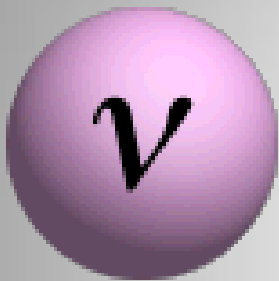


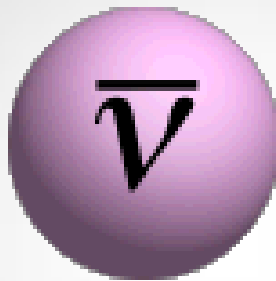
Física del segle XXI: estudi de les oscil·lacions dels antineutrins



Neutrino



Antineutrino

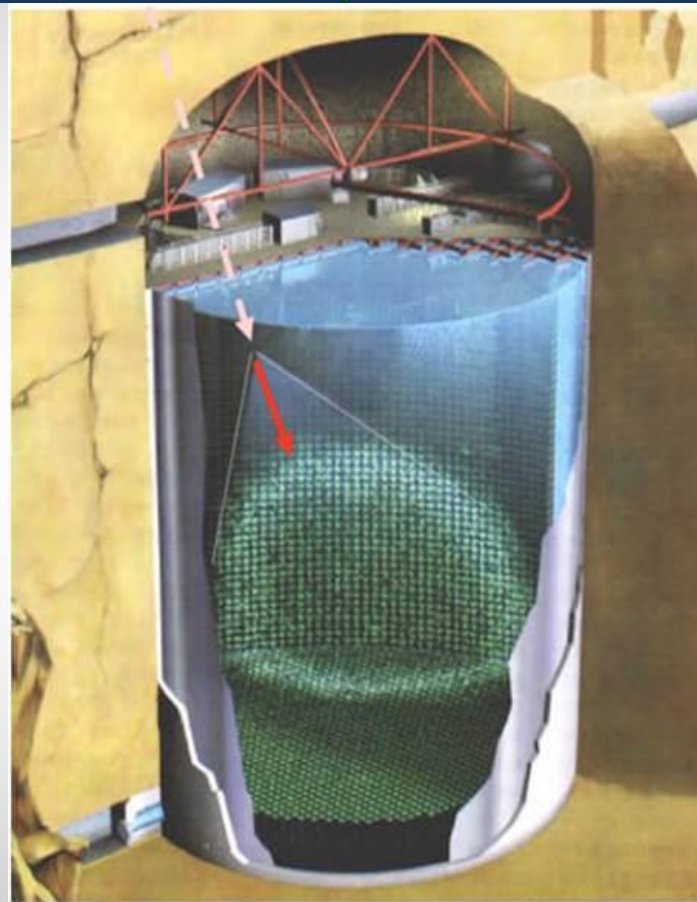


Joel Trinidad Marín

Tutor: Carlos Cruz Molina

Àmbit: Física

Data de lliurament: 21-1-16



Vull donar les gràcies a Joan
Ramírez, per la seva tutoria del
treball durant el curs passat,
a Carlos Cruz Molina per la tutoria
del treball durant el curs present i a
l'IFAE, especialment al seu
director Federico Sánchez, per
deixar-me visitar les seves
instal·lacions per tal de recaptar
informació indispensable pel
treball.

Moltes gràcies a tots tres, sense
vosaltres aquest treball no hauria
sigut possible.

Índex

Bloc 1	3
1.Introducció	3
2.Model estàndard.....	3
2.1. Forces elementals.....	3
2.1.1. Força forta	4
2.1.2. Força dèbil.....	4
2.1.3. Força electromagnètica.....	4
2.1.4. Força gravitatòria	5
2.2. Fermions	5
2.3. Bosons.....	6
2.4. Mesons.....	6
2.5. Antimatèria	7
2.6. Bosó de Higgs.....	8
3. Interacció entre partícules d'un àtom (fotons i gluons)	8
4.Neutrins.....	8
4.1.Definició i característiques	8
4.2.Historia dels neutrins.....	9
4.3.Oscil·lacions de neutrins.....	10
4.4.Tipus de neutrins	11
4.4.1.Neutrí electrònic	11
4.4.2.Neutrí muònic	12
4.4.3.Neutrí tauònic	12
4.4.4.Neutrí estèril	12
4.4.5.Antineutrí	13
5.Com interaccionen els neutrins?.....	13
6. Fonts de neutrins.....	14
6.1. Sol (fusió de les estrelles)	14
6.2. Fonts artificials.....	15
6.3. Fenòmens astrofísics	16
6.4. Radiació còsmica de fons.....	16
6.5. Atmosfera terrestre	17
7. Detecció de neutrins	17

7.1. Maneres de detectar un neutrí.....	17
7.1.1. Detecció del retrocediment d'un objecte impactat.....	17
7.1.2. Detecció de canvi de naturalesa en un objecte impactat.....	18
7.1.3. Detecció de ruptura d'un medi impactat.....	18
7.2. Detectors arreu del mon.....	19
7.2.1. ANITA.....	19
7.2.2. Extreme Universe Space Observatory.....	19
7.2.3. AMANDA i Ice Cube.....	19
7.2.4. ANTARES i KM3Net.....	20
7.2.5. Homestake.....	20
7.2.6. SuperKamiokande.....	20
8. Aplicacions al estudi de neutrins.....	21
8.1. Més matèria que antimatèria?.....	21
8.2. Estudi de la densitat de l'energia de la radiació de fons.....	21
8.3. Estudi de rajos còsmics.....	21
8.4. Manifestació de reaccions nuclears.....	22
8.5. Estudi del sol i de les reaccions energètiques en el univers.....	22
Bloc 2.....	22
9.Part experimental.....	22
9.1. T2K.....	22
9.2. El problema dels pions negatius.....	23
9.3. Secció eficaç dels neutrins i antineutrins.....	24
9.4. Probabilitats de oscil·lació dels neutrins.....	24
9.5. Que significa jerarquia normal e invertida.....	25
9.6. δ_{cp}	26
9.7. Distribució de Poisson.....	26
9.8. Taula de probabilitats i resultats obtinguts.....	27
9.9. Resultats de T2K.....	27
9.10. Probabilitat amb jerarquia normal.....	28
9.11. Probabilitat amb jerarquia invertida.....	28
9.12. Que es pot fer amb els resultats obtinguts ara?.....	29
9.13. Conclusions.....	32
10. Webgrafia.....	32
11. Bibliografia.....	36



Bloc 1

1.Introducció

De què estem fets els éssers vius? De cèl·lules es podria dir, i aquestes cèl·lules de molècules, aquestes molècules d'àtoms i aquests àtoms estan formats de partícules i finalment aquestes estan formades, quasi totes, per quarks.

