

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

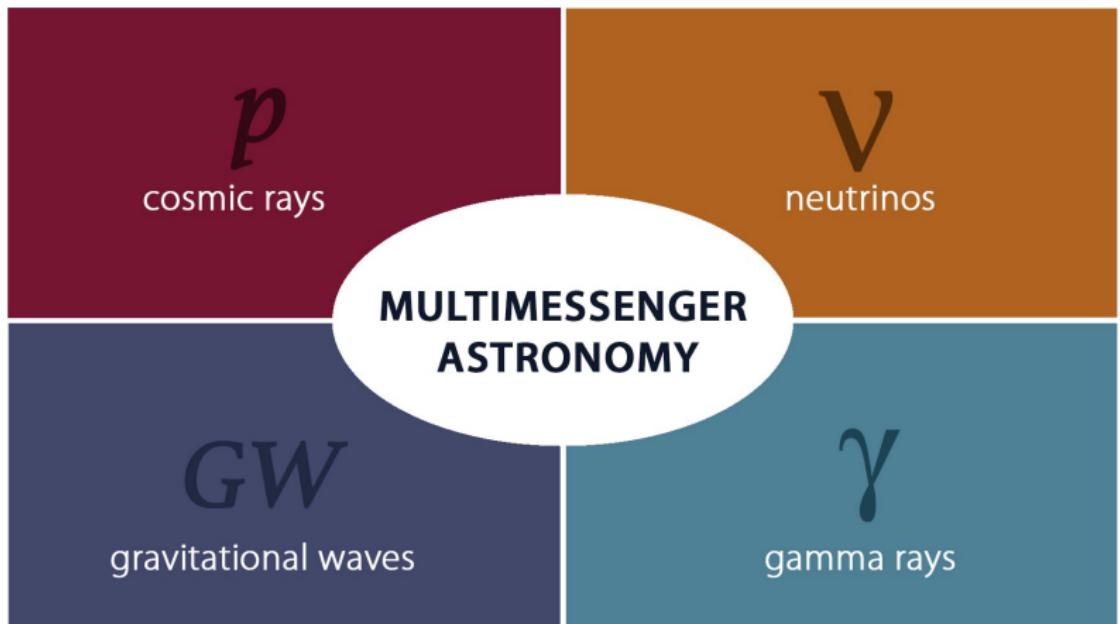


FIGURE 1

PHYSIQUE DES NEUTRINOS

INTRODUCTION

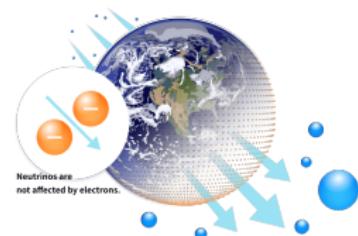
 **neutrino**
 $1 \text{ cm}^3 = 300$

500ml plastic bottle
Neutrino

150,000



(A) Population



(c) Interaction des flux



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

8 minutes

while light takes 10 million years and 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

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

QU'EST-CE QU'UNE PARTICULE ?

Définition (Particule)

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

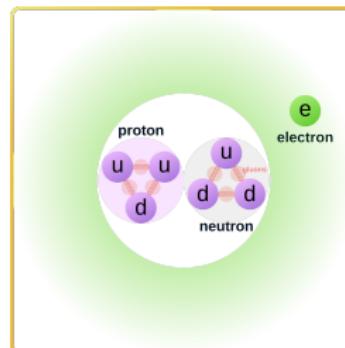
Particule élémentaire

Ce sont les particules *supposées sans constituants internes*.

QUARKS		LEPTONS		BOSONS DE JAUGE
mass → +2.3 MeV/c ²	charge → 2/3	mass → 1.275 GeV/c ²	charge → 2/3	mass → 173.67 GeV/c ²
spin → 1/2	spin → 1/2	mass → 1.73 GeV/c ²	spin → 1/2	spin → 1
up	down	charm	strange	top
mass → 0.8 MeV/c ²	mass → 0.95 MeV/c ²	mass → 4.16 GeV/c ²	mass → 10.7 MeV/c ²	mass → 120 GeV/c ²
charge → -1/3	charge → -1/3	charge → -1/3	charge → -1/3	charge → 0
spin → 1/2	spin → 1/2	spin → 1/2	spin → 1/2	spin → 0
electron	muon	tau	neutrino électronique	boson Z ⁰
mass → <2 eV/c ²	mass → <0.17 MeV/c ²	mass → <15.5 MeV/c ²	mass → <0.4 GeV/c ²	mass → 80.4 GeV/c ²
charge → 0	charge → 0	charge → 0	charge → 0	charge → ±1
spin → 1/2	spin → 1/2	spin → 1/2	spin → 1/2	spin → 1
neutrino électronique	neutrino muonique	neutrino tauique	W ⁺	W ⁻

Particule composite

Une particule qui est composée d'autres particules.



QUELLES SONT LES FORCES DU MODÈLE STANDARD ?

Illustration: Typeform

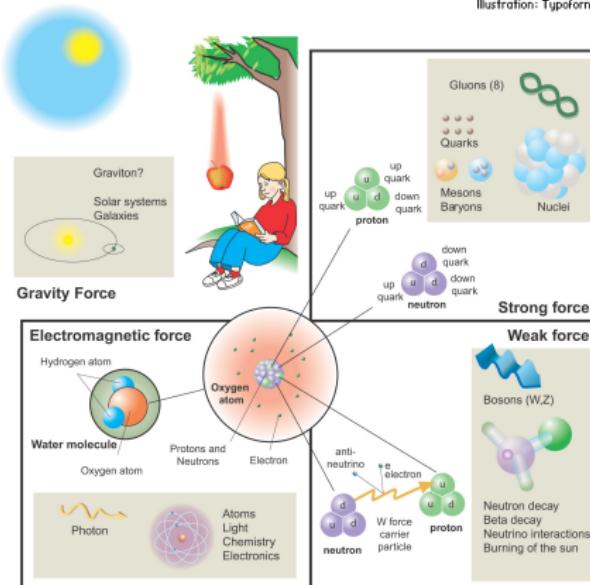


FIGURE 3 – Les quatre forces (ou interactions) de la nature, leurs particules porteuses de force et les phénomènes ou particules qu'elles affectent. Les trois interactions qui régissent le microcosme sont toutes beaucoup plus puissantes que la gravité et ont été unifiées par le modèle standard.

