-  Stephen Hawking and Roger Penrose.  
*La nature de l'espace et du temps.*  
folio essais, 2011.
-  Expérience t2k, 2024.
-  Observatoire kamioka, 2024.
-  Claudia NONES.  
Bingo : une r et d de pointe pour déterminer la vraie nature des neutrinos.

## RÉFÉRENCES III



### [IceCube Collaboration.](#)

Our galaxy seen through a new lens : neutrinos detected by icecube.



### [IceCube Collaboration.](#)

Icecube neutrinos give us first glimpse into the inner depths of an active galaxy.



### [IceCube Collaboration.](#)

Evidence for neutrino emission from the nearby active galaxy ngc 1068.

*Science, 378(6619) :538–543, 2022.*



### [IceCube Collaboration.](#)

Our galaxy seen through a new lens : neutrinos detected by icecube.



### [IceCube Collaboration.](#)

Observation of high-energy neutrinos from the galactic plane.

*Science, 380(6652) :1338–1343, 2023.*