En aquest treball ens centrarem en un tipus les partícules subatòmiques: els neutrins. Parlarem de les seves característiques, de com i on es formen, dels diferents experiments de neutrins que hi ha al món, finalment ens centrarem en l'experiment T2K, en el qual farem un petit estudi sobre els resultats del seu últim experiment, en el qual s'estudiaven les oscil·lacions de antineutrins en diferents òcp.

2.Model estàndard

El model estàndard de la física de partícules és una teoria que descriu les relacions entre les interaccions fonamentals conegudes i les partícules elementals que componen tota la matèria. És una teoria quàntica de camps desenvolupada entre 1970 i 1973 que és consistent amb la mecànica quàntica i la relativitat espacial. Fins a la data, gairebé totes les proves experimentals de les tres forces descrites pel model estàndard estan d'acord amb les seves prediccions. No obstant això, el model estàndard no arriba a ser una teoria completa de les interaccions fonamentals a causa que no inclou la gravetat.

Tres generacions de la matèria (fermions)

	I	II	III	
Quarks	u 2.4 MeV carga: 2/3 espín: 1/2 arriba	c 1.27 GeV 3/3 encanto	t 171.2 GeV 3/3 cima	Y 0 1 foton
	d 4.8 MeV -1/3 abajo	s 194 MeV -1/3 extraño	b 4.2 GeV -1/3 fondo	g 0 1 gluón
Leptones	e <2.2 eV 0 neutrino electrónico	μ <0.17 MeV 0 neutrino muónico	τ <15.5 MeV 0 neutrino tauónico	Z ⁰ 91.2 GeV 0 bosón Z
	e 0.511 MeV -1 1/2 electrón	μ 102.7 MeV -1 1/2 muón	τ 1.777 GeV -1 1/2 tauón	W [±] 80.4 GeV ±1 1 bosón W

Bosones de gauge

Figura 1. Partícules elementals

D'acord amb el Model estàndard hi han unes diverses forces que fan possibles les interaccions entre partícules, les forces són les següents:

2.1. Forces elementals

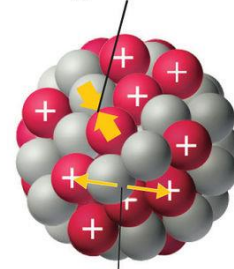
El Model Estàndard també descriu les diferents forces que actuen sobre les partícules anomenades anteriorment.



2.1.1. Força forta

Aquesta força és la que manté unides les partícules del nucli del àtom, protons i neutrons, en contra de les fortes repulsions que aquestes senten a causa de les seves càrregues elèctriques. És una força molt forta però de molt poc abast, aquesta força pot ser considerada una força residual, com una força entre

Strong nuclear force



Electrostatic repulsion

dos àtoms neutres, de la força de color, ja que la força de color és la força que actua sobre els quarks, i els neutrons i els protons estan formats per quarks, per

Figura 2. Esquema basic de com actua la força forta

culpa de això la partícula mediadora de aquesta força és el gluó, ja que és la partícula que regula les interaccions entre quarks, aquesta força només actua sobre quarks i gluons, no actua sobre els leptons.

2.1.2. Força dèbil

Aquesta força es produeix gràcies als bosons W i Z, que són les seves partícules portadores. És l'única capaç de canviar el color d'un quark, és la

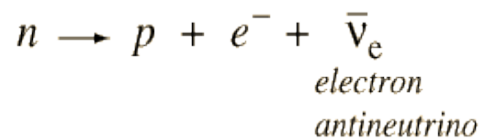


Figura 3. Esquema basic de una desintegració beta

responsable de fenòmens naturals com la desintegració beta (procés en el qual un neutró es desintegra en un protó, un electró i un neutrí electrònic) i de la radioactivitat. És una força que pot actuar tant sobre leptons com sobre quarks.

2.1.3. Força electromagnètica

És una força que es manifesta a través de les forces entre càrregues elèctriques (lleis de Coulomb), i les forces magnètiques (força de Lorentz). Són manifestacions de les forces d'intercanvi en les quals s'intercanvien fotons. És una força de rang infinit, manté unides les molècules dels àtoms, concretament els electrons, ja que, a causa de les càrregues elèctriques del electró i el protó, aquests es veuen atrets. La partícula portadora d'aquesta força és el fotó.