LE MODÈLE STANDARD DES PARTICULES

Définition (Modèle Standard des Particules)

Théorie qui classe et explique les comportements des particules élémentaires.

Physique

- la Physique Quantique
 - les Symétries

Validé expérimentalement :

- jusqu'à un certain niveau d'énergie

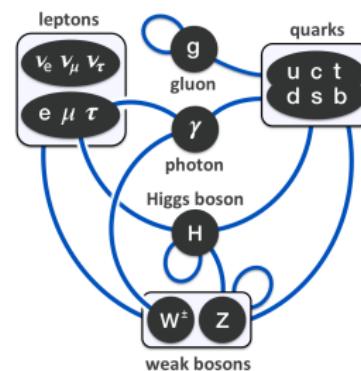


FIGURE 4 – Interaction entre les particules élémentaires du Modèle Standard

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

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^{re} particule subatomique

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

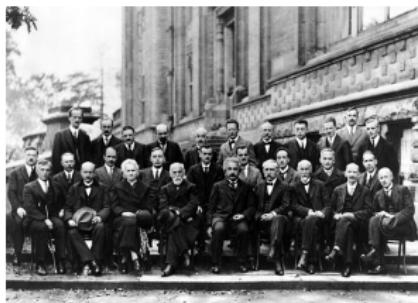
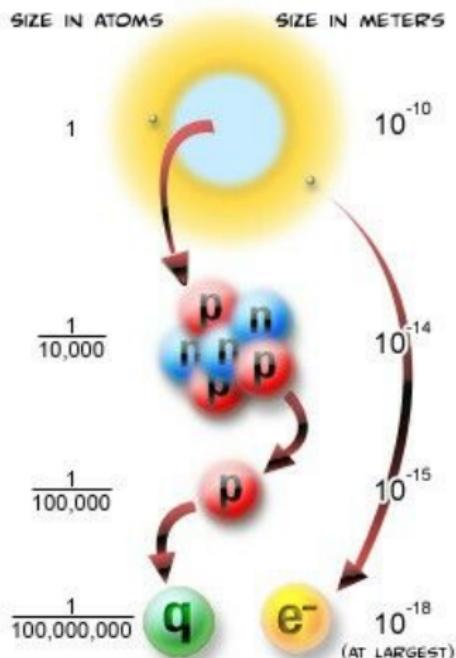


FIGURE 5 – Congrès Solvay de 1927 sur la Mécanique Quantique

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} m

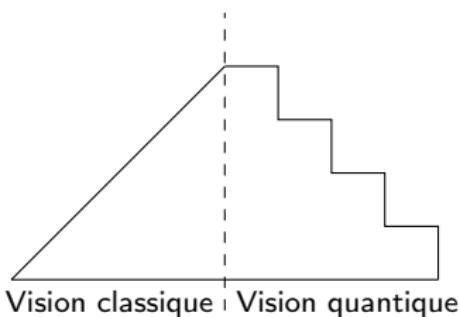
- ▶ La plus petite longueur mesurable.
 - ▶ La plus petite unité de longueur possible.
 - ▶ En dessus, nos théories ne s'appliquent plus, donc plus de prédition.

PRINCIPE QUANTIQUE

LA QUANTIFICATION

Définition (Quantifié(e) [2])

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



Exemples :

► *Énergie quantifiée*

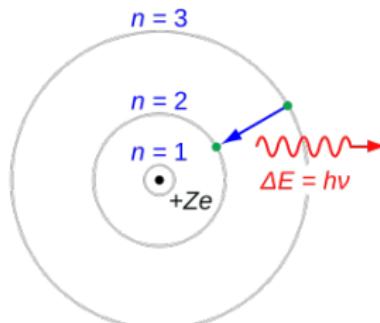


FIGURE 6 – Un atome ne possède que certains niveaux d'énergie [2]

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

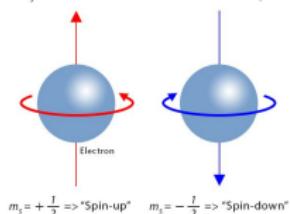
SPIN

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



$$m_s = +\frac{1}{2} \Rightarrow \text{"Spin-up"} \quad m_s = -\frac{1}{2} \Rightarrow \text{"Spin-down"}$$

ChemistryLearner.com

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 (γ , 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} :

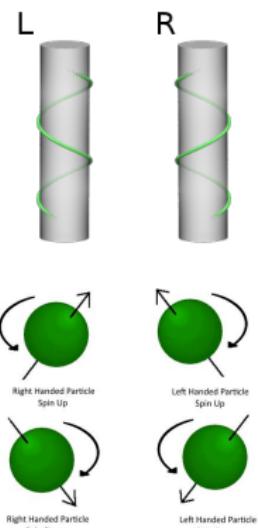
$$h = \vec{S} \cdot \hat{p}$$

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

Gravitationnelles

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

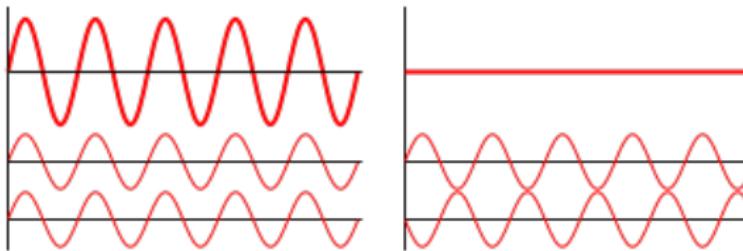


FIGURE 7 – À gauche, interférence constructive. À droite, interférence destructive.

