

ESTUDI DELS NEUTRINS I DETERMINACIÓ DE LA SEVA NATURALESA

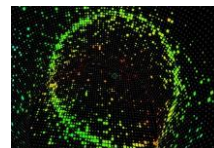
David Puertollano Martín

Carlos Cruz Molina

Àmbit Físic

21 de Gener de 2016

Voldria tenir unes paraules d'agraïment amb diverses persones que m'han servit de guia i que m'han ajudat en l'elaboració d'aquest treball. En primer lloc vull remarcar la fantàstica feina que han realitzat els dos professors amb els quals he tingut el plaer de treballar i que m'han facilitat molta informació sobre la matèria, que són en Joan Ramírez (durant el curs 2014/2015) i Carlos Cruz (durant el curs 2015/2016). Ambdós han mostrat una fantàstica actitud i han estat sempre disposats a ajudar en qualsevol aspecte. En segon lloc, especials agraïments a Federico Sánchez de l'IFAE, que ha tingut l'amabilitat d'obrir les portes del seu despatx i dedicar-m'hi diverses hores per explicar-me tots els meus dubtes i facilitar-me molt material de treball. Ha sigut tot un honor per a mi treballar amb un físic com ell.

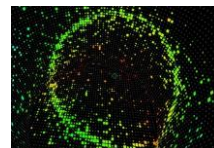


ÍNDEX

Introducció.....3

CAPÍTOL I: MARC TEÒRIC

1. MODEL ESTÀNDARD DE FÍSICA DE PARTÍCULES	4
1.1. QUARKS	5
1.2. LEPTONS	6
1.3. BOSONS	6
1.3.1. BOSÓ DE HIGGS	6
2. INTERACCIONS ENTRE PARTÍCULES ELEMENTALS	7
2.1. INVARIÀNCIA CTP	8
3. ELS NEUTRINS.....	9
3.1. Història dels neutrins.....	10
3.2. TIPUS DE NEUTRINS I OSCIL·LACIONS.....	14
3.3. Temperatura de Transparència del Neutrí	15
3.4. FONTS DE PRODUCCIÓ DE NEUTRINS.....	16
3.4.1 El Sol.....	16
3.4.2. Atmosfera terrestre.....	16
3.4.3. Radiació còsmica (Rajos Còsmics).....	17
3.4.4. Fonts artificials	17
3.5. DETECCIÓ DE NEUTRINS	18
3.5.1. T2K.....	18
3.5.2. ICE CUBE	21
3.5.3. NOvA.....	22
2.5.4.ANTARES.....	23
3.6. APLICACIONS A L'ESTUDI DE NEUTRINS	25
3.6.1. Estudi del sol i les reaccions energètiques	25
3.6.2. Teorització de nous models de reactors nuclears.....	25
3.6.3. Estudi de supernoves i altres fenòmens astrofísics.....	25
3.6.4. Estudi de la sobreexposició de matèria respecte l'antimatèria.....	25
3.6.5. Millor comprensió del model estàndard	26

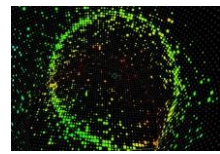


CAPÍTOL II: MARC PRÀCTIC

1. FERMIONS DE MAJORANA	27
2. DOBLE DECAIMENT β SENSE NEUTRINS	28
3. EXPERIMENT GERDA	29
4. ELABORACIÓ D'UN EXPERIMENT MENTAL.....	30
4.1. HELICITAT, QUIRALITAT	30
4.2. NEUTRINS COM A DIRAC I/O MAJORANA.....	30
4.2.1. NEUTRINS SEGONS DIRAC	30
4.2.2. NEUTRINS SEGONS MAJORANA.....	31
4.3. INVERTIR L'HELICITAT DEL NEUTRÍ.....	32
4.4. CONCLUSIONS EXPERIMENTALS.....	35
4.5. REPERCUSSIONS	37

CAPÍTOL III: EXPERIÈNCIA PERSONAL

1. CONCLUSIONS.....	38
2. LLISTA DE REFERÈNCIES.....	39



INTRODUCCIÓ

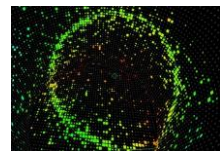
Benvinguts i benvingudes al meu Treball de Recerca, anomenat **Estudi dels Neutrins i determinació de la seva naturalesa.**

Actualment, soc alumne de l'IES Rovira-Forns a Sta. Perpètua de la Mogoda, on em trobo cursant 2on de Batxillerat a la modalitat de Ciències de la Salut i del Medi Ambient. Sento un gran interès per totes les assignatures vinculades a aquest àmbit, i, per tant, ha sigut per a mi tot un luxe poder realitzar aquest treball dins del món de la física, fet que m'assegura també que aquest treball sigui un repte que em provoqui majors motivacions que no pas altres assignatures.

Els meus objectius per a aquest treball son diversos. Per una banda, vull ampliar els meus coneixements de física en un tema gairebé desconegut per a mi en un principi, a més d'animar al lector a descobrir una sèrie de temes i qüestions que li facin reflexionar més enllà de les tasques quotidianes i dels fets diaris. Parlo de temes totalment allunyats de la nostra vista i dels nostres sentits, que requereixen d'un ús totalment actiu del nostre raonament.

Tractaré, en aquest treball, un tema molt ambiciós al món de la física que ha sigut descobert molt recentment i que s'està focalitzant a molts estudis de física arreu del món i que afecta directament al funcionament de tot l'Univers.

He dividit la tasca en tres grans capítols o apartats. Inicialment, he avocat tot allò que correspon a teoria, explicacions i característiques dels neutrins a un Marc Teòric, on aprendreu tot el que s'ha de saber sobre els neutrins i les seves característiques, a més d'un petit repàs sobre el Model Estàndard de la Física de Partícules. Seguidament, he realitzat un Marc Pràctic on he plasmat dues idees totalment contraries (DIRAC I MAJORANA) que tracten de donar llum a la naturalesa dels neutrins. Així doncs, en aquest apartat he tractat d'idear un experiment capaç de donar la raó a una d'elles. Finalment, he exposat la meua opinió i les sensacions que m'ha causat aquest treball en un tercer capítol que he anomenat Experiència Personal.



CAPÍTOL I: MARC TEÒRIC

En aquest primer capítol, faré una explicació de les diferents partícules conegudes i, posteriorment, totes les característiques i particularitats dels neutrins les quals he agrupat en diferents temes i subtemes.

1. MODEL ESTÀNDARD DE FÍSICA DE PARTÍCULES

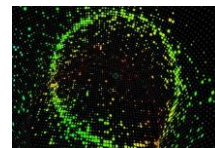
Abans d'aventurar-nos al meravellós i complex món dels neutrins, és necessari fer una pinzellada introductòria a l'àmbit de la Física de Partícules. És la teoria del Model Estàndard qui millor la explica.

L'anomenat Model Estàndard de les partícules elementals no és pròpiament un model, és una teoria. En l'opinió de molts físics, la millor de totes sobre la naturalesa de la matèria. Segons Gordon Kane (2003), un físic teòric de la Universitat de Michigan:

“... El Model Estàndard és, en la història, la més sofisticada teoria matemàtica sobre la naturalesa. Tot i la paraula "model" en el seu nom, el Model Estàndard és una teoria comprensiva que identifica les partícules bàsiques i especifica com interactuen. Tot el que passa al nostre món (excepte els efectes de la gravetat) és resultat de les partícules del Model Estàndard interactuant d'acord amb les seves regles i equacions.”

D'acord amb el Model Estàndard, **leptons** i **quarks** són partícules veritablement elementals, en el sentit que no posseeixen estructura interna. Les partícules que tenen estructura interna s'anomenen hadrons i estan constituïdes per quarks: barions (quan estan formades per tres quarks o tres antiquarks) i mesons (quan estan constituïdes per un quark i un antiquark).

Hi ha **sis leptons** (electró, muó, tau, neutrí de l'electró, neutrí del muó i neutrí del tau) i **sis quarks**, segons el seu sabor [quark up (u), quark down (d), quark charm (c), quark estrany (s), quark bottom (b) i quark top (t)]. No obstant això, els quarks tenen una propietat anomenada color i cada un pot presentar tres colors (vermell,



verd i blau). Hi ha, per tant, 18 quarks. Però com a cada partícula li correspon una antipartícula, existrien en total 12 leptons i 36 quarks.

L'electró és el leptó més conegut, i el protó i el neutró són els hadrons més familiars. L'estructura interna del protó és **uud**, és a dir, està format per dos quarks **u** i un **d**; la del neutró és **udd**, és a dir, format per dos quarks **d** i un **u**. El mesó π^+ està format per un antiquark **d** i un quark **u**, i el mesó π^- per un antiquark **u** i un quark **d**. I així successivament, és a dir, la gran

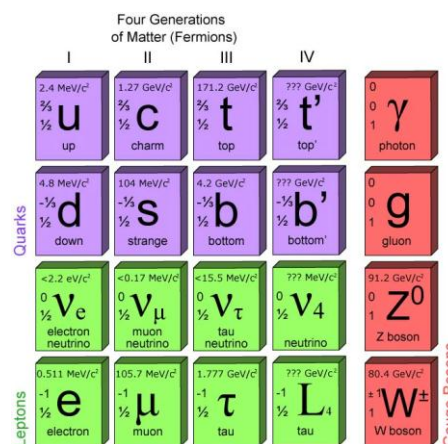


Figura 1. Partícules elementals.

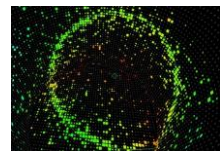
majoria de les anomenades partícules elementals són hadrons i aquests estan formats per barions o per mesons.

1.1. QUARKS

Un quark és una partícula elemental i un component fonamental de la matèria. Els quarks es combinen per formar partícules compostes anomenades hadrons, els més estables dels quals són els protons i els neutrons, els components dels nuclis atòmics. Els quarks es poden trobar només a dins d'hadrons, com ara els barions (protons i neutrons) i els mesons.

Els quarks són les úniques partícules elementals del model estàndard de física de partícules que experimenten les quatre forces fonamentals (electromagnetisme, gravetat, força nuclear forta i força nuclear feble), així com les úniques partícules amb una càrrega elèctrica que és una fracció de la càrrega elèctrica elemental (+2/3 o -1/3).