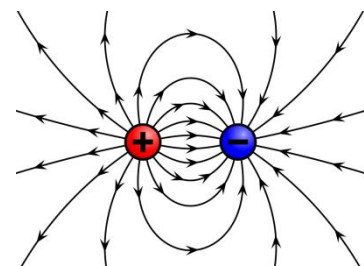


Figura 4. Esquema basic de forces elèctriques



2.1.4. Força gravitatòria

És una força que actua sobre qualsevol dels cossos existents, els que tenen massa. La intensitat d'aquesta força depèn de la massa dels dos o més cossos que interaccionen i de la distància entre ells. Aquesta força és la que descriu molts dels fenòmens astronòmics, com per exemple les òrbites dels diferents satèl·lits dels planetes. És una força molt dèbil però d'abast infinit,

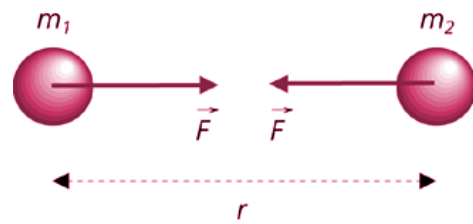


Figura 5. Representació de la força gravitatòria

tant que si poséssim dos cossos amb la més mínima massa i un a cada punta de l'univers, encara es crearia una interacció gravitatòria entre ells. Aquesta força deu el seu abast infinit a la seva partícula portadora, ja que aquesta té massa nul·la si es troba en repòs, per tant, ha d'estar en constant moviment. Segons la teoria de la relativitat espacial la força gravitatòria es defineix com una deformació del teixit espai-temps, provocada per una massa.

2.2. Fermions

Es caracteritzen per tenir un espín semienter, el espín es una de les propietats físiques de les partícules subatòmiques, en concret el moment cinètic intrínsec.

De fermions hi ha tres famílies distintes, una per cada generació de partícules, aquest es divideixen en:

Quarks: Es caracteritzen per ser les úniques partícules que interaccionen amb totes les forces existents, tenen espín $\frac{1}{2}$.

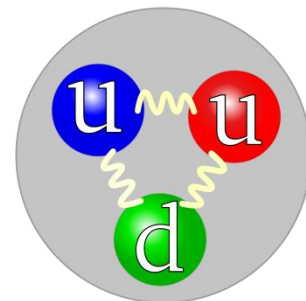


Figura 6. Quarks que formen un protó

Hi ha de sis tipus: up (u) i down (d) (primera família); strange (s) i charm (c) (segona família); bottom (b) i top (t) (tercera família). Els quarks es diferencien pel sabor. Això es produeix a causa de la interacció feble de tots els fermions, i en aquest cas els quarks, que poden canviar de tipus; a aquest canvi se li denomina sabor. Els bosons W i Z, que seran explicats al punt 2.3., són els que permeten el canvi de sabor en els quarks.



El sabor dels quarks up i down és el isospín feble. El quark strange, té un nombre quàntic o sabor, homònim, anomenat estranyesa i té el valor de -1 . El quark charm és el sabor encantat i té el valor d' 1 .

Leptons: Els quals tenen spin $-1/2$ en el cas dels neutrins i $\pm 1/2$ en la resta, existeixen sis tipus de leptons; el muó, el electró, la tau i els seus respectius neutrins.

2.3. Bosons

Es caracteritzen per tenir el espín enter, en aquest grup trobem totes les partícules missatgera de totes les interaccions, ja sigui de la nuclear dèbil (bosons W i Z), interacció nuclear forta (gluons) o interacció electromagnètica (fotó).



Figura 7. Representació artística d'un foto

Els bosons es poden classificar en:

- Bosons compostos: Estan formats per més d'una partícula, aquest grup esta compostat per qualsevol nucli que tingui espín enter, alguns exemples són el carboni-14 i el heli-4.

- Bosons de gauge simples: Estan formats per una sola partícula. Trobem els fotons, els bosons W i Z, els gluons i bosó de Higgs. Els bosons també són les partícules portadores de les diferents forces, és a dir, són aquelles que transporten una força entre dues partícules, o el que és el mateix, fan possible les interaccions entre partícules.

Les partícules portadores són: el foto (interacció electromagnètica), el gluó (interacció forta), el gravitó (interacció gravitatòria), els bosons W i Z (interacció dèbil).

2.4. Mesons

Els barions són una família de partícules subatòmiques formades per tres quarks.

Al costat del protó i al neutró, dins de la família dels barions es troben també



les partícules delta (Δ), lambda (Λ), sigma (Σ), xi (Ξ) i omega (Ω). Els barions delta (Δ^{++} , Δ^+ , Δ^0 , Δ^-) estan compostos per quarks up i down, de manera que el spin total és $3/2$. Es desintegren en un pion i en un protó, un neutró.

Els barions lambda (Λ^0) estan compostos per un quark up, un down i un quark strange, amb els quarks up i down en un estat de spin isotòpic 0. Els barions sigma (Σ^+ , Σ^0 , Σ^-) estan compostos també per un quark estrany i la combinació d'un quark up i un altre down, però amb spin isotòpic 1. El Σ^0 posseeix la mateixa estructura de quarks que el Λ^0 (up, down i strange), pel que la seva desintegració és molt més ràpida que el Σ^+ (up, up, strange) i el Σ^- (down, down, strange).

Els barions xi (Ξ^0 , Ξ^-) estan compostos de dos quarks strange i un quark up o down. Es desintegren generalment en un pion i un barió lambda. El barió omega negatiu (Ω^-) està compost de tres quarks strange. El seu descobriment va suposar un gran avanç en l'estudi dels processos dels quarks, ja que només des de llavors es va poder predir la seva massa i la seva desintegració.

2.5. Antimatèria

En el model estàndard per cada partícula hi ha una antipartícula. Aquestes es poden definir com les partícules amb la mateixa massa però les càrregues de signe oposat a les especulades pel model estàndard, és a dir, que estiguin formades pels quarks contraris que les del model estàndard.

Una peculiaritat és que quan una

partícula es troba amb una antipartícula aquestes s'aniquilen mútuament i desprenen moltíssima energia, concretament l'equivalent a dues vegades la massa de la partícula.