DUALITÉ ONDE-PARTICULE

PRINCIPE QUANTIQUE

Définition (Dualité Onde-Particule)

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

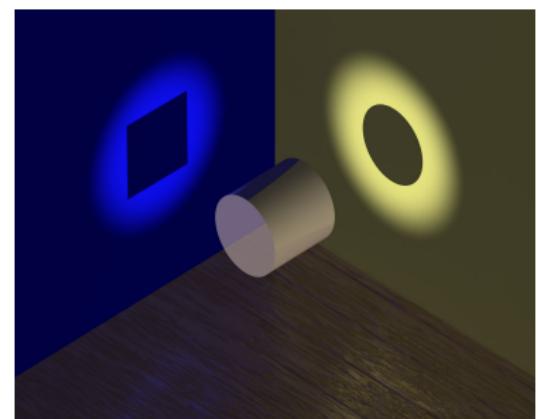


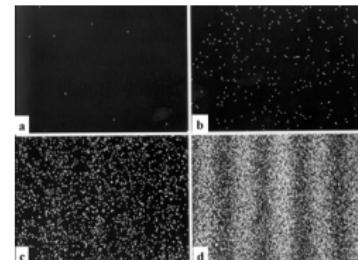
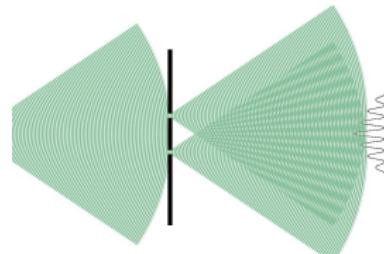
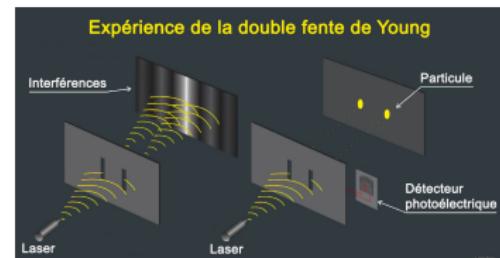
FIGURE 8 — Métaphore du cylindre : perçue comme un cercle ou un rectangle en fonction du point de vue.

DUALITÉ ONDE-PARTICULE

EXEMPLE (LA LUMIÈRE)

Expérience des doubles fentes, 1801

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



PRINCIPE DE SUPERPOSITION

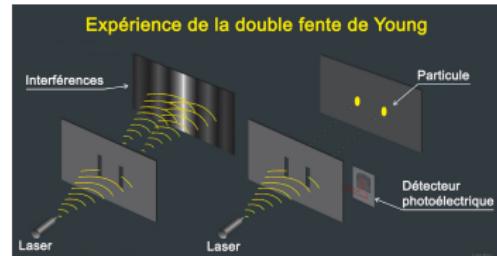
PRINCIPE QUANTIQUE

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

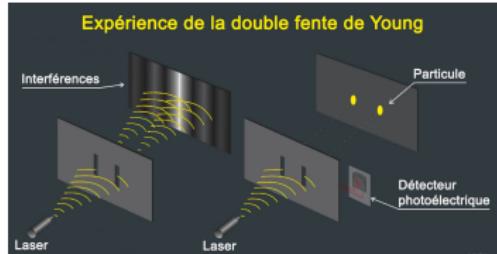
- ▶ L'objet est dans une superposition d'état.
- ▶ Impossible de mesurer plusieurs états superposés.

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 disparait
- ▶ On ne peut pas connaître la fente traversée, sans éliminer le phénomène d'interférence.



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

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 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 \mathcal{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 :

$$Q \longmapsto -Q$$

Quantités conservées

Masse : $m \rightarrow m$

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
- 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

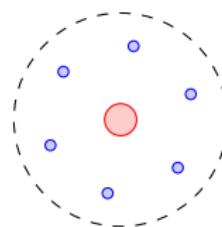


FIGURE 9 – Représentation de l'atome dans l'expérience de Rutherford

VERS LE POSTULAT DU NEUTRINO

HYPOTHÈSE “NEUTRON”

La Radioactivité β^- (*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 10 – 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
 - ▷ Nommais « neutron »
 - ▷ Appartient à l'atome
 - ▷ Serait émis lors de la désintégration β
 - ▷ Spin 1/2
 - ▷ Très faible masse ($\sim 1\% m_p$)
 - ▷ Emporte une partie de l'énergie dans la désintégration β
- ▶ Mais pas encore observé.
- ▶ En 1931, Enrico Fermi renomme le « neutron de Pauli », neutrino

Hoffm. - Postkarte von Tübingen
Abschrift/15.12.30 PW

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiviten bei der
Universitäts-Tageung zu Tübingen.

Abschrift:

Physikalischem Institut
der R. Königl. Technischen Hochschule
Kirch

Bürckel, h. Des. 1930
Überlandstrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberspringer dieser Zeilen, den ich hervorhebt
angehören bitte. Ihnen das schweren auszutändernden ist, wird, bei ihm
angewandt, die "neutrale" Theorie des Neutrons und kann, wenn
das kontinuierliche beta-Spektrum auf einen verwirrlichen Ausweg
verfallen um die "Neutralsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu erhalten, so kann es nicht mehr sein, dass ein Elektron ein solches
Teilchen, das ein Neutron nennen will, in den Raum existieren,
welche den Spin 1/2 haben und das Ausschlusssprinzip befolgen und
sich von Elektronen unterscheiden. Und dann ist unerlässlich, dass die
gleiche mit dem Elektron identisch ist. Wie kann ein Neutron
dann von denselben Ueberschreitung wie die Elektronenmasse sein und
jedemfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche
beta-Spektrum kann nicht mehr bestehen, wenn es ein solches
Beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, dersart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Was handelt es sich weiter, dann, welche Kräfte auf die
Neutrinos wirken. Das wahrscheinlichste Modell ist das, das man scheint
nur aus weiteren physikalischen Gründen (abseits der Theorie der
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment hat. Die Experimente
werden zeigen, ob dies stimmt. Wenn es stimmt, so muss das Neutron
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Spektral und darf dann
etwa wohl nicht grösser sein als $e \cdot 10^{-13}$ cm.

Ich braue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee
zu publizieren und wende mich erst vertraulicher an Ruth, liebe
Radioaktivite, mit der Freude, wie es mir den neuen hellen Himmel
eines solchen Neutrons erscheint, und ein eigenes, der eben
etwas grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein
gamma-Strahl.

Ich geb es, dass mein Ausgang vielleicht von vornherein
zuviel gewagt war. Ich gestehne, dass ich die Theorie der Neutrinos
die entstehen, wohl schon längst geschehen hatte. Aber nur wenige,
und unter der Einheit der Statistik beim kontinuierlichen beta-Spektrum
wird sie bestehen. Ich schreibe Ihnen diesen Brief, damit Sie mir
Herrn Debye, beklagen, dass mir Möglichkeit zu diesem geschenkt
werden soll um an besten gar nicht denken, sowie an die neuen
Experimente daran zu arbeiten. Ich hoffe, Sie werden mich darüber
Alles lieben und achten. Ich schreibe Ihnen diesen Brief, damit Sie
nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht
von 6. auf 7. Des. in Berlin stattfindenden Balles hier unerreichbar
bin. Ich schreibe Ihnen diesen Brief an Ruth, sowie an Herrn Debye, sehr
unterordneter Natur.