Hi ha sis tipus de quarks, coneguts com sabors: dalt, baix, estrany, encant, fons i cim. Els quarks dalt i baix tenen les menors masses d'entre tots els quarks. Els quarks més pesats canvien ràpidament de quarks dalt a baix amb un procés de desintegració de partícules. Per aquest motiu, els quarks dalt i baix són generalment estables i els més comuns de l'Univers, mentre que els quarks



estranys, encantats, fons i cims només es poden produir en col·lisions altament energètiques (com ara les que involucren rajos còsmics i en acceleradors de partícules). Les antipartícules dels quarks s'anomenen antiquarks i es denoten amb una ratlla sobre el símbol del quark corresponent. Com passa amb l'antimatèria en general, els antiquarks tenen la mateixa massa, temps de vida mitjà i espín que els seus quarks respectius, però la càrrega elèctrica i d'altres càrregues tenen el signe oposat.

1.2. LEPTONS

Els leptons es caracteritzen per no experimentar la força forta. Comprenen els electrons, els muons i els tauons, tots amb càrrega elèctrica -1 , així com els seus corresponents neutrins: el neutrí electrònic, el neutrí muònic i el neutrí tauònic (leptó més massiu), de càrrega elèctrica igual a zero. Comptant amb les seves antipartícules, n'hi ha 12 en total.

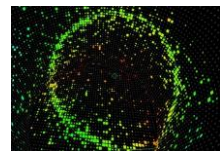
1.3. BOSONS

Els bosons són les partícules transmissores de les forces: els fotons per l'electromagnetisme; els bosons W i Z per a la força dèbil i els gluons per a la força nuclear forta. A l'invers dels fermions, no estan subjectes al principi d'exclusió de Pauli. Per tant, un nombre il·limitat de bosons poden ocupar el mateix estat quàntic al mateix temps.

1.3.1. BOSÓ DE HIGGS

El bosó de Higgs, té una importància fonamental, ja que la seva existència confirmaria l'existència del camp de Higgs, que en el model estàndard permet donar una explicació al fet que algunes partícules, com ara el fotó, no tinguin massa i d'altres, com els bosons W i Z, sí que en tinguin. És la responsable de donar massa a les partícules.

El Model Estàndard és una teoria comprensiva que a més d'identificar les partícules bàsiques, especifica com interactuen.



2. INTERACCIONS ENTRE PARTÍCULES ELEMENTALS

A la natura hi ha quatre tipus d'interaccions fonamentals: **gravitacional**, **electromagnètica**, **forta** i **feble**. Cada una d'elles és deguda a una propietat fonamental de la matèria: massa, càrrega elèctrica (interacció electromagnètica), color (interacció forta) i càrrega feble (interacció feble). Si a cadascuna d'aquestes propietats en diem càrrega, tindrem quatre càrregues: càrrega massa, càrrega elèctrica, càrrega color i càrrega feble. Així, hi ha també quatre forces fonamentals en la naturalesa: força gravitacional, força electromagnètica, força color i força feble.

Però, com es dona la interacció? Qui transmet el missatge de la força entre les partícules que interactuen? Això condueix a les **partícules mediadores** o partícules de força.

Les interaccions fonamentals tenen lloc com si les partícules que interactuen "intercanviessin" altres partícules entre si. Aquestes partícules mediadores serien els fotons en la interacció electromagnètica, els gluons en la interacció forta, les partícules W, Z i W- en la interacció feble i els gravitons (encara no detectats) en la interacció gravitacional. És a dir, partícules elèctricament carregades interactuarien intercanviant fotons, partícules amb càrrega color interactuarien intercanviant gluons, partícules amb càrrega feble interactuarien partícules W i Z, mentre que partícules amb massa interactuarien gravitons.

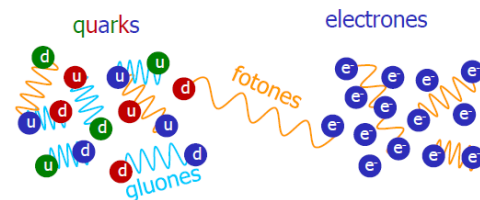
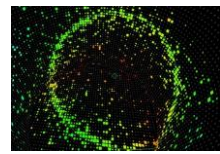


Figura 2. Esquema que mostra les interaccions mitjançant les partícules mediadores corresponents.

Les partícules mediadores poden no tenir massa, però tenen energia, és a dir, són polsos d'energia. Per això, es diuen virtuals. Dels quatre tipus de partícules mediadores, les del tipus W i Z tenen massa.

Per tant, partícules de matèria o partícules reals (leptons, quarks i hadrons) interactuen intercanviant partícules virtuals (fotons, gluons, W i Z, i gravitons). Aquí cal tenir en compte que les partícules de matèria poden tenir més d'una càrrega,



de manera que experimentarien diverses interaccions i forces. La força gravitacional, per exemple, pot ser desconsiderada en el domini subatòmic. És a dir, encara que existeixin quatre interaccions fonamentals, quatre càrregues i quatre forces, això no vol dir que totes les partícules tinguin les quatre càrregues i experimentin les quatre interaccions.

Però falten els camps! Sabem que un cos amb massa crea al voltant seu un camp gravitacional, un camp de força que exerceix una força sobre un altre cos massiu i viceversa. Anàlogament, un cos carregat elèctricament, crea un camp electromagnètic i exerceix una força electromagnètica sobre un altre cos electrilitzat i viceversa.

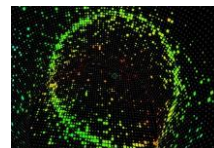
De la mateixa manera, hi ha el camp de la força forta i el camp de la força feble. O sigui, hi ha quatre camps fonamentals: el electromagnètic, el fort, el feble i el gravitacional. Cada partícula mediadora correspon així a un camp: els fotons al camp electromagnètic, els gluons al camp fort, les partícules W i Z al camp dèbil i els gravitons al camp gravitacional.

Ara bé, a banda del model estàndard, existeixen una sèrie de simetries profundes que són importants de conèixer, i que són conegudes com a invariància CTP.

2.1. INVARIÀNCIA CTP

En general, es denomina simetria al fet que certs objectes no canvien quan s'aplica una determinada operació. Tres de les simetries que gairebé sempre es mantenen en la física de partícules són les de conjugació de la carrega (C), la paritat (P) i la inversió de temps (T). Aquesta invariància de CTP conté una sèrie d'implicacions que es troben al cor de la comprensió de la natura:

- Les partícules d'espín sencer obeeixen les estadístiques de Bose-Einstein, i les d'espín 1/2 obeeixen a les estadístiques Fermi-Dirac.
- Les partícules i les antipartícules tenen massa i temps de vida idèntics.
- Tots els nombres interns quàntics de les antipartícules són oposats als de les partícules corresponents.



3. ELS NEUTRINS

Ara que coneixem les diferents partícules i el comportament d'aquestes enfront la natura, podem aprofundir en l'àmbit dels neutrins.

Els neutrins van aparèixer fa uns 15 mil milions d'anys, pocs instants després de la creació del nostre Univers. Des d'aquesta època, l'Univers s'ha expandit, refredat i els neutrins han seguit el seu propi camí i evolució. Teòricament, hi ha molts actualment, i constitueixen una radiació de fons còsmica la temperatura de la qual s'ha estimat en 1.9 K (-271.2 ° C). La resta de neutrins de l'Univers són produïts durant el temps de vida de les estrelles, en processos nuclears i durant l'explosió de supernoves.

Els neutrins són partícules subatòmiques de tipus fermiòniques, **sense càrrega** i d'espín $\frac{1}{2}$ oposat al moment lineal (per aquest últim fet se'ls denomina com a "esquerrans"). **Tenen massa, però molt petita** i molt difícil de mesurar (aproximadament una milionèsima part de la massa d'una molècula d'hidrogen). De fet, és molt petita la probabilitat de que un neutrí interactuï amb la matèria.

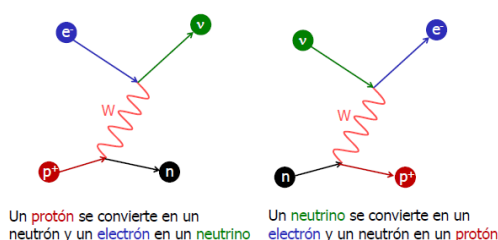
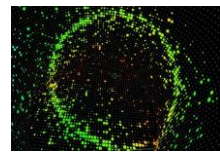


Figura 3. Representació de la força dèbil i els seus efectes.

El Sol produeix una quantitat tant gran de neutrins, que ens travessen 100.000.000.000.000 d'aquests cada segon. De tots aquests, però, només un interactua amb el nostre cos, i la interacció que be donada per aquest neutrí és tan petita que ni la notem. Això succeeix perquè el neutrí, al no ser un quark, no intercanvia gluons amb els quarks del nucli atòmic. I a la vegada, al no tenir càrrega, tampoc intercanvia fotons amb els electrons.

Per aquestes característiques anomenem als neutrins com a **partícules fantasma**.



D'altra banda, els neutrins únicament interactuen amb la força feble. Encara que sigui tan feble, aquesta força és fonamental per al desenvolupament de l'univers, doncs pot transformar unes partícules en altres de diferents.

Aquestes interaccions, però, seran explicades més a fons en apartats posteriors. Al llarg del següent apartat s'indicarà com van ser descobertes aquestes partícules fantasma.

3.1. Història dels neutrins

La majoria dels descobriments han tingut el seu origen en problemes que la comunitat científica estava encarant freqüentment sense adonar-se'n. Abans de l'arribada del neutrí, va aparèixer el problema de la desintegració beta (β). I perquè aquest aparegués, la radioactivitat havia de ser descoberta.

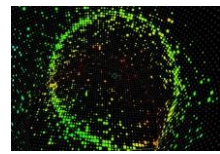
Henri Becquerel, Pierre i Marie Curie van ser els primers protagonistes d'aquesta revolució. Mentre Henri Becquerel va descobrir algunes radiacions estranyes provinents de les sals d'urani, Pierre i Marie Curie van aïllar el radi, un material molt més radioactiu que l'urani. En 1899, Rutherford va mostrar que existien dos tipus de radiacions, que denominava alfa (α) i beta (β). En 1900, Villard va proporcionar l'evidència d'un tercer tipus de radiació en el radi, que va denominar radiació gamma. Va començar així una carrera per estudiar amb detall aquestes radiacions trobades en materials radioactius. Finalment, els tres tipus de radioactivitat van ser identificats:

-Radioactivitat alfa: constituïda per nuclis d'heli (dos protons i dos neutrons).