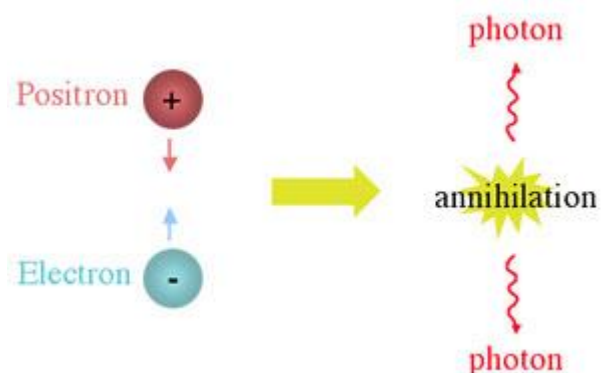


Figura 8. Esquema de l'aniquilació entre un electró i un positró



2.6. Bosó de Higgs

El Model Estàndard en l'actualitat ha encertat quasi bé totes les seves prediccions i és considerada la teoria base de la física de partícules per quasi tots els científics.

L'any 2012 es va incloure una nova partícula elemental al model estàndard, el bosó

de Higgs, el qual va servir per poder explicar perquè determinades partícules no tenen massa.

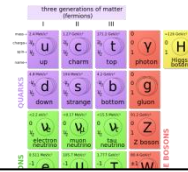


Figura 9. Partícules elementals del model estàndard a l'actualitat

3. Interacció entre partícules d'un àtom (fotons i gluons)

La interacció entre les partícules dels àtoms es poden produir de diverses maneres:

-Amb interacció forta: és la interacció que permet als quarks unir-se i formar hadrons. Té una intensitat molt forta però només és atractiva i apreciable a distàncies molt curtes, de l'ordre del radi atòmic. La partícula portadora d'aquesta interacció és el gluó, aquesta interacció és descrita a la Teoria de Cromodinàmica Quàntica proposada en la dècada de 1980.

-Amb interacció dèbil: és la causant dels canvis de sabor en les partícules, també pot produir atraccions o repulsions entre partícules. Produeix desintegracions beta. La teoria de Glashow-Weinberg-Salam estudia aquesta interacció, juntament amb l'Electrodinàmica Quàntica, en el anomenat Model Electrò-dèbil, la seva partícula mediadora són la W i la Z. La seva intensitat és menor que l' electromagnètica i el seu abast menor que el de la interacció forta. Les reaccions produïdes per interacció dèbil són molt més lentes que les produïdes per interacció forta.

4. Neutrins

4.1. Definició i característiques

El neutrí és una de les partícules elementals. Es produeix en la desintegració d'elements radioactius. Pertany al grup dels leptons. Es tracta de partícules sense càrrega elèctrica, això vol dir que no es veu afectat per la força electromagnètica. En medi material aconseguixen viatjar més ràpid que la llum. Només es veuen afectats per la força gravitatòria i per la dèbil, això fa que puguin viatjar distàncies molt llargues sense veure's absorbits pels nuclis de la



matèria.

N'hi ha de tres tipus de sabor, electrònic (si deriva del electró), muònic (si deriva del muó) i tauònic (si deriva del tauó), els neutrins poden rotar entre els tres tipus.

Els neutrins tenen tres tipus masssics, anomenats 1, 2 i 3, els quals son combinacions del tres tipus de sabor abans nomenats

Els neutrins tenen un espín paral·lel al moviment que descriuen. Mo interaccionen quasi gairebé mai, ja que només interaccionen a través de la interacció dèbil, a causa d'això, són molt difícils de detectar.

Els neutrins esdevenen les partícules més abundants de l'Univers (cada segon passen per la nostra unglà uns 65 milions de neutrins). La formació dels neutrins depèn fortament de la temperatura a la qual es troba i el lloc on es formen. La temperatura de fons dels neutrins és inferior a la temperatura de la radiació de fons, ja que el punt de transparència dels neutrins va esdevenir abans que el de la radiació de fons.

La seva massa és molt baixa, específicament entre 0,005 i 0,5 eV, quan un neutrí oscil·la també interacciona.

Una característica molt especial dels neutrins és la següent, quan un neutrí és detectat es comporta com un dels tipus de neutrins en concret, però quan no està sent detectat el neutrí esdevé una mescla de diferents tipus de neutrins.

4.2.Historia dels neutrins

En aquest apartat farem un breu incís en l'història dels neutrins. L'existència del neutrí va ser proposada el 1930 pel físic Wolfgang Pauli per compensar l'aparent pèrdua d'energia i moment lineal en la desintegració β dels neutrons segons la següent equació:

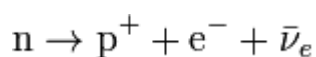


Figura 10. Equació d'una desintegració beta

Wolfgang Pauli va interpretar que tant la massa com l'energia serien conservades si una partícula hipotètica anomenada «neutrí » participés en la



desintegració incorporant les quantitats perdudes, la qual no es detectava en les reaccions.

El 1956 Clyde Cowan i Frederick Reines van demostrar la seva existència experimentalment. Ho van fer bombardejant aigua pura amb un feix de més de 10¹⁸ neutrins per segon. Van observar l'emissió subsegüent fotons, quedant així determinada la seva existència.

El 1962 Leon Max Lederman, Melvin Schwartz i Jack Steinberger mostrar que existia més d'un tipus de neutrí en detectar per primera vegada al neutrí muònic.

L'any 1998 el SuperKamiokande demostra que el neutrí té massa de valor no zero.

L'any 2000 va ser anunciat per part de la Col·laboració DONUT en Fermilab el descobriment del neutrí tauònic.

4.3. Oscil·lacions de neutrins

Es denomina oscil·lació al fenomen pel qual un neutrí és capaç de canviar els seus sabor.