Sehr. W. Pauli

VERS LE POSTULAT DU NEUTRINO

THÉORIE DE FERMI, 1933

Théorie de Fermi de la Radioactivité β^- (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

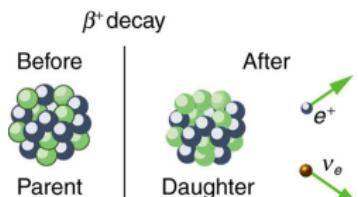


FIGURE 11 – Un neutron du noyau père devient un proton dans le noyau fils en émettant un électron et un neutrino :
 ${}^A_Z X \xrightarrow{{}^A_{Z+1} Y} {}^0_{-1} \beta^- + {}^0_0 \nu_e$

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.

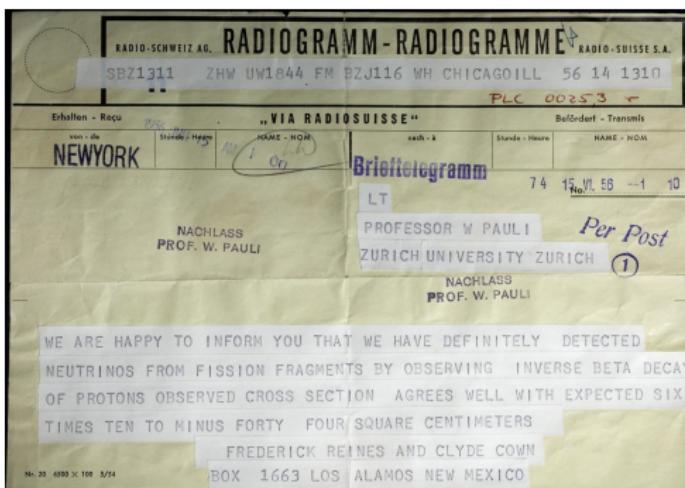


FIGURE 12 – <https://cds.cern.ch/record/970671>

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
- 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 SOURCES DE NEUTRINOS

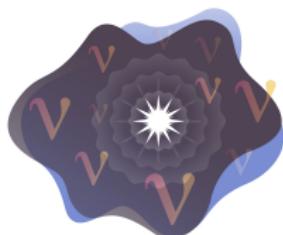


FIGURE 13 – Les scientifiques recherchent les gigantesques flux de neutrinos émis par les étoiles en explosion afin d'observer en temps réel la formation des étoiles à neutrons et des trous noirs et d'en savoir plus sur ces objets mystérieux de l'espace.

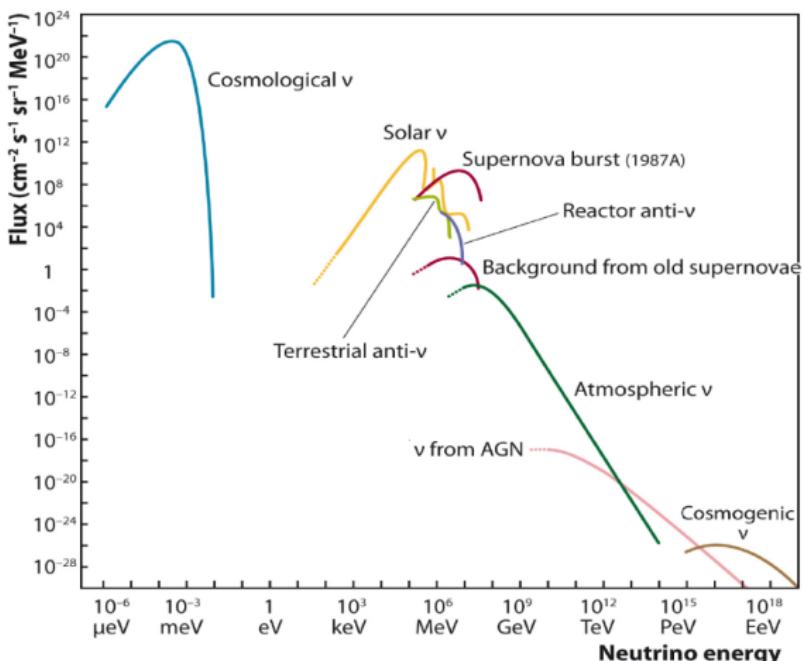


FIGURE 14 – Flux des neutrinos reçus sur Terre

PHYSIQUE DES NEUTRINOS

PROPRIÉTÉS DES PARTICULES

Propriétés des Neutrinos

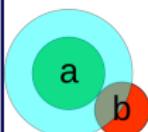
- ▶ Particules élémentaires :
 - ▷ Fermions : Spin 1/2
- ▶ Lepton :
 - ▷ Pas de charge de couleur
 - ▷ Pas d'interaction forte
- ▶ Neutre :
 - ▷ Pas de charge électrique
 - ▷ Pas d'interaction électromagnétique
- ▶ Stable

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

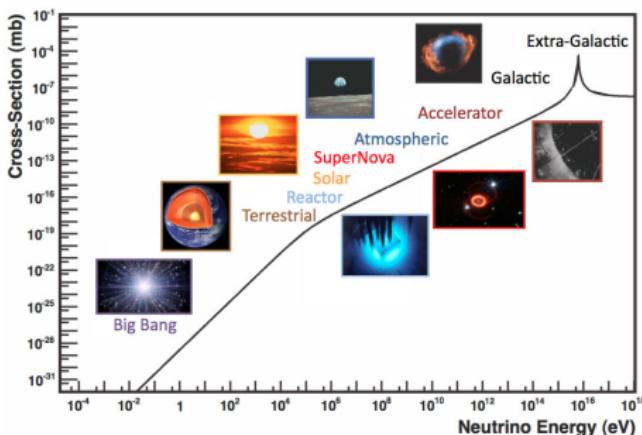


FIGURE 15 – all things neutrino - Fermi National Accelerator Laboratory (USA)