-Radioactivitat beta: constituïda per electrons.

-Radioactivitat gamma: constituïda per fotons d'alta energia.

La radiació beta presumia d'emetre només un tipus de partícules (l'electró) i, llavors, una energia ben definida i fixa. No obstant això, i després de diferents estudis d'aquesta radiació (realitzats per Lise Meitner, Otto Hahn, i James Chadwick), es va observar un fet sorprenent: l'electró no s'emportava tota l'energia de la descomposició, sinó que només agafava una fracció d'aquesta.



Aleshores es va pensar:

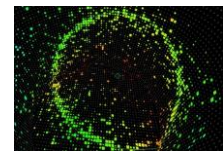
"(...) **Hem d'abandonar llavors el principi de conservació de l'energia, el sacrosant principi que els científics sempre hem verificat per l'experimentació fins ara? (...)**".

Haurem d'esperar fins a 1930, en que Pauli incorporarà per primer cop al món la física els neutrins, i amb ells, tot una sèrie d'incògnites per resoldre.

En un primer moment, Pauli va formular una teoria on defensava l'existència d'unes partícules elèctricament neutres al nucli atòmic per tal de compensar l'aparent pèrdua d'energia i moment lineal a la desintegració beta dels neutrons segons la següent equació: $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$, on n és el neutró, p+ és el protó, e- és l'electró i ve és l'antineutrí electrònic.

Wolfgang Pauli va interpretar que tant la massa com l'energia serien conservades si una partícula hipotètica anomenada «**neutrí**» participava en la desintegració incorporant les quantitats perdudes. Desafortunadament, aquesta partícula no havia de tenir massa, ni càrrega. A més, aquesta partícula no interactuava mitjançant la interacció forta, de manera que no es podia detectar amb els mitjans de l'època. Per aquest motiu, Pauli va assegurar que aquesta partícula mai podria ser detectada. Els següents 25 anys l'existència d'aquesta partícula es va establir únicament de forma teòrica.

El 1956 Clyde Cowan i Frederick Reines van demostrar la seva existència experimentalment mitjançant un experiment al qual van anomenar l'**experiment del neutrí**. Primer van dur a terme el seu experiment a Hanford, Washington, on van obtenir alguns resultats preliminars. L'experiment definitiu, però, es va dur a terme a principis de 1956 al Reactor P al riu Savannah, planta prop d'Aiken, Carolina del Sud, on tenien una millor protecció contra els raigs còsmics. Aquesta tècnica s'utilitzarà novament a experiments posteriors en els quals profunditzarem en apartats futurs.



El flux de neutrins en el seu aparell va ser de més de 10^{13} per segon per centímetre quadrat. S'utilitzaven dos tancs d'aigua de 200 litres de volum cadascun, en els quals buscaven la reacció **antineutrí + protons** \rightarrow **positrons + neutrons** mitjançant la detecció de la parella de raigs gamma de 511 keV emesos quan els positrons s'aniquilaven amb els electrons. Per tal de reduir el seu fons, van dissoldre a més 40 kg de clorur de cadmi en cada tanc. El neutró reacciona amb un nucli de Cadmi per produir Cadmi i un raig gamma. El seu senyal era, llavors, un parell de raigs gamma, seguida per un altre raig gamma de l'absorció de cadmi del neutró.

Els resultats obtinguts eren consistents amb les prediccions de la teoria de Pauli. **El "fantasma" havia estat detectat.**

Frederick Reines va ser reconegut pel Premi Nobel el 1995 per aquest treball i Clyde Cowan, que sens dubte, hauria compartit el premi, va morir el 1974.

Actualment se sap que els neutrins, igual que els leptons carregats, els quarks up i els quarks down, es poden dividir en tres grups o tipus.

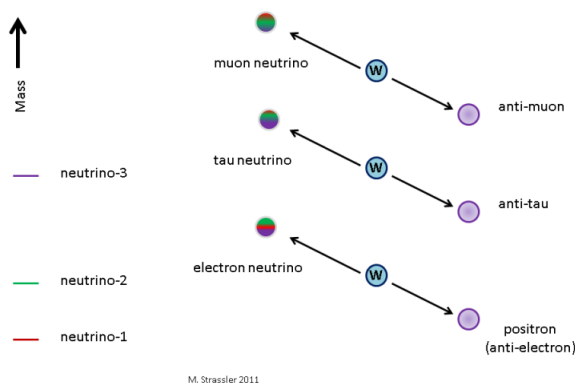
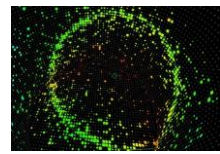


Figura 4. Decaïda de la partícula W en un anti-leptó i un dels tres tipus de neutrins.

Per una banda, podem classificar els tres neutrins per les seves masses (que encara no es coneixen) i els diuen, del més lleuger al més pesat, **neutrí 1**, **neutrí 2** i **neutrí 3**. Anomenarem a aquesta la **classificació de masses**, i aquests tipus de neutrins com de tipus massiu.

Existeix, però, una altra manera de classificar els neutrins: la connexió entre els leptons carregats (electró, muó i tau). La millor manera d'entendre això és centrar-se en com els neutrins es veuen afectats per la força nuclear feble, que es reflecteix en les seves interaccions amb



la partícula W. Aquesta partícula (W) és molt pesada, i a vegades pot decaure (Figura 4) a un dels tres anti-leptons carregats i un dels tres neutrins.

Si W decau a un anti-tau, el neutrí produït en associació amb ell és un tau-neutrí. De la mateixa manera, si el W decau a un anti-muó un muó-neutrí s'emeta. D'altra banda, si el W decau a un positró, surt un electró-neutrí. Anomenarem a això la classificació feble, ja que és la força feble la que determina els seus detalls.

La millor manera de representar aquest decaïment és mitjançant el **diagrama de Feynman**. Un cop s'hagi construït un diagrama de Feynman, d'una interacció de partícules es poden predir altres modificacions mitjançant rotacions del diagrama. Aquesta característica és especialment útil a les interaccions dèbils carregades. Un bon exemple és el desenvolupament del diagrama de Feynman del decaïment del muó.

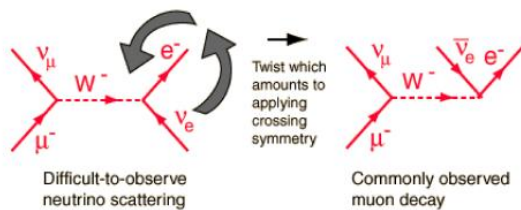
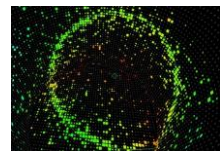


Figura 5. Diagrama de Feynman

A la Figura 5 observem com es torça cap amunt l'extrem dret, de manera que el neutrí electrònic passa de ser una partícula d'entrada a una de sortida.

La incapacitat per classificar un neutrí definitiu de tipus massa i de tipus feble a la vegada és un exemple del "Principi d'Incertesa", similar a la raresa que fa impossible conèixer la posició exacta d'una partícula i, al mateix temps, conèixer la seva velocitat. Encara que es pugui conèixer una d'aquestes quantitats a la perfecció, no es coneixerà l'altra amb exactitud.



3.2. TIPUS DE NEUTRINS I OSCIL·LACIONS

Ara bé, el neutrí es propaga a través de l'espai, però els seus tres mitjans de diferents tipus viatgen a velocitats lleugerament diferents, molt a properes a la velocitat de la llum. Per què és això?

Això es degut a que la velocitat d'un objecte depèn tant de la seva energia com de la seva massa, i els tres mitjans de tipus massiu tenen diferents masses. La diferència de velocitat, però, és molt petita per a qualsevol neutrí.

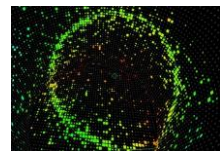
Aquesta petita diferència de velocitats fa que la barreja precisa dels neutrins 1,2 i 3 d'un electró-neutrí pot canviar gradualment a mesura que els neutrins es mouen a través de l'espai. Això vol dir que l'electró-neutrí que parteix, després d'un temps ja no és un neutrí electró, sinó que correspon a una barreja molt particular dels neutrins massius. Les diferents masses dels tres neutrins de tipus massa causen que l'electró-neutrí original, a mesura que viatja, pot esdevenir una barreja d'un electró-neutrí amb un muó-neutrí i un tau-neutrí. La quantitat de mescla depèn de les diferències en les velocitats i, per tant, en l'energia del neutrí original i en la diferència en les masses dels neutrins.

Això es coneix com a **oscil·lacions de neutrins**. El funcionament exacte de les oscil·lacions depèn de les masses dels neutrins i de la barreja resultant dels neutrins de tipus feble.

L'efecte d'oscil·lació es pot mesurar, ja que un electró-neutrí, quan xoca amb un nucli, es pot convertir en un electró, però no un muó tau, mentre que un muó-neutrí pot esdevenir un muó, però no un electró o tau. Així, si es parteix d'un feix de muons-neutrí, després de recórrer una certa distància i xocar amb un nucli, si es converteixen en un electró, vol dir que l'oscil·lació està tenint lloc, i que els muó-neutrins s'estan convertint en electró-neutrins.

$$\begin{aligned} \nu_e &= 0.8 \nu_1 + 0.5 \nu_2 \pm 0.2 \nu_3 \\ \nu_\mu &= 0.4 \nu_1 - 0.5 \nu_2 + 0.7 \nu_3 \\ \nu_\tau &= -0.4 \nu_1 + 0.6 \nu_2 + 0.7 \nu_3 \end{aligned}$$

Figura 6. Fórmula que mostra les quantitats necessàries per formar cadascun dels tipus de neutrins. Encara desconeixem les quantitats exactes del neutrí electrònic.



Com que el tema de la massa és un dels blocs de construcció elementals de la matèria, avui la qüestió de la massa del neutrí adquireix gran importància. Els mesuraments directes han demostrat que les masses dels neutrins són molt menors que les masses del seu germà acusat per un leptó. Per exemple, sabem que la massa del neutrí electró és menys de cent mil·lèsimes la massa de l'electró.