Aquestes ocorren entre estats de diferents neutrins. La idea bàsica és que si almenys un neutrí té massa no nul·la, això fa que sigui de gran interès teòric i experimental. Els neutrins creats en les interaccions febles no són estats d'una massa particular sinó que els estats de sabor

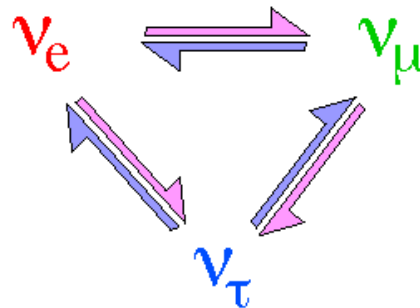


Figura 11. Diferents tipus de neutrins

d'un neutrí (electró, muó i tauó) serien combinacions lineals dels autoestats de la massa. Aquestes oscil·lacions no es produeixen només en un sentit, per exemple, si tenim un neutrí muònic, aquest després de haver viatjat una certa distància haurà deixat de ser de tipus muònic i es convertirà en una mescla de dos o tres tipus de neutrins, i al cap d'una certa distància podrà tornar a ser muònic, una característica curiosa de les oscil·lacions de neutrins és el fet de les masses, ja que per exemple un neutrí que estigui oscil·lant, és a dir que sigui una mescla de dos o tres tipus de sabors, tindrà una massa definida, però un neutrí d'un tipus concret no tindrà massa definida.



Aquesta transformació es realitza mitjançant una matriu unitària tridimensional caracteritzada per tres angles de mescla. Els estats de massa estan relacionats amb els estats de sabor mitjançant una transformació unitària donada per una expressió de la forma:

$$|N1\rangle = \cos \theta_{12} | \nu_e \rangle + \sin \theta_{12} | \nu_\mu \rangle$$

$$|N2\rangle = -\sin \theta_{12} | \nu_e \rangle + \cos \theta_{12} | \nu_\mu \rangle$$

On θ_{12} és l'angle d'oscil·lació dels neutrins electrònics a muònics i viceversa. De forma similar hi ha altres dos angles θ_{13} i θ_{23} que relacionen els neutrins electrònics i tau, i mu i tau, respectivament. La matriu unitària general que descriu l'oscil·lació dels tres sabors de neutrins es diu matriu de Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNs).

Per determinar els valors dels angles θ_{12} , θ_{13} i θ_{23} de l'oscil·lació s'observen raigs de neutrins de cert sabor generats per una font controlada i s'observa l'aparició o desaparició de neutrins de l'esmentat gust. En funció de la distància recorreguda i la probabilitat observada s'estimen els valors dels angles d'oscil·lació.

Els neutrins arriben a un moment en el qual ja no oscil·len, això és a causa del fet que des del moment en què el neutrí es forma, els tres tipus masssics que el formen es van separant lentament, ja que cadascun té velocitats diferents, aquesta distància anirà augmentant fins que els tres tipus masssics no puguin interactuar entre ells i per tant, el neutrí no podrà oscil·lar. En les oscil·lacions de neutrins es produeix una violació de la simetria CP, és a dir, existeix un δ_{cp} .

Que és el δ_{cp} serà explicat a la segona part d'aquest treball.

4.4. Tipus de neutrins

4.4.1. Neutrí electrònic

L'electró-neutrí (o neutrí electrònic) és una partícula elemental que pertany al grup dels leptons. Té spin $\frac{1}{2}$, i una massa màxima d'un milió de vegades menor a la de l'electró, però no nul·la.

Pertany a la primera generació de partícules, i és company de l'electró. Va ser hipotetitzada per primera vegada per Wolfgang Ernst Pauli el 1930, per



donar compte de la manca d'impuls i energia en la desintegració beta, i va ser descobert el 1956 per Clyde Cowan i Frederick Reines, són el tipus de neutrins més abundants del univers, ja que són produïts en grans quantitats per les estrelles.

4.4.2. Neutrí muònic

El neutrí muònic és una partícula elemental que pertany al grup dels leptons. Té espín $\frac{1}{2}$, i una massa molt petita, però no nul·la.

Al setembre de 2011, l'experiment OPERA del CERN va obtenir atenció internacional quan es va anunciar la possible detecció de muons neutrins viatjant a una velocitat superior a la velocitat de la luz. Posteriorment es va descobrir que l'anomalia havia estat causada per problemes amb l'equipament.

4.4.3. Neutrí tauònic

El tau neutrí o neutrí tauònic és una partícula elemental que pertany al grup dels leptons. Té spin $\frac{1}{2}$, i una massa com a molt un milió de vegades menor que la de l'electró, però no nul·la.

Juntament amb la tau, forma la tercera generació de leptons, d'aquí el seu nom de tau neutrí. La seva existència es va deduir immediatament després de detectar la partícula tau en una sèrie d'experiments entre 1974 i 1977 per Martin Lewis Perl en el grup SLAC-LBL.

Son molt poc detectats i investigats a causa de la manca de neutrins d'aquest tipus i a la manca d'equipament necessari per poder detectar-lo, ja que son neutrins de més baixa energia que els altres tipus.

4.4.4. Neutrí estèril

El neutrí estèril és una partícula hipotètica, ja que mai ha estat detectada, va ser teoritzada per poder explicar el baix flux de neutrins creats per sol, ja que el flux de neutrins rebut estava molt per sota del calculat, i postular una partícula que expliqués aquest baix flux era l'única manera de explicar-lo d'una manera conforme al Model Estàndard.

Aquest neutrí, al contrari que la resta, té el seu espín en el mateix sentit que el moviment que descriu, més vulgarment dit "cap a la dreta, això fa que no interaccioni amb res i que sigui impossible de detectar, de moment.



4.4.5. Antineutrí

L'antineutrí és l'antipartícula del neutrí, però com que aquest no té carrega elèctrica, són gairebé iguals.

L'antineutrí, al contrari que el neutrí normal, té el spín en el mateix sentit que el moment lineal.

Aquesta partícula podria explicar el fet que avui dia hi hagi més matèria que antimatèria, ja que un neutrí pot oscil·lar en un antineutrí i viceversa. Té una massa igual que la del neutrí.

Es tracta d'una partícula inestable, ja que en qualsevol moment pot oscil·lar en uns altres tipus de neutrí.

Al contrari que els neutrins, l'antineutrí només interacciona quan el seu espín té el mateix sentit que el moviment que descriu, si el seu espín és contrari al moviment que descriu aquest esdevé un antineutrí estèril, és a dir, no interacciona mai.