INTERACTIONS DES NEUTRINOS

INTERACTION FAIBLE

Par courant chargé

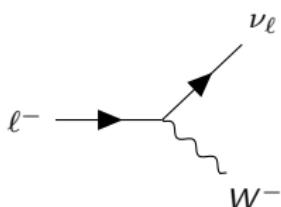
- ▶ W boson médiateur
- ▶ transforme un lepton en anti-neutrino

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

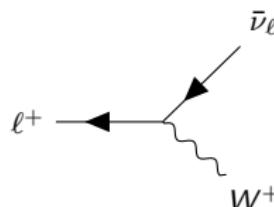
Par courant neutre

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

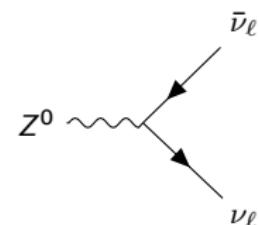
$$\bar{\nu}_\ell \leftrightarrow \nu_\ell$$



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



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



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

FIGURE 16 – 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**
- 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.

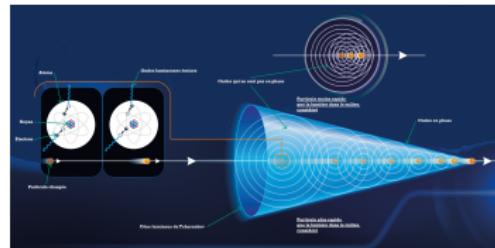


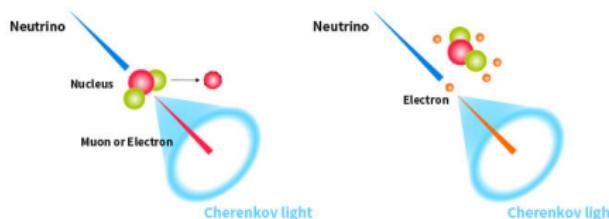
FIGURE 17 – Cône de Tcherenkov

EXPÉRIENCE DE DÉTECTION

SUPER-KAMIOKANDE (JAPON)

Rayonnement de Tcherenkov

- Les interactions des ν_μ produisent en majorité des μ^- , Les ν_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

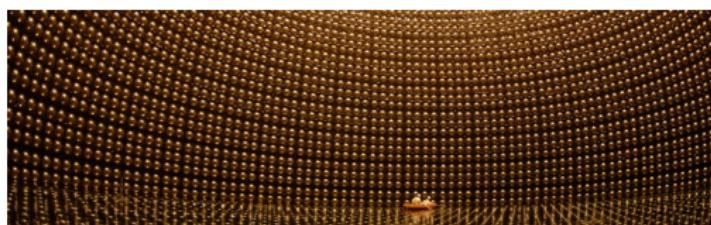
SUPER-KAMIOKANDE (JAPON)

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)

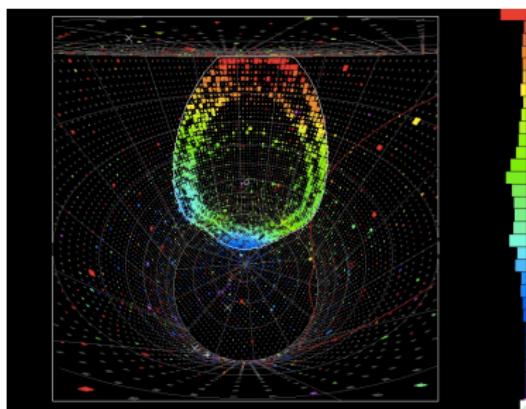


FIGURE 19 – Les muons (produisent un anneau net)

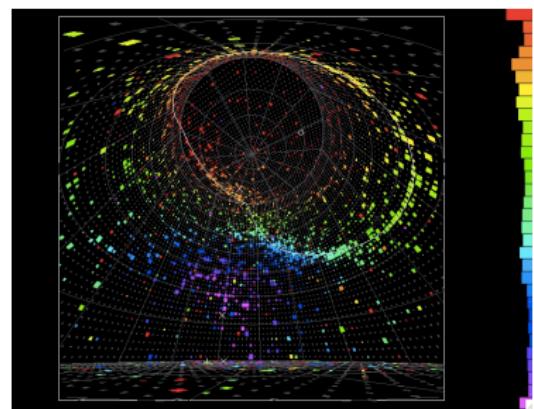


FIGURE 20 – Les électrons (produisent un anneau diffus)

OBSERVATOIRE À NEUTRINO

ICECUBE

Schéma du détecteur IceCube

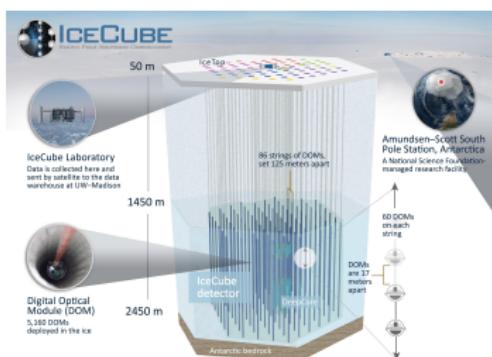


FIGURE 21 – Crédit : IceCube/NSF

- ▶ L'observatoire de neutrinos IceCube instrumente un volume d'environ 1 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
- 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 ~ 91 GeV :
 - ▷ usine à Z
 - ▷ Énergie finale > 209 GeV

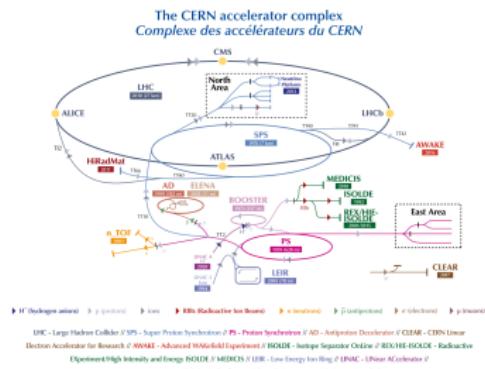


FIGURE 22 – 2022-2024 CERN

COMBIEN EXISTE-T-IL DE SAVEURS DE NEUTRINO ?