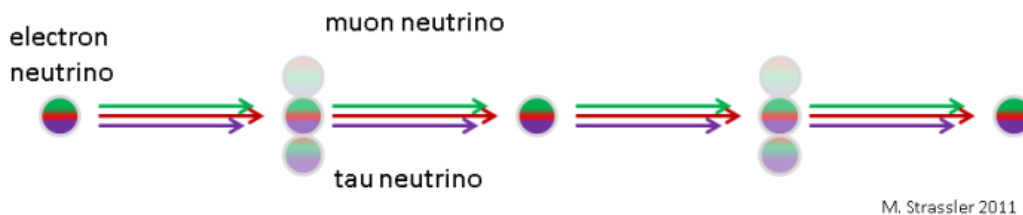


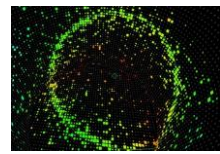
Figura 7. Un neutrí electró és una barreja dels tres neutrins de tipus massiu, que, per les seves diferents masses, viatjaran a velocitats lleugerament diferents. Això vol dir que l'electró-neutrí es convertirà en una barreja dels tres neutrins de tipus feble, i de nou en un neutrí electrònic.

Dels neutrins en coneixem també una sèrie d'aspectes i mesures que trobo d'importància (encara que no directa) explicar en aquest treball, doncs tenen repercussions importants en l'àmbit científic, com és la temperatura de transparència del neutrí.

3.3. Temperatura de Transparència del Neutrí

El punt de transparència del neutrí es va produir abans que la transparència del fotó, i per estimar aquesta transparència, Weinberg utilitza l'argument de l'entropia. Suposant que l'expansió de l'Univers es va realitzar en condicions d'equilibri tèrmic, la segona llei de la termodinàmica suggereix que l'entropia es va mantenir constant. Així es va estimar que la temperatura de transparència del neutrí havia de ser una fracció concreta de la temperatura de transparència del fotó.

En el model estàndard del Big Bang, els neutrins sobrants de la creació de l'univers són les partícules més abundants, amb una densitat de 100 neutrins per centímetre cúbic a una temperatura efectiva de 2K (aproximadament). Aquesta temperatura, és menor que la radiació de fons (2,7K) degut a que el punt de transparència del neutrí va ocórrer abans.



3.4. FONTS DE PRODUCCIÓ DE NEUTRINS

Existeixen a l'Univers moltíssims fenòmens que donen lloc a la producció de neutrins. A continuació veurem aquells més transcendents per al nostre estudi.

3.4.1 El Sol

Al Sol, la producció de neutrins té lloc durant la fusió dels seus nuclis. En aquesta, un protó dona lloc a un neutró, i un electró dona lloc a un neutrí-electrònic mitjançant la força dèbil. Aquests neutrons produïts es fusionaran amb protons de l'interior del Sol i formaran nuclis complexos, alhora que desprenen fotons en forma de llum.

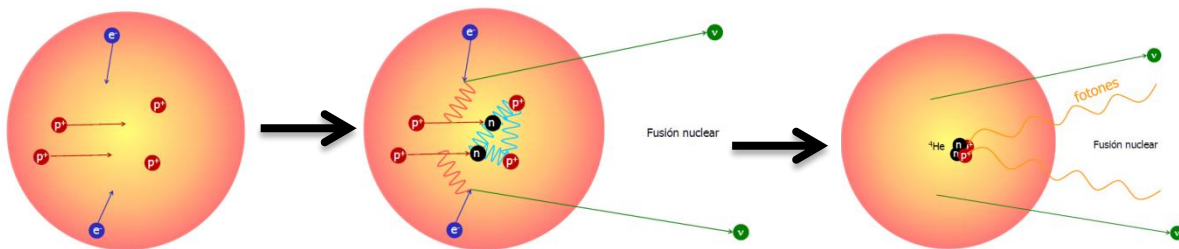


Figura 8. Procés de la fusió dels nuclis del Sol on es formen neutrins, nuclis complexos (4He) i llum solar.

El Sol únicament desprèn neutrins electrònics, però degut a les oscil·lacions entre neutrins, alguns dels neutrins provinents del Sol són de tipus muònic.

3.4.2. Atmosfera terrestre

Els neutrins atmosfèrics es produeixen en la col·lisió dels raigs còsmics primaris (normalment protons) amb nuclis de l'atmosfera superior. Això crea una pluja de pions i altres hadrons. Aquests pions decauen a muons i neutrins muònics. Els muons alhora decauen a altres neutrins muònics, electrons i neutrins electrònics.

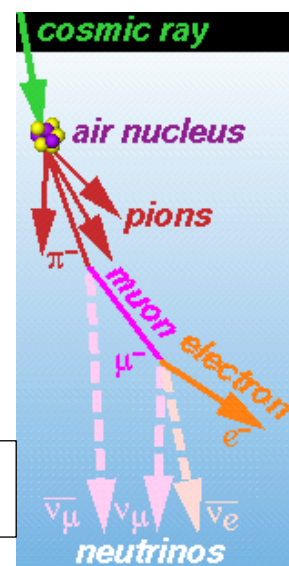
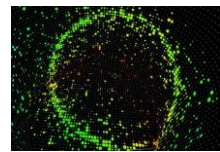


Figura 9. Esquema que mostra la producció dels neutrins provinents de l'atmosfera.



3.4.3. Radiació còsmica (Rajos Còsmics)

Els rajos còsmics no son ones, sinó partícules carregades d'energia (com els neutrins). Aquestes pluges de partícules corresponen als esdeveniments més poderosos de l'Univers, com les explosions de rajos gamma, els forats negres o la formació d'estrelles. Els neutrins provinents d'aquests fenòmens se'ls anomena **neutrins còsmics d'alta energia**, i van ser descoberts fa cinc anys a l'Ice Cube, un gegantesc telescopi detector de neutrins situat al Pol Sud.

3.4.4. Fonts artificials

Per crear un feix de neutrins, en primer lloc cal fer passar un feix de protons per una planxa prima de material. Els protons arribaran als nuclis atòmics del material i xocaran en ells, descomposant-se en moltes partícules, incloent pions carregats.

Seguidament, els neutrons van rectes; els pions carregats negativament es corben cap a un costat; i els protons i els pions carregats positivament es giren cap a un altre costat (utilitzant un imant). Deixant una porta a la paret, les partícules que passen a través tindran energies més o menys similars i la mateixa càrrega elèctrica. D'aquesta manera s'aconsegueix un feix de pions amb càrrega positiva i energies similars.

Els pions començaran a decaure en anti-muons i en neutrins. En poc temps, el seu raig ha carregat positivament muons.

Finalment, xocant amb una última paret, únicament ens queda un feix de neutrins. La utilització d'un imant per separar les partícules carregades és rellevant, doncs els neutrins seran les úniques partícules capaces de travessar la biga sense interactuar.

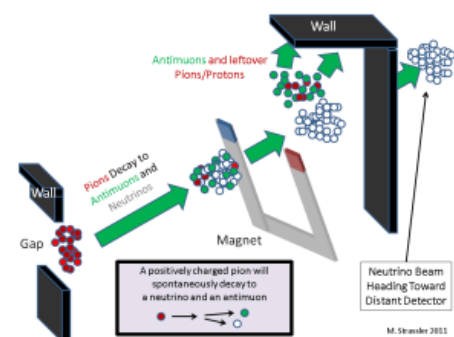
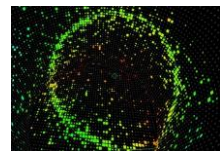


Figura 10. Fase final per la qual aconseguim un feix únicament de neutrins.



3.5. DETECCIÓ DE NEUTRINS

La detecció de neutrins és una tasca molt complexa degut a les estranyes propietats que presenten aquestes partícules. Per això és necessària la construcció d'estructures enormes i complexes per tal de poder veure uns pocs de neutrins.

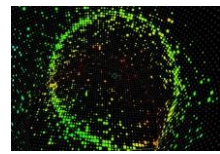
A continuació mostraré els experiments més destacats per a la detecció de neutrins i els processos que segueixen per a aquesta tasca.

3.5.1. T2K

T2K (“Tokai to Kamioka”) és un experiment de neutrins de llarga línia al Japó que estudia les oscil·lacions de neutrins. Com que els neutrins només interactuen a través de la força feble, són molt difícils de detectar ja que poques vegades interactuen amb la matèria. Els neutrins electrònics es produeixen en grans quantitats al Sol, i els neutrins solars poden travessar tota la Terra sense interactuar.

T2K ha fet una recerca de les oscil·lacions de neutrins muó a neutrins electrònics, i va anunciar les primeres indicacions experimentals el juny de 2011. Aquestes oscil·lacions mai havien estat observades per qualsevol experiment anterior.

L'experiment T2K envia un intens feix de neutrins-muó de Tokai, que està a la costa est del Japó, a Kamioka a una distància de 295 km a l'oest del Japó. El feix de neutrins es fa en les col·lisions entre un feix de protons i un blanc de grafit; aquestes col·lisions produeixen pions, que es descomponen ràpidament a muons i neutrins muó. Els muons i qualsevol protó restant són detinguts per una segona capa de grafit, però els neutrins passen a través d'aquesta capa. L'energia dels neutrins en el feix és important alhora d'estudiar com oscil·len: els neutrins de baixa energia oscil·len en una distància més curta que els neutrins d'alta energia. El feix de neutrins T2K té un rang d'energies centrades en 600 MeV. Els neutrins muó amb aquesta energia són els més propensos a oscil·lar després de viatjar 295 quilòmetres.



T2K també ha començat la presa de dades utilitzant un feix de muons antineutrí. Es creu que quantitats iguals de matèria i antimatèria es van produir al Big Bang i no s'entén per què l'univers actual està compost en la seva totalitat de la matèria. L'objectiu d'utilitzar un feix de antineutrí serà buscar una solució a aquest problema mitjançant la comparació de les oscil·lacions de antineutrins amb oscil·lacions de neutrins.

És essencial que la direcció del feix de neutrins sigui estable i que la intensitat del feix sigui constant en el temps.