5. Com interaccionen els neutrins?

Els neutrins poden interactuar a través del corrent de neutre (que implica l'intercanvi d'un bosó Z) o corrent carregat (que implica l'intercanvi d'un bosó W).

En una interacció de corrent de neutre, el neutrí deixa el detector després d'haver transferit part de la seva energia i un impuls a una partícula de destinació. Els tres sabors de neutrins poden participar independentment de l'energia del neutrí. No obstant això, no hi ha informació del sabor del neutrí que es queda enrere.



En una interacció de corrent carregat, el neutrí es transforma en el leptó equivalent al seu sabor (electró, muó, tau o). No obstant això, si el neutrí no té l'energia

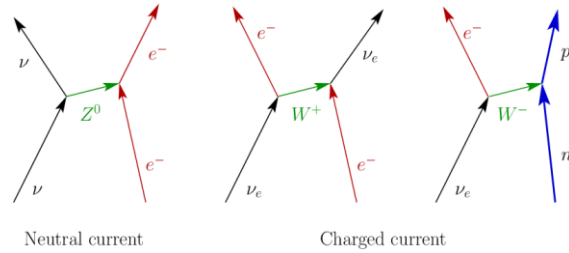


Figura 12. Diagrama de Feynman de les diferents interaccions que pot tenir un neutrí

suficient per crear la massa del seu

soci més pesat, la interacció de corrent carregat no serà possible. Els neutrins solars i provinents de reactors tenen prou energia per crear electrons. La majoria dels feixos de neutrins basades en acceleradors també poden crear muons, i uns pocs poden crear Taus. Un detector que pot distingir entre aquests leptons pot revelar el gust del neutrí incident en una interacció actual carregada. A causa de la interacció s'intercanvia d'un bosó carregat.

En aquesta interacció la partícula de destinació també canvia el caràcter (per exemple, de neutrons a protons).

6. Fonts de neutrins

Els neutrins es creen o han sigut creats en llocs i/o reaccions distintes.

En aquest apartat farem un breu incís sobre on i com es creen els neutrins que hi ha al món.

6.1. Sol (fusió de les estrelles)

La generació de neutrins també es pot produir en les estrelles en les anomenades cadenes protó-protó.

La cadena protó-protó té diversos passos. En primer lloc, dos nuclis d'hidrogen (dos protons) es fusionen, produint un nucli de deuteri (un protó i un neutró), un neutrí electrònic i un positró. A continuació, aquest nucli de deuteri es fusiona amb un altre nucli d'hidrogen (un altre protó), de manera que es tenen dos protons i un neutró, és a dir, un nucli d'heli-3, i s'allibera un altre fotó molt energètic. En el pas final s'uneixen dos d'aquests nuclis d'heli-3 per donar un nucli d'heli-4, moltíssima energia fotònica, i dos protons lliures.

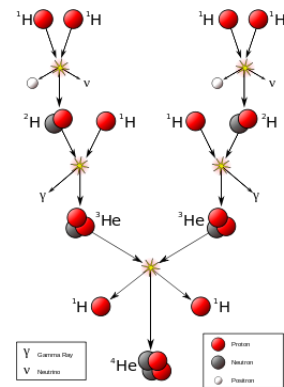


Figura 13. Esquema d'una cadena protó-protó



El Sol és la font més important de neutrins a través dels processos de desintegració beta de les reaccions que s'esdevenen en el seu nucli. Com els neutrins no interaccionen fàcilment amb la matèria, escapen lliurement del nucli solar travessant també la Terra. A part de les reaccions nuclears, hi ha altres processos generadors de neutrins, els quals s'anomenen neutrins tèrmics, ja que a diferència dels neutrins nuclears, s'absorbeix part de l'energia emesa per aquestes reaccions per convertir-la en neutrins. D'aquesta manera, una part de l'energia fabricada per les estrelles es perd i no contribueix a la pressió, sent la raó per la qual es diu que els neutrins són embornals d'energia.

6.2. Fonts artificials

Les principals fonts de neutrins artificials són les centrals nuclears, en les quals es poden arribar a generar uns 5.1020 antineutrins per segon; i en menor mesura, als acceleradors de partícules.

En primer lloc s'ha de produir un feix de protons, el qual es pot aconseguir amb l'ajuda de banyes magnètiques, les quals separen les partícules depenen de la seva carrega.

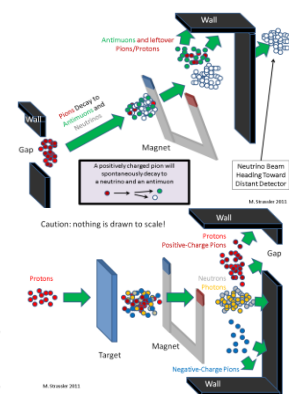


Figura 14. Esquema de la creació de neutrins artificialment

A continuació, concentrar el feix de protons en un "objectiu", només una planxa prima de material. Els protons arribaran als nuclis atòmics d'aquest material i els trencaran. Creant un raig de protons, neutrons, pions, i algunes altres partícules de carrer.

Un imant separa les partícules neutres, positives i negatives, amb partícules La majoria de les partícules s'aturen a la paret, però a través d'una bretxa les partícules amb càrrega positiva (principalment pions carregats positivament) d'un cert rang de moviment i l'energia poden passar.

Ara posi el feix prop d'un imant. Això farà que les partícules carregades es desviï, pe Així que els neutrons van recte; el pions carregats negativament fan una trajectòria corba cap a un costat; i els protons i els pions carregats positivament dobleguen cap a l'altre costat. Posem aquestes partícules contra una paret on es deixa una porta, així aconseguim que les partícules que



passen a través tinguin energies més o menys similars i la mateixa càrrega elèctrica. D'aquesta manera, en posar la porta al lloc correcte, es pot aconseguir un feix de pions carregats positivament o negativament depenen del experiment que es vulgui realitzar.