FONCTIONNEMENT DU LEP

La collision

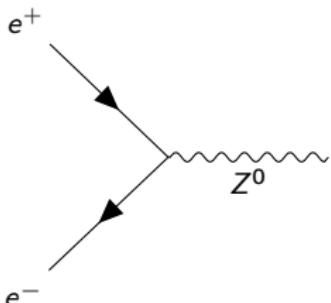


FIGURE 23 – Vertex Interaction Faible par courant neutre $e^+ + e^- \longrightarrow Z^0$

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

La désintégration

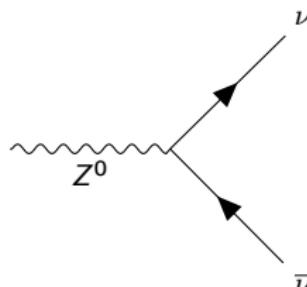


FIGURE 24 – Vertex de création de l'interaction faible par courant neutre : $Z^0 \longrightarrow \nu + \bar{\nu}$

- ▶ 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 » : $m(\nu) < \frac{m(Z)}{2}$

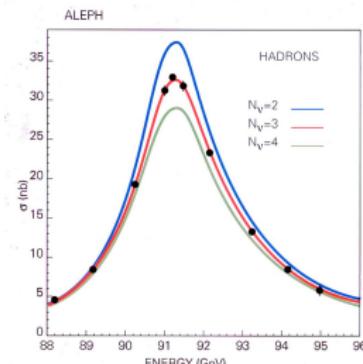
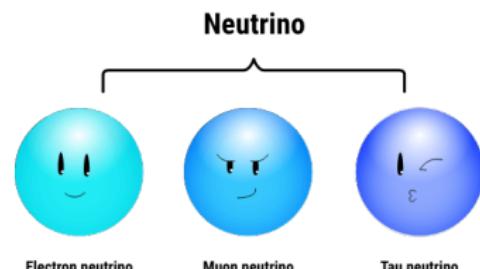


FIGURE 25 – Mesure précise de la forme de la ligne Z^0 prouvant que la matière est constituée de trois familles de quarks et de leptons
CERN-DI-9008004-1

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 up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ t top
QUARKS	QUARKS	QUARKS
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 41.8 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{1}{2}$ b bottom
e	μ	τ
masse charge spin	masse charge spin	masse charge spin
$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 électron	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 muon	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 tau
LEPTONS	LEPTONS	LEPTONS
ν_e	ν_μ	ν_τ
masse charge spin	masse charge spin	masse charge spin
$<1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 neutrino électronique	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 neutrino muonique	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 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
- 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^a de 2019 (*Modèle indépendant*)

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

a. Karlsruhe Tritium Neutrino

LA PHYSIQUE DES NEUTRINOS

SOMMAIRE

OUVERTURE AU DELÀ DES MODÈLES STANDARDS

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
- 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 ν 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
- 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, ν_{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 ν : Kamiokande
 - ▶ 8 ν : 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 prédit
 - ▷ Kamiokande 57%

COMPTAGE DES NEUTRINOS

MANQUE DES NEUTRINOS

Hypothèses

- 1) Soit les simulations sont fausses
- 2) Soit la prédiction 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.

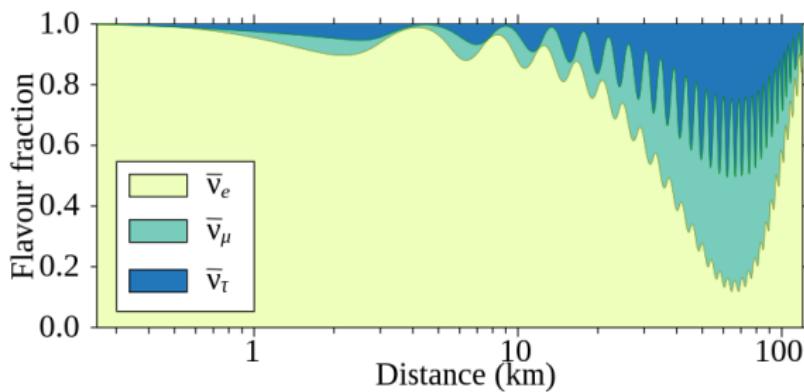


FIGURE 26 – ESA Standard Licence

COMPTAGE DES NEUTRINOS

ORDRE DE MASSE DES NEUTRINOS



FIGURE 27 – Graphique illustrant la relation entre les états propres de saveur du neutrino et les états propres de masse du neutrino.

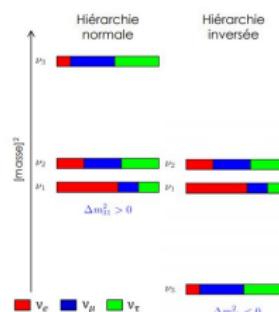


FIGURE 28 –

COMPTAGE DES NEUTRINOS

COMPARAISON DES MASSES

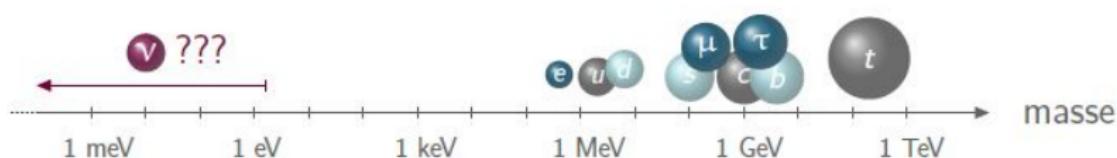


FIGURE 29 –

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
- 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

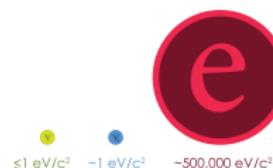
CONCLUSION

LE NOMBRE DE NEUTRINO

PRÉSENTATION DES NEUTRINOS STÉRILES

Modèle des neutrinos « stériles »

Neutrinos supplémentaires massifs mais sans interaction électrofaible

electron
neutrinomuon
neutrinotau
neutrinosterile
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 Λ 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^e 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
- 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 31 – Ettore Majorana (1906-1959)

Exemples :

- Le neutralino^a

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

LA NATURE DES NEUTRINOS

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

Expérience de Davis (1955)

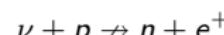
1953 Hanford



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^a et BooNE^b :
 - ▷ 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

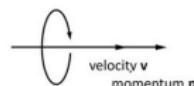
Hélicité des Neutrinos

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

Hélicité des Anti-Neutrinos

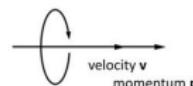
- Hélicité positive
- Hélicité droite
- Les antineutrinos se propagent dans le sens opposé à son spin.