T2K estudia les oscil·lacions de neutrins amb dos detectors separats. El ND280 (un dels detectors) està a 280 metres de la meta, i mesura el nombre de neutrins-muó abans que passi qualsevol oscil·lació. Els neutrins de T2K tenen energies molt més altes que els neutrins solars, i els neutrins d'alta energia són més propensos a interactuar. Un petit nombre de neutrins muó interactuen amb aigua al ND280, i moltes d'aquestes interaccions produeixen un muó. El muó és una partícula carregada, i es pot detectar ja que ionitza immediatament al gas que es col·loca després dels punts d'interacció. Aquests mesuraments ND280 s'utilitzen per predir el nombre de neutrins muó que es veurien al "detector llunyà" (SuperKamiokande) si no hi ha oscil·lacions anteriors.

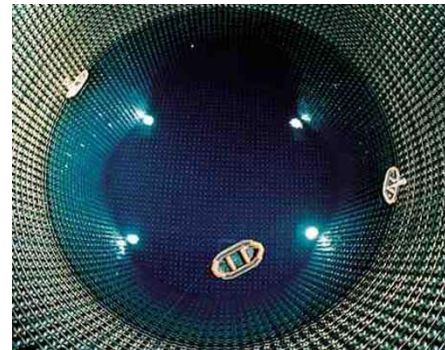
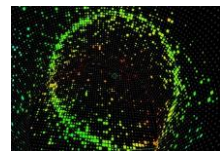


Figura 11. Imatge del tanc d'aigua contingut a Superkamiokande envoltat de fotomultiplicadors.

La majoria dels neutrins passen a través del ND280 sense interactuar, i aquests viatgen gairebé a la velocitat de la llum per al Super Kamiokande. Aquest es troba a 1000 metres sota terra a l'oest del Japó, i és a 295 km de Tokai. En aquest detector, els neutrins entren en un gran cilindre d'aigua pura. Un cop més la majoria dels neutrins passen a través sense interactuar però, a causa de les altes energies dels neutrins, alguns interaccionen amb l'aigua.



Moltes de les interaccions dels neutrins-muó produeixen muons, mentre que les interaccions de neutrins-electrons produeixen electrons. Els muons i electrons són partícules carregades, i que desplacen electrons a l'aigua a mesura que passen. Si la partícula carregada que passa viatja més ràpid que la velocitat de la llum en l'aigua (que és tres quartes parts de la seva velocitat en el buit), una llum s'emet en forma de con, coneguda com radiació Cherenkov. Les parets de Súper K. s'alineen amb més de 10.000 sensibles fotomultiplicadors, que detecten el con de llum Cherenkov com un anell. Súper K pot distingir muons (que produeixen un fort anell) dels electrons (que produeixen un anell més difús).

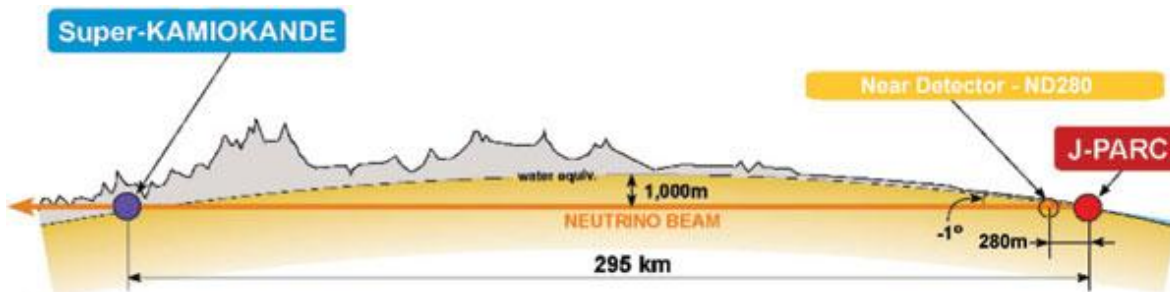
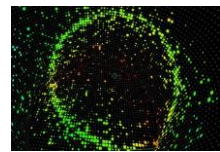


Figura 12. Esquema de l'experiment T2K.



3.5.2. ICE CUBE

IceCube és un detector de partícules al Pol Sud que registra les interaccions de neutrins. IceCube cerca neutrins procedents de les fonts astrofísiques més violentes (estrelles en explosió, explosions de raigs gamma, fenòmens astrofísics que impliquen els forats negres i estrelles de neutrons). El telescopi IceCube és una poderosa eina per a la recerca de la matèria fosca i podria revelar els processos físics associats amb l'enigmàtic origen de les partícules d'altres energies en la naturalesa. A més, explorant el fons de neutrins produïdes als fenòmens esmentats, IceCube estudia els propis neutrins; les seves energies són molt superiors als produïts pels raigs d'un l'accelerador. IceCube és el detector de neutrins més gran del món, que abasta un quilòmetre cúbic de gel. Està enterrat sota la superfície, que s'estén fins a una profunditat d'uns 2.500 metres.

El component en el gel de IceCube es compon de 5160 mòduls d'òptics digitals (DOM), cadascun amb un tub fotomultiplicador de deu polzades i electrònica associada. Aquest component està associat a "cordes" verticals congelades en 86 pous, i disposats a més d'un quilòmetre cúbic de 1.450 metres a 2.450 metres de profunditat. Les cordes es despleguen en una reixeta hexagonal.

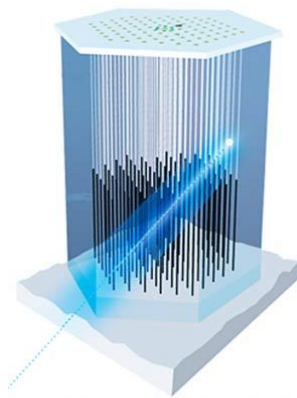
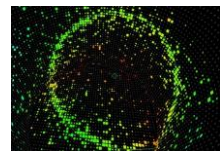


Figura 13. Esquematzació de l'experiment Ice Cube.

Vuit d'aquestes cadenes al centre de la matriu van ser desplegades de forma més compacta, amb una separació horitzontal d'aproximadament de 70 metres i una separació dels DOM vertical de 7 metres. Aquesta configuració més densa forma el sub detector DeepCore, que baixa el llindar d'energia del neutrí a uns 10 GeV, creant l'oportunitat d'estudiar les oscil·lacions de neutrins.

Els avenços en l'astronomia de neutrins han estat impulsats per la recerca de les fonts dels raigs còsmics. Els raigs còsmics, que consisteixen principalment en protons, són les partícules més energètiques mai observades, amb energies de



més d'un milió de vegades les aconseguides pels acceleradors de partícules d'avui a la Terra.

AMANDA, el Conjunt Antàrtic Muon i Neutrino Detector, va ser construït com una prova de concepte a mitjan 1990 i va demostrar que el gel de l'Antàrtida era adequat per detectar neutrins energètics. IceCube, es va completar al desembre de 2010, sis anys després de la implementació de la primera cadena al Pol Sud.

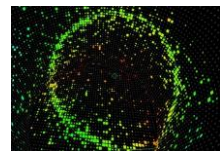
Els neutrins no s'observen directament, però quan interactuen amb el gel produeixen partícules secundàries carregades elèctricament que emeten llum Cherenkov, com a resultat de viatjar a través del gel més ràpid que la llum.

Els sensors IceCube recullen aquesta llum, que posteriorment es digitalitza. Aquesta informació s'envia a les computadores en el Laboratori de IceCube a la superfície, la qual cosa converteix els missatges dels departaments d'ultramar individuals en els patrons de llum que revelen la direcció i l'energia dels muons i neutrins.

3.5.3. NOvA

Fermi National Accelerator Laboratory, que gestiona el projecte Nova, generarà un feix de neutrins per enviar a un detector de 14.000 tones al riu Ash, Minnesota. Les partícules completaran el viatge interestatal de 500 milles en menys de tres milisegons. A causa que els neutrins rarament interactuen amb altres matèries, viatgen directament a través de la Terra. Els científics detecten una petita fracció dels neutrins en un detector del Fermilab i en major mesura a un detector a Minnesota. Allà la recerca de senyals que els neutrins estan canviant d'un tipus a un altre en el seu viatge serà detectada.

Els científics no poden capturar el mateix neutrí en ambdós detectors per comprovar si ha canviat, de manera que necessiten utilitzar les estadístiques per determinar el que està succeint. La majoria dels neutrins detectats al detector proper són neutrins muònics. Si els científics noten molt pocs neutrins-electrònics que passen pel detector proper i un major percentatge de neutrins-electrònics que

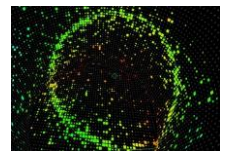


passen pel detector llunyà, els permetrà saber que alguns dels neutrins muó de Nomi s'han convertit neutrins electrònics durant el viatge a Minnesota.

El feix de neutrins està dirigit cap avall en un angle de $3,3^\circ$. Encara que el raig comença a 150 metres sota terra en el Fermilab, passarà fins a sis milles sota de la superfície a mesura que viatja cap al riu Ash.



Imatge 14. Disposició del Fermilab i dels altres components de l'experiment NOvA.



2.5.4.ANTARES

La Col·laboració ANTARES està construïda per una gran àrea de detectors de Cherenkov sota l'aigua en el profund mar Mediterrani, optimitzat per a la detecció de neutrins astrofísics d'alta energia.

L'objectiu principal de l'experiment és utilitzar els neutrins com a eina per estudiar els mecanismes d'acceleració de partícules en objectes astrofísics energètics, com ara els nuclis galàctics actius i els esclats de raigs gamma, que també poden aportar llum sobre l'origen dels raigs d'ultra energia còsmica.

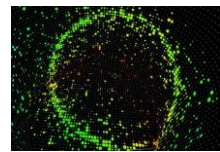
Atès a que la Terra actua com un escut contra totes les partícules excepte per a els neutrins, un telescopi de neutrins utilitza la detecció de muons cap amunt. El mitjà de detecció de muons pot ser un cos natural d'aigua o gel a través del qual el muó emet llum Cherenkov. La seva detecció permet la determinació de la trajectòria del muó.

Aquesta tècnica de detecció requereix discriminar muons cap amunt que van en contra del flux de muons atmosfèrics. Per simplificar la discriminació, el detector està instal·lat en un lloc profund on una capa d'aigua o gel serveix per protegir-lo.

Les partícules carregades emeten llum sota un angle característic quan passa a través d'un mitjà si la seva velocitat supera la velocitat de la llum en el medi.



Figura 15. Il·lustració de l'experiment ANTARES.