Els pions carregats positivament decauen en un antimuó i un neutrí, i els pions negatius decauen en un muó i un antineutrí. Després que la majoria hagin decaigut, un altre imant desvia les partícules carregades (muons o antimuons), deixant un feix de neutrins gairebé pur. Aquest raig va directe a través de les parets i la roca en el seu camí a un detector de neutrins distant.

6.3. Fenòmens astrofísics

Quan esclaten les supernoves (estrelles en la seva fase final) es formen neutrins de la mateixa manera que a les estrelles, a través de cadenes protó-protó.

A les supernoves tipus II són els neutrins els que provoquen l'expulsió de bona part de la massa de l'estrella al medi interestel·lar. L'emissió d'energia en forma de neutrins és enorme i només una petita part es transforma en llum i en energia cinètica.

6.4. Radiació còsmica de fons

Es creu que, igual que la radiació de microones de fons procedent del Big Bang, hi ha un fons de neutrins de baixa energia en el nostre Univers. Aquesta és una forma de radiació electromagnètica descoberta en 1965 que omple l'Univers per complet.

També es denomina radiació còsmica de microones o radiació del fons còsmic.

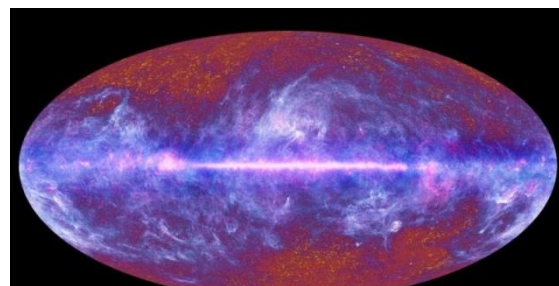


Figura 15. Imatge de la radiació còsmica de fons

Té característiques de radiació de cos negre a una temperatura de 2,725 K i la seva freqüència pertany al rang de les microones amb una freqüència de 160,2 GHz, corresponent-se amb una longitud d'ona de 1,9 mm. Quasi tota la



comunitat científica considera aquesta radiació com la prova principal del model cosmològic del Big Bang l'Univers.

6.5. Atmosfera terrestre

Sobre l'atmosfera terrestre incideixen raigs còsmics des de totes direccions de l'univers i sobre tota la seva superfície, això provoca que es generin neutrins de manera aleatòria que van també en totes direccions, també de manera aleatòria.

7. Detecció de neutrins

El disseny del detector consisteix en una massa gran d'aigua o gel, envoltada per un arsenal de detectors lleugers sensibles coneguts com a tubs fotomultiplicadors. Aquest disseny s'aprofita del fet que les partícules produïdes en la interacció del neutrí incident en un nucli atòmic viatgen normalment més ràpidament que la velocitat de la llum al mig del detector (per descomptat, viatgen més lentament que la velocitat de la llum en un buit).



Figura 16. Imatge d'un cos que emet radiació de Cherenkov

Això genera una "ona de xoc òptica" coneguda com a radiació de Cherenkov que es pot detectar pels tubs de fotomultiplicadors.

7.1. Maneres de detectar un neutrí

No Tots els detectors de neutrins funcionen de la mateixa manera, en aquest apartat s'explicaran diferents formes que hi han de detectar neutrins.

7.1.1. Detecció del retrocediment d'un objecte impactat

S'utilitza per detectar neutrins solars: un electró és colpejat pel neutrí, retrocedeix i es detecta per la seva radiació Cherenkov. Un exemple d'aquest detector és el SuperKamiokande. Aquest mètode es realitza de la següent manera: es llencen neutrins i aquest, en interaccionar, poden formar un leptó carregat, això és possible, ja que el leptó carregat detectat és en general un electró, un muó, o les seves antipartícules: la tau és molt més difícil de produir en primer lloc, perquè és més massiu, i molt més difícil de detectar pel fet que és de molt curta durada. Després el leptó resultant pot ser estudiat de dues maneres. Es pot seguir la partícula per la seva ionització, o es pot detectar la



partícula per la radiació de Cherenkov que emet. Un exemple experiment que segueix la partícula carregada per la seva ionització és MINOS o T2K ND280 detector. Un exemple d'un detector que detecta la partícula carregada per la seva radiació Cherenkov és IceCube o la T2K lluny detector Super-Kamiokande.

Quan es tracta d'una reacció de baixa energia un neutrí electrònic dona un neutrí electrònic, és a dir, no oscil·la.

Si es tracta d'una reacció d'alta energia un muó i un neutró dona un neutró més un leptó.

7.1.2. Detecció de canvi de naturalesa en un objecte impactat

Aquest tipus d'experiment és capaç de detectar neutrins d'energia extremadament baixa. La idea és que el neutrí interactua amb un neutró i això dona un protó i un electró. A continuació, s'extreu químicament l'element diferent, i es compten el nombre d'àtoms que s'han generat observant les seves desintegracions radioactives. El mètode té seriosos desavantatges –

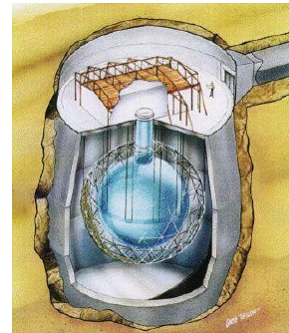


Figura 17. Dibuix del experiment Homestake

no es pot saber d'on ve el neutrí, quin és l'energia que tenia, o exactament quan es va produir la interacció - però és l'única manera de detectar neutrins amb energies inferiors a 1 MeV ($1,6 \times 10^{-13}$ J). Un exemple d'aquesta tècnica és el primer detector per analitzar neutrins del Sol: l'experiment Homestake establert per Ray Davis, on el clor-37 es converteix en argó-37 radioactiu.