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.

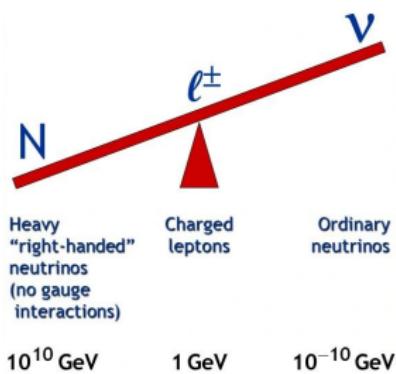


FIGURE 32 – Donc plus les neutrinos droits sont lourds, plus les gauches sont légers.

LA NATURE DES NEUTRINOS

MODÈLE DU SEE-SAW, AU DELÀ DU MODÈLE STANDARD

Une explication de l'asymétrie matière/antimatière

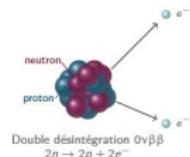
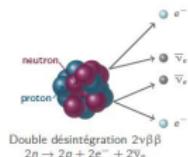
- ▶ Les neutrinos droits se sont désintégrés quand l'Univers était très jeune :
 - ▷ La leptogénèse : *la formation des leptons dans l'Univers primitif.*
 - ▷ La baryogénèse : *l'une ou des périodes de formation des baryons au sein de l'univers primordial.*
- ▶ Induit la brisure de la symétrie \mathcal{CP}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

Conditions de Sakharov :

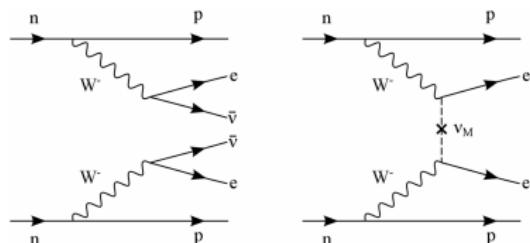
- 1) Loi différente pour la matière et l'antimatière
 - ▶ violation de la symétrie C et de CP
- 2) Violation de la conservation du nombre baryonique
 - ▶ non nul à l'issue de la baryogénèse
- 3) Rupture de l'équilibre thermique
 - ▶ l'équilibre thermique, élimine l'excès de baryons

LA NATURE DES NEUTRINOS

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



(A) Double désintégration β

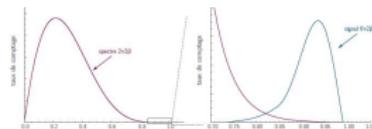


(B) $2\nu\beta\beta$ et $0\nu\beta\beta$

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

Les détecteurs de double désintégration β

- Déetecte le spectre de la double désintégration β avec émission de 2ν :
 - ▷ afin de chercher l'existence d'une double désintégration β sans émission de ν ,
 - ▷ ce qui prouverait que le neutrino et l'antineutrino 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 »

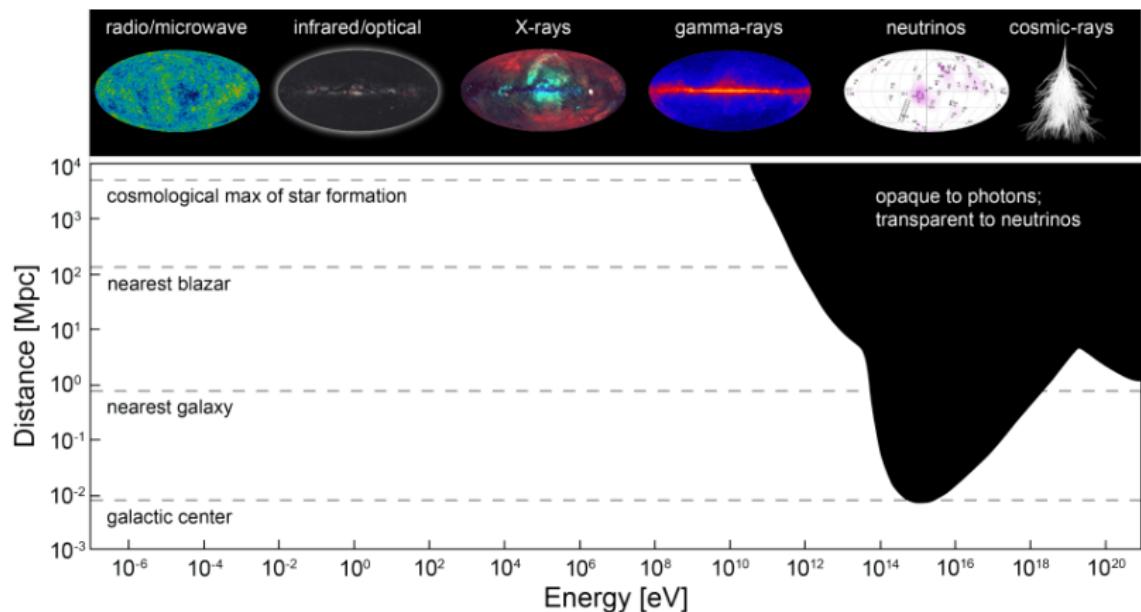


FIGURE 34

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
- 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 Coeur

- ▶ 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**

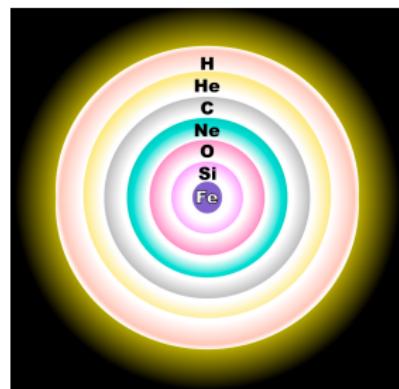


FIGURE 35 – Représentation de la structure en « oignon »

ICECUBE RECHERCHE DES SUPERNOVAE GALACTIQUES À EFFONDREMENT DU NOYAU

Les Neutrinos de SuperNova, ν_{SN}

- ▶ Après une nouvelle étoile observée, ou être obscurci par la poussière ou consommé par un trou noir.
- ▶ Émission de ν_{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 ν_{burst} sur 500 détecté dans IceCube's.
 - > Cependant, ν_{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
- 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^{re} 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 ν du plan galactique
- ▶ Preuves de l'émission de ν à haute énergie de la Voie lactée.
- ▶ Perspectives (avec ces ν à haute énergie) :
 - ▷ Recherche leurs sources dans la galaxie.
 - ▷ Recherche nouvelles caractéristiques cachées de notre galaxie.