3.6. APLICACIONS A L'ESTUDI DE NEUTRINS

Arribar a comprendre i a conèixer les característiques dels neutrins pot ser molt útil per a l'àmbit científic i per al coneixement del nostre univers en diversos aspectes:

3.6.1. Estudi del sol i les reaccions energètiques

Estudiar els neutrins electrònics produïts al Sol pot donar-nos molta informació sobre el seu funcionament i sobre les reaccions donades al seu interior, anomenades cadenes protó-protó. Aquestes són una de les dues reaccions de fusió que es produeixen en les estrelles per a convertir l'hidrogen en heli, l'altre procés conegut és el cicle CNO. Les cadenes protó-protó són més importants en estrelles de gran grandària. El balanç global del procés és l'equivalent d'unir quatre protons i dos electrons per a formar un nucli d'heli-4 (2 protons + 2 neutrons).

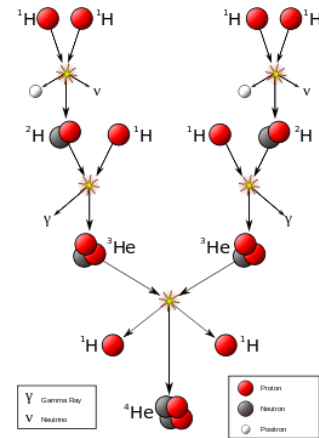


Figura 16. Cadena protó-protó.

3.6.2. Teorització de nous models de reactors nuclears.

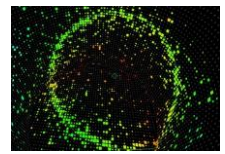
Totes les millores destinades a produir nous detectors més precisos per a la detecció dels neutrins podria servir alhora per a teoritzar nous models de reactors nuclears.

3.6.3. Estudi de supernoves i altres fenòmens astrofísics.

Els neutrins procedents dels raigs còsmics d'altas energies porten informació de fenòmens astrofísics produïts a regions molt llunyanes del nostre Univers. Per tant, l'estudi d'aquestes partícules podrien desvelar-nos moltes coses sobre els fenòmens de gran magnitud que es produeixen a les supernoves.

3.6.4. Estudi de la sobreexposició de matèria respecte l'antimatèria.

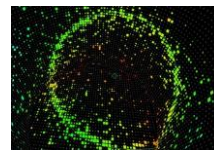
Degut a que els neutrins no tenen càrrega elèctrica, de la seva antipartícula només es diferencia per la seva helicitat. Per això, molts científics es pregunten si podrien canviar de neutrins a antineutrins, actuant com una mateixa partícula (estudi que realitzarem al marc pràctic d'aquest treball).



Si això fos cert, els neutrins podrien ser responsables de la inicial sobreexposició de matèria respecte a l'antimatèria originada al Big Bang, doncs ells mateixos podrien esdevenir la seva pròpia antipartícula.

3.6.5. Millor comprensió del model estàndard

Amb aquestes partícules, hem pogut ampliar el Model Estàndard i estudiar millor les interaccions que aquestes experimenten. Potser, desvelant alguns misteris que envolten els neutrins, hem de plantejar-nos noves vies d'estudi per a la física de partícules o, si més no, fer-ne algunes millores a les teories ja presents.



CAPÍTOL II: MARC PRÀCTIC

Ara que ja coneixem els neutrins i les seves propietats, passaré a explicar la part pràctica d'aquest treball. Focalitzaré aquesta part en l'estudi de neutrins com a partícules Majorana i al plantejament d'una sèrie de dubtes que em puguin servir per realitzar una tesi sobre la complexitat que té la realització d'un experiment capaç de demostrar aquest estudi. Ara bé, abans de res haureu de conèixer de que es tracta aquest terme anomenat Majorana.

1. FERMIONS DE MAJORANA

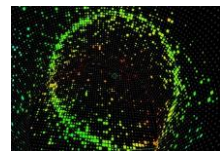
En física de partícules, s'anomena un fermió de Majorana aquell fermió que és alhora la seva pròpia antipartícula. Van ser nomenats per primer cop per Ettore Majorana el 1937.

El terme de Majorana es fa servir de vegades en oposició al fermió de Dirac, el qual descriu aquell fermió que no és la seva pròpia antipartícula. Avui dia, però, no es coneixen fermions de Majorana a la natura.



Figura 17. Fotografia d'Ettore Majorana.

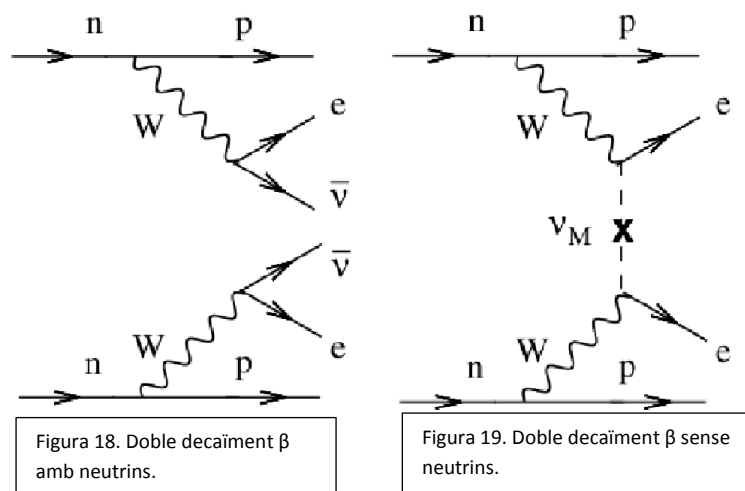
Tots els fermions del model estàndard, excepte el neutrí, es comporten com fermions de Dirac, però la natura dels neutrins no està assentada, i poden ser de Dirac, o bé de Majorana. És a dir, un neutrí podria ser un fermió de Majorana o un fermió de Dirac, degut a que no tenen càrrega elèctrica. Per aquest motiu, un neutrí podria tenir la capacitat d'esdevenir la seva pròpia antipartícula. Ara bé, per tal de demostrar que els neutrins son fermions de Majorana ha de produir-se un fenomen anomenat **dobte decaïment beta sense neutrins**.



2. DOBLE DECAÏMENT β SENSE NEUTRINS

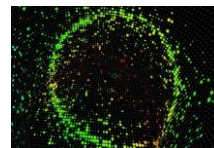
La reacció doble beta és aquella en la que en un nucli es produeix dues reaccions β^- , és a dir, dos neutrons es converteixen en protons. D'aquesta reacció surten dos antineutrins i dos electrons. Però, i si els neutrins fossin fermions Majorana? En aquest cas, podrien ocórrer dues coses: podrien aparèixer dos antineutrins i dos electrons (veure figura 18) o bé, podrien aparèixer únicament dos electrons i cap antineutrí (veure figura 19).

Això es produiria perquè el neutrí, en ser a la vegada la seva antipartícula (l'antineutrí), seria capaç d'invertir la seva naturalesa durant el seu recorregut. Aquest fet produiria que, al trobar-se amb l'altre neutrí amb un espín invers, els dos neutrins s'anul·lessin.



D'aquesta manera doncs, l'estudi del doble decaïment beta sense neutrins pot resoldre la qüestió de si els neutrins són partícules de Majorana o de Dirac (o totes dues alhora). I aquí és on ens topem amb el problema principal: com podem observar un doble decaïment beta sense neutrins?

Per a aquesta tasca s'ha tractat de realitzar un experiment anomenat GERDA.



3. EXPERIMENT GERDA

L'experiment GERDA utilitza enriquits díodes de vidre de Germani d'alta puresa (Germani 76) com a font per a la desintegració beta i detector de partícules. El conjunt de detectors es suspenen en un llac d'argó líquid revestit amb coure i envoltat per un tanc d'aigua ultra-pura. La raó principal d'utilitzar argó líquid a l'experiment és la necessitat d'eliminar la radiació que prové de l'exterior.

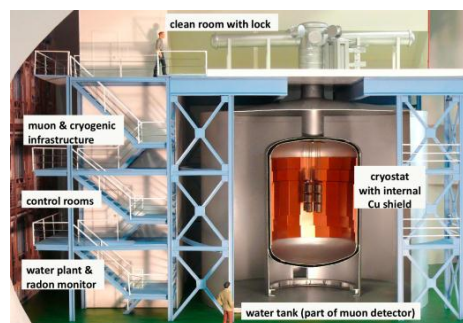
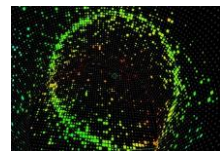


Figura 20. Experiment GERDA

Aquest experiment va ser proposat en 2004 i actualment es troba en procés d'obtenció de dades a Itàlia. En tot aquest temps, però, no s'ha pogut observar cap decaïment doble β sense neutrins, encara que la seva tasca està servint d'aprenentatge i de perfeccionaments per a projectes futurs.

Aquesta manca de resultats bé deguda a que la secció eficaç d'aquest procés és molt insignificant, per tant, la probabilitat de que això ocorri és molt baixa, aproximadament **d'un entre 10^{30} esdeveniments**. Això deixa un marge menor que 1 esdeveniment per any tenint en compte les masses utilitzades a l'experiment GERDA.

Donat a que aquest tipus d'experiment deixa poques opcions per al futur d'aquest estudi, m'he proposat a dissenyar allò que s'anomena a ciències un "**Gedanken Experiment**", que vol dir (traduït de l'alemany) Experiment Mental. Aquest terme fa referència a aquell recurs de la imaginació empleat per investigar la naturalesa de les coses, i fou utilitzat per primer cop per l'alemany Hans Christian Orsted en 1812. En el seu sentit més ampli és l'ocupació d'un escenari hipotètic que ens ajudi a comprendre cert raonament o algun aspecte de la realitat, que, en aquest cas, serà el de comprendre la naturalesa del neutrí.



4. ELABORACIÓ D'UN EXPERIMENT MENTAL

En primer lloc, explicaré una sèrie de conceptes que són indispensables de conèixer per al bon enteniment de l'experiment plantejat. En segon lloc, explicaré el procediment de l'experiment i les conclusions que he pogut extreure d'aquest.

4.1. HELICITAT I QUIRALITAT

La quiralitat, referint-nos en termes de física de partícules, és el fenomen que descriu el comportament de les partícules en un sistema de referència que pot ser right-handed o left-handed. És una propietat inherent de la partícula.

L'helicitat, en canvi, és la projecció de l'espín sobre la direcció del moviment i, per tant, pot canviar. D'aquesta manera, l'espín d'una partícula pot ser utilitzat per mesurar l'helicitat d'una partícula, que en cas de no tenir massa, és la mateixa que la quiralitat.