7.1.3. Detecció de ruptura d'un medi impactat

Aquest experiment consisteix a impactar un àtom seleccionat, el qual es trenca, després un detector detecta alguna de les partícules en les quals s'ha trencat el àtom. Un exemple d'aquest experiment és l'SNO. En ell l'objecte impactat era un nucli de deuterí, que contenia un neutró, a més del protó usual. El nucli de deuterí es trencava, quan

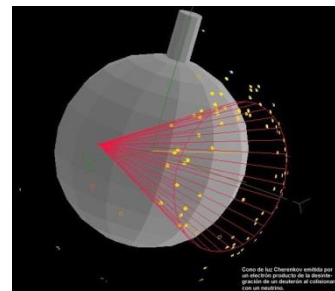


Figura 18. Esquema de dades del experiment SNO



rebia l'impacte del neutrí, en el seu protó constituent i en neutrons, després es detectaven els neutrons quan eren capturats per un altre nucli atòmic, o es captava el fotó d'alta energia i/o raigs gamma que s'emetien com a resultat de l'energia perduda en el procés.

7.2. Detectors arreu del món

Actualment hi ha moltes instal·lacions i experiments que estan destinats al estudi dels neutrins i/o antineutrins, en aquest apartat s'explicara, de manera general, dels diferents experiments i instal·lacions que hi ha arreu del món destinades al estudi dels neutrins i/o antineutrins

7.2.1. ANITA

ANITA és un radi telescopi dissenyat originalment per detectar neutrins d'ultra alta energia des d'un globus estratosfèric en vol sobre l'Antàrtida. Es tracta del primer observatori de neutrins posat en operació per la NASA.

ANITA funciona sobre la base del anomenat "efecte Askaryan" que prediu la producció d'emissions de ràdio coherents a partir de la cascada de partícules resultants de la interacció d'aquests elements d'alta energia, és a dir detecta perturbacions en les ones de ràdio com a conseqüència d'aquesta interacció.

7.2.2. Extreme Universe Space Observatory

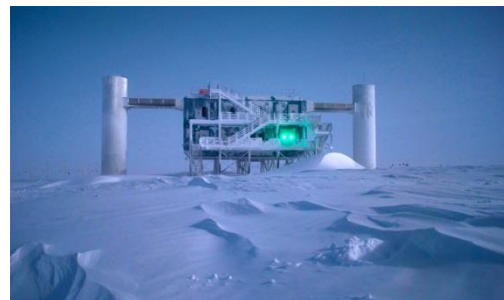
L'Observatori Espacial Univers Extrem (EUSO) és el primer concepte de la missió espacial dedicada a la investigació dels raigs còsmics i neutrins d'energia extrema ($I > 5 \times 10^{19}$ eV). L'ús de l'atmosfera de la Terra com un detector gegant, la detecció es realitza observant la fluorescència produïda quan una partícula tal interactua amb l'atmosfera de la Terra.

7.2.3. AMANDA i Ice Cube

AMANDA i Ice Cube són dos detectors de neutrins els quals utilitzen el gel de l'Antàrtida per detectar neutrins energètics.

Estan formats per quilòmetres de gel de l'Antàrtida i situats a prop de l'Estació del

Pol Sud Amundsen-Scott. Estan enterrats sota de la superfície.





7.2.4. ANTARES i KM3Net

ANTARES és el nom d'un detector de neutrins que resideix a 2,5 quilòmetres sota el mar Mediterrani davant de la costa de Toulon, França. Està dissenyat per a ser utilitzat com un telescopi de neutrins direccional per localitzar i observar flux de neutrins de orígens còsmics en la direcció de l'hemisferi sud de la Terra.

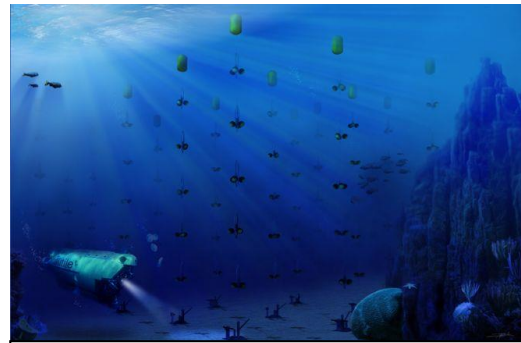


Figura 20. Representació del detector de neutrins ANTARES

ANTARES utilitza aigua en comptes de gel com a mitjà de Cherenkov. Com la llum en l'aigua és menys dispersa que en gel això resulta en un millor poder de resolució.

KM3NeT, un acrònim de Cubic Kilometre Neutrino Telescope, és una futura infraestructura europea de recerca que es troba al fons de la Mediterrània. Serà seu del telescopi de neutrins pròxima generació en la forma d'un detector Cherenkov d'aigua amb un volum instrumentat de més de cinc quilòmetres cúbics distribuïts en tres llocs a la Mediterrània.

7.2.5. Homestake

L'experiment Homestake (de vegades conegut com l'experiment de Davis) va ser un experiment dirigit pels astrofísics Raymond Davis, Jr. i John Bahcall al final de 1960. El seu propòsit era recollir i comptar els neutrins emesos per la fusió nuclear que tenen lloc al Sol.

Els resultats d'aquest experiment van ser els que van impulsar l'estudi de les oscil·lacions dels neutrins.

7.2.6. SuperKamiokande

El SuperKamiokande és un detector de neutrins situat al Japó, del qual es farà una explicació detallada en la segona part d'aquest treball, ja que és la base d'aquest TDR.

Entre els seus resultats destaca la seva col·laboració en la demostració de les oscil·lacions de neutrins.



8. Aplicacions al estudi de neutrins

El estudi dels neutrins no serveix únicament per esbrinar més característiques de aquestes partícules, sinó que, a més, poden ser la resposta a grans qüestions que intriguen al món de la física avui dia.

En aquest apartat s'explicaran diferents aplicacions que poden tenir els estudis de neutrins.

8.1. Més matèria que antimatèria?

El fet que els neutrins puguin oscil