NOTRE GALAXIE VUE À TRAVERS UNE NOUVELLE LENTILLE

LES NEUTRINOS DÉTECTÉS PAR ICECUBE



FIGURE 36 – 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
- 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^{RES} PREUVES DE L'ÉMISSION DE NEUTRINOS DE HAUTE ÉNERGIE DE NGC 1068



FIGURE 37 – 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^{RES} 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 38 – 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^{RES} 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^a :
 - ▷ 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** »^b :
 - ▷ Les environnements des trous noirs **bloque les rayons gamma** .
- ▶ NGC 1068, nouvelle bougie standard des futurs télescopes à ν ^c ? :
 - ▷ 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



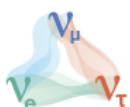
(A) Particules fondamentales



(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.

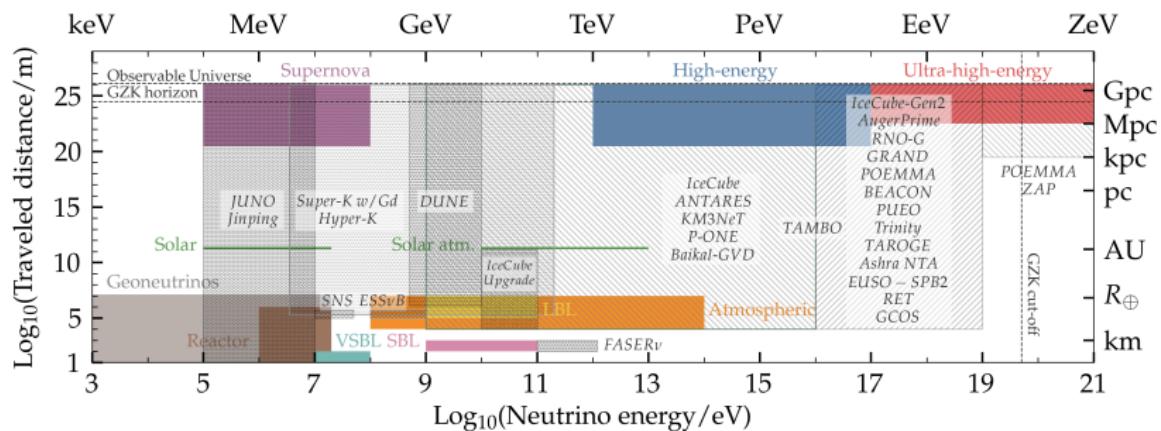


(H) Serait sa propre antiparticule (dissymétrie Matière-AntiMatière)

FIGURE 39 – 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 ν :**
 - ▷ 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 ν_{atm} - 0,5 à 10 TeV

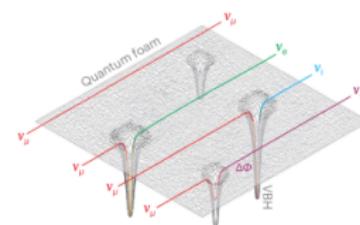


FIGURE 40 – IceCube teste les fluctuations de la métrique de l'espace-temps qui enfreindraient les règles normales de la mécanique quantique pour la propagation des neutrinos.

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

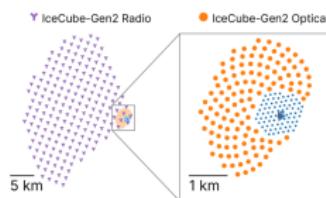
94 / 100

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 WIKIPEDIA

fr.wikipedia.org/wiki/Neutrino

 **WIKIPÉDIA**
L'encyclopédie libre

Rechercher sur Wikipédia Rechercher

Neutrino

91 langues ▾

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

Article Discussion Lire Modifier Modifier le code Voir l'historique Outils ▾

Le neutrino est une particule élémentaire du modèle standard de la physique des particules. Les neutrinos sont des fermions de spin $\frac{1}{2}$, plus précisément des leptons. Ils sont électriquement neutres. Il en existe trois « sauveurs » : électronique, muonique et tauique.

L'existence du neutrino a été postulée pour la première fois en 1930 par Wolfgang Pauli pour expliquer le spectre continu de la désintégration bêta ainsi que l'apparente non-conservation du moment cinétique, et sa première confirmation expérimentale remonte à 1956.

Parce que la découverte de ces particules est récente et parce qu'elles interagissent faiblement avec la matière, au début du xx^e siècle de nombreuses expériences sont consacrées à connaître leurs propriétés exactes.

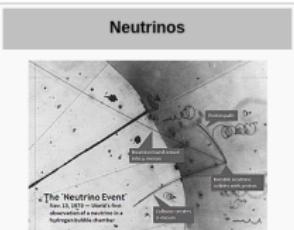
Nom [modifier | modifier le code]

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

Histoire [modifier | modifier le code]

En 1930, la communauté des physiciens est confrontée à une énigme : la désintégration β 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 particule 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 ⁷). C'est le physicien italien Edoardo Amaldi qui donne à la nouvelle particule le nom de « neutrino » (en italien : petit neutron), en plaisant 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

Neutrinos



La photographie montre une chambre à bulles remplie d'hydrogène. On peut voir plusieurs traces de particules. Une trace particulière est mise en évidence par une ligne bleue et étiquetée « The 'Neutrino Event' ». La trace commence par un pion (point noir) à l'origine de la trace centrale, qui se déplace ensuite le long de cette ligne. Au-dessus de la trace centrale, il y a une autre trace qui se termine par un muon (point noir). Des annotations explicatives sont placées à l'entrée et à la sortie de la trace centrale.

Première observation d'un neutrino dans une chambre à bulle d'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"> • $v_e < 0,086 \text{ eV}/c^2$ • $v_\mu < 170 \text{ keV}/c^2$ • $v_\tau < 18 \text{ MeV}/c^2$ • somme des trois < 0,120 eV/c^2 (à 95 % de confiance)²
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.