4.2. NEUTRINS COM A DIRAC I/O MAJORANA

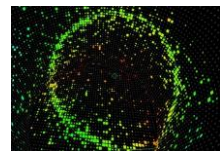
Com ja sabem, l'antineutrí és l'antipartícula del neutrí. Al no posseir càrrega, aquest leptó només és diferència del neutrí per la seva helicitat. Aquesta és la peculiaritat que fa pensar que el neutrí i l'antineutrí siguin la mateixa partícula. Així doncs, existeixen dues maneres de veure aquests leptons, que son com a partícules Dirac o bé com a partícules Majorana.

4.2.1. NEUTRINS SEGONS DIRAC

Segons les doctrines dels fermions Dirac, el neutrí i l'antineutrí no son la mateixa partícula. Això significa que existeixen neutrins amb una certa helicitat (right) i antineutrins amb una helicitat contrària a la dels neutrins (left). A més, d'acord aquesta teoria, existeixen uns altres leptons anomenats **neutrins estèrils**. Aquests neutrins, no son més que neutrins o antineutrins als quals se'ls ha invertit la seva helicitat, i no interactuen de cap manera amb la matèria.

$$\begin{array}{cc} \nu(L) & \neq & \bar{\nu}(R) \\ \nu(R) \times & & \bar{\nu}(L) \times \end{array}$$

Figura 21. Segons Dirac, el neutrí i l'antineutrí son partícules diferents i els neutrins que tenen una helicitat inversa a la seva, no interactuen amb la matèria. Les lletres R i L mostren l'helicitat, que pot ser Right (dreta) o Left (esquerre).



4.2.2. NEUTRINS SEGONS MAJORANA

Ara bé, si els neutrins fossin fermions de Majorana, l'antineutrí i el neutrí serien la mateixa partícula subatòmica. Això significaria que un neutrí hauria de ser capaç de comportar-se com un antineutrí en cas d'invertir la seva helicitat i la seva quiralitat. A més, segons aquesta teoria no existirien neutrins estèrils que no interactuessin amb la matèria, només neutrins de tipus Left o neutrins de tipus Right, sent el neutrí Right l'equivalent a l'antineutrí Dirac.

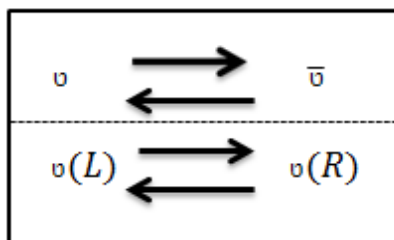
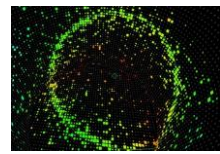


Figura 22. Segons Majorana, el neutrí i l'antineutrí son la mateixa partícula. No existeixen neutrins estèrils com diu la teoria de Dirac.



4.3. INVERTIR L'HELICITAT DEL NEUTRÍ

Com ja sabem, els neutrins són partícules amb massa i no viatgen a la velocitat de la llum (c). Això ens permet anar en un sistema de referència que acompanyi al neutrí (amb la mateixa direcció i velocitat) o, fins i tot, en un que tingui una velocitat major que la del neutrí. Partint d'aquest avantatge, podem plantejar-nos una hipòtesi: Podríem considerar un cos (el qual podria ser una nau espacial equipada amb un detector de neutrins) que pogués agafar qualsevol velocitat (menor que c) de manera que pugui veure la direcció de moviment del neutrí en sentit contrari respecte aquella amb la qual va ser emès a partir d'un nucli. Com a conseqüència, la seva helicitat també es veuria invertida, degut a que l'espín no variarà amb la velocitat de la nau.

Hem de tenir en compte algunes consideracions relativistes degut a que les velocitats dels neutrins són properes a la de la llum.

El moment lineal de la nau be determinat per la fórmula $\mathbf{P} = \boldsymbol{\gamma} \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{v}$, on

$\boldsymbol{\gamma} = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ i $\boldsymbol{\beta} = \frac{v}{c}$ (en aquesta última, v equival a la velocitat de la nau). Això

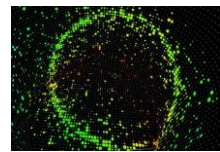
ens mostra que la nau no pot superar mai la velocitat de la llum, degut a que β seria major que 1 i tindriem l'arrel d'un nombre negatiu, fet que no és mesurable.

Podem apreciar, doncs, tres condicions:

- Per a $v = 0$, $\longrightarrow \beta = 0 \longrightarrow \boldsymbol{\gamma} = 1$
- Per a $v = c$ $\longrightarrow \beta = 1 \longrightarrow \boldsymbol{\gamma} = \infty$
- Per a $v > c$ $\longrightarrow \beta > 1 \longrightarrow \boldsymbol{\gamma}$ no és un nombre real i, per tant, v no pot ser major que c .

Per una banda, això ens explica el fet de que a un fotó, mai es podria aplicar aquest procés, doncs al no tenir massa, únicament viatja a la velocitat de la llum.

Per altra banda, encara que la massa del neutrí és molt petita (menor que la milionèsima part de la massa de l'electró) és diferent que 0 i, per tant, tindrà una velocitat propera a la de la llum però sempre menor que aquesta. Aquesta velocitat serà, llavors, assolible per a la nostra nau.



Si l'energia del neutrí és igual a la massa de l'electró (condició necessària perquè puguin produir-se electrons a les interaccions) el valor de β difereix de 1 tan sols en 10^{-12} . Per tant, la velocitat de la nostra nau hauria de ser superior de **0,9999999999999999c** (on c és la velocitat de la llum).

Per tal comprendre millor aquesta teoria, mostraré un exemple quotidià que es regeix per el mateix funcionament. Imaginem-nos que ens trobem en un tren, asseguts al seient que toca amb la finestra. Nosaltres, que ens trobem mirant el paisatge, veiem de sobte una bicicleta que ens creua. Aquesta bicicleta portava el mateix sentit que el tren. Malgrat això, observem que la bicicleta anava en sentit contrari, perquè el tren portava una velocitat major. Això és exactament el mateix que volem dur a terme amb el neutrí. És a dir, agafem com a punt de referència una nau que, al apropar-se al neutrí, observarà que aquest ja no va en el mateix sentit, sinó que va en sentit contrari.

Cal dir que podem conèixer la velocitat i l'espín del neutrí després de la desintegració degut a que sabem que tant el moment lineal (que ens descriu el moviment) com el angular (que descriu el gir) es conserven. Això ens permet comparar l'helicitat amb la que el neutrí va iniciar el seu recorregut amb la qual el detectem amb la nau. Considerarem una reacció com la següent [$Mg^{23} \rightarrow Na_{-}^{23} + e^{+} + \nu_e$] que, a més, serà un tipus de desintegració β que considerarem en el nostre experiment.

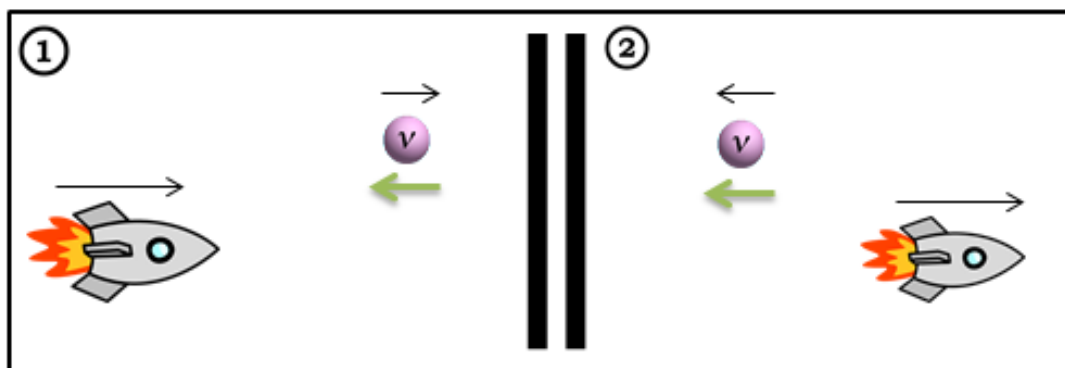
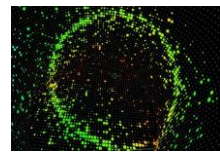


Figura 23. Representació del procés on les fletxes negres representen els vectors de velocitat dels cossos i les fletxes verdes mostren la direcció de l'espín de la partícula.



Un cop realitzada aquesta fase, entrariem en el procés de detecció del neutrí, amb el qual determinariem la seva naturalesa. Per dur això a terme, la nau hauria de portar equipada un detector de neutrins (de l'estil del Superkamiokande a T2K). Així doncs, ens trobaríem davant dos possibles resultats experimentals:

1. No detectem cap neutrí (o molt menys dels quals esperàvem trobar), el que voldria dir que han canviat la helicitat i el neutrí ha esdevingut estèril, fet que corroboraria que els neutrins pertanyen als fermions DIRAC.
2. Detectem antineutrins, el que suposaria que el neutrí, al invertir la seva pròpia helicitat, ha canviat a antineutrí i, per tant, són fermions MAJORANA.

Vist d'una altra manera, podem imaginar les diferents opcions com si fossin trencaclosques. D'aquesta manera veuríem:

1. Neutrí i antineutrí no són la mateixa partícula i, per tant, no poden encaixar en les dues interaccions. L'antineutrí únicament podrà complementar al bosó W^- i l'electró, mentre que el neutrí únicament ho farà amb el bosó W^+ i el positró.

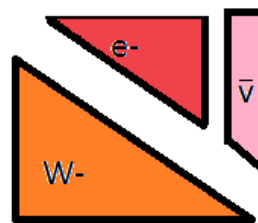
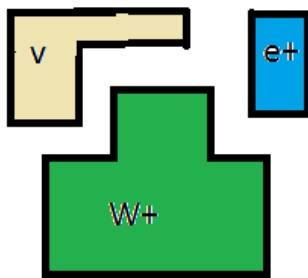
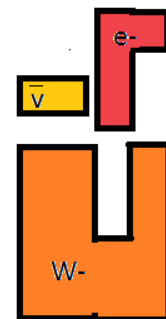
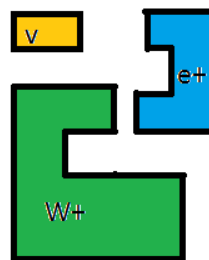
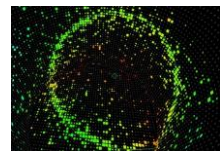


Figura 24. En el cas de Dirac, no podríem intercanviar la peça del neutrí per la de l'antineutrí, ni a l'inrevés.

2. Neutrí i antineutrí són la mateixa partícula i, per tant, poden intercanviar-se de lloc en les dues interaccions. Així doncs, el neutrí podria "encaixar" amb el bosó W^- i, alhora, l'antineutrí podria complementar la interacció amb el bosó W^+ i el positró.

Figura 25. En el cas de Majorana, podríem intercanviar la peça del neutrí per la de l'antineutrí i a l'inrevés.





4.4. CONCLUSIONS EXPERIMENTALS

Conceptualment podem veure que l'experiment conté unes bases sòlides i fiables. Malgrat això, tractar de dur-lo a la pràctica, resulta gairebé impossible per diferents motius. Per una banda, caldria equipar una nau amb un detector de neutrins (que com ja sabem són de magnituds enormes). Per altra banda, aquesta nau hauria de ser suficientment potent com per assolir una velocitat de 0,9999999999999999 vegades la velocitat de la llum. Això fa pensar si podríem replantejar l'experiment tractant d'invertir l'helicitat d'un neutrí en repòs en comptes de fer-ho amb un neutrí en moviment a altes velocitats (en altres paraules, l'energia del neutrí seria similar a la seva massa). Aquesta tasca requeriria ara una velocitat de $0,7c$ (0,7 vegades la velocitat de la llum). Ara bé, encara que seria notablement més assequible, continua sent impossible la construcció d'una nau capaç d'arribar a aquesta fracció de la velocitat de la llum equipada amb un detector com Superkamiokande.

Degut a la manca de recursos per reproduir un experiment com aquest, he provat de plantejar-me la tasca a nivell atòmic.

Considerem una desintegració β en la que un nucli es desintegra (canviant la seva naturalesa) de forma que s'emet un neutrí. Aquest neutrí es produeix amb una velocitat propera a la del nucli de manera que el nucli podria fins i tot anar a major velocitat que el propi neutrí. Si el nucli es desplaça amb una velocitat superior a aquest neutrí, obtindríem la inversió d'helicitat i de velocitat desitjats de la mateixa manera que ho obtindríem amb el cas de la nau anterior. A diferència dels experiments anteriors, el detector es trobaria fixe, i el que es trobaria en moviment seria el nucli emissor. Així doncs, la quantitat de moviment seria relativa respecte al nucli. A la figura 26 observem com, a la imatge 2, l'helicitat del neutrí queda invertida

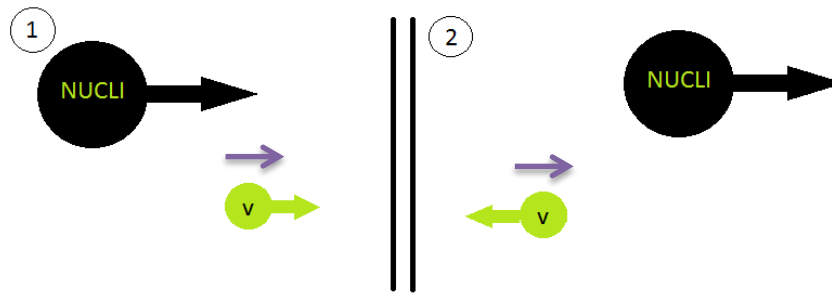
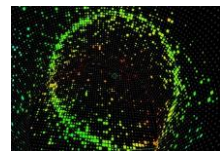
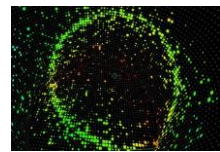


Figura 26. Representació del tercer experiment plantejat. La velocitat del neutrí és la relativa respecte del nucli emissor.

Tenint en compte que aquesta darrera opció no comporta la utilització de grans detectors equipats a una nau i viatjant a la velocitat de la llum (o molt propera a aquesta), aquest experiment resulta molt més factible que no pas els anteriors. Això fa pensar que potser, en un futur no molt llunyà, es podria arribar a aconseguir perfeccionar un experiment com aquest que sigui capaç de donar llum a aquesta incertesa sobre els neutrins.

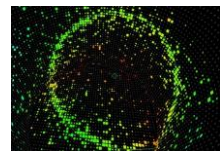


4.5. REPERCUSSIONS

La verificació dels neutrins com a fermions Majorana repercutiria a molts aspectes la física actual, fins i tot al Model Estàndard de la física de partícules.

Hauríem de plantejar-nos una nova classificació de les partícules? Fins ara hem estat segurs de que el Model Estàndard és la millor manera d'agrupar totes les partícules, però aquest classifica per separat les antipartícules de les seves partícules corresponents. Si la hipòtesi de Majorana resultés correcte, i els neutrins fossin la seva pròpia antipartícula, no podríem realitzar aquesta separació i, per tant, hauríem de cercar noves vies classificatòries o afegir modificacions dins d'aquest gran pilar de la física de partícules.

Per altra banda, si corroboréssim els neutrins de Majorana, hauríem de fixar-nos en altres propietats de les partícules per determinar la seva naturalesa doncs, com hem vist abans, gràcies a la inversió de la helicitat de la partícula podríem canviar d'una partícula a la seva antipartícula corresponent (sempre i quan aquesta no tingui càrrega).



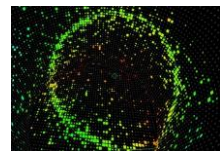
CAPÍTOL III: EXPERIÈNCIA PERSONAL

1. CONCLUSIONS

A nivell personal, la realització d'aquest treball ha significat tot un repte de concepció en aspectes que mai havia tractat abans i que m'han fet reflexionar en moltes ocasions. He pogut comprovar per mi mateix la importància d'organitzar totes les informacions rellevants alhora de plantejar-se una qüestió o un problema científic i la necessitat d'explicar les coses amb coherència i de la manera més concisa possible.

També he tingut l'oportunitat de tractar temes que afecten activament a la física actual amb autèntics físics i en els seus mateixos espais de treball, fet que m'ha permès veure la tasca que realitzen i la manera en la qual ho fan. El fet d'haver pogut treballar amb Federico Sánchez a la IFAE m'ha donat una visió cap a la recerca científica molt diferent a la qual tenia.

Per altra banda, el fet que premiessin amb el Premi Nobel de Física de 2015 el descobriment de les oscil·lacions de neutrins (verificant així que tenen massa), va resultar per a mi una gran motivació per continuar amb aquest estudi i em va animar a fer la millor tasca possible.



2. LLISTA DE REFERÈNCIES

LLIBRES

- FEYNMAN, Richard. *The Feynman Lectures on Physics*. Basic Books, EEUU; New York, 1965.
- KRANE, Kenneth. *Introductory Nuclear Physics*. .EEUU; New York, 1988.
- HOOFT, Gerardt. *Partícules Elementals*. Alemània 1996.
- EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. *Física cuántica*, Balderas, editorial Limusa, 1997
- GASIOROWICZ, Stephen. *Quantum Physics*, Estats Units ,John Wiley & Sons,1996

PUBLICACIONS

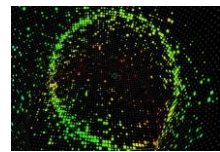
- WUNDNT, Benedikt. *Neutrino Helicity Reversal and Fundamental Symmetries*. Missouri, 2012.
- GÄRTNER, Stefan. *Neutrino Helicity Measurement*. University of Saskatchewan, 2005.
- KAYSER, Boris. *Are Neutrinos Their Own Antiparticles?* Fermilab, 2008.
- FERNÁNDEZ, Enrique. *Las Misteriosas Propiedades de los Neutrinos*. Universidad Autónoma de Madrid.

PRODUCCIONS AUDIOVISUALS

- *Els neutrins: els nous missatgers de l'espai* [exposició en directe de Juan José Hernández Rey]. Barcelona, Institut d'Estudis Catalans. Sala Nicolau d'Olwer, 15 de juny de 2015, 72 min.

ADRECES WEB

- ¿QUE SON LOS NEUTRINOS?, *Descubriendo la física* [en línia] <http://descubriendo.fisica.unlp.edu.ar/descubriendo/index.php/%C2%BFQu%C3%A9_son_los_neutrinos%3F> [consulta: 5.5.2015]



- NEUTRINOS ELECTRONICOS Y ANTINEUTRINOS, *hyperphysics* [en línea] <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/particles/neutrino.html>> [consulta: 28.5.2015]
- FÍSICA DE PARTÍCULES, *Physicsmaster* [en línea] <<http://www.physicsmasterclasses.org/exercises/bonn1/ct/modelestandard.html>> [consulta: 8.5.2015]
- BOSONS, *astrojem* [en línea] <<http://astrojem.com/teorias/bosones.html>> [consulta: 9.6.2015]
- T2K EXPERIMENT, *T2K* [en línea] <<http://t2k-experiment.org/>> [consulta: 19.5.2015]
- EL PARADOGMA DEL NEUTRINO Y SUS OSCILACIONES, *seminari de Francisco Gonzalez Hernández* [en línea] <http://uam.es/personal_pas/txrf/neutrino/neutrino.html> [28.7.15]
- NEUTRINO TRANSPARENCY TEMPERATURE, *Hyperphysics* [en línea] <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/astro/neutemp.html>> [consulta: 17.9.2015]
- EFECTES OF CP VIOLATING PHASES, *Worldscientific* [en línea] <<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0217732312500538>> [consulta: 8.10.2015]
- ANTARES EXPERIMENT, *antares* [en línea] <<http://antares.in2p3.fr/Overview/>> [consulta: 21.4.2015]
- AMANDA, *wikipedia* [en línea] <https://en.wikipedia.org/wiki/Antarctic_Muon_And_Neutrino_Detector_Array> [consulta: 22.7.2015]
- CADENA PROTÓN-PROTÓN, *wikipedia* [en línea] <https://es.wikipedia.org/wiki/Cadena_prot%C3%B3n-prot%C3%B3n> [consulta: 17.10.2015]
- GERDA, *The GERmanium Detector Array* [en línea] <<https://www.mpi-hd.mpg.de/gerda/>> [consulta: 23.07.2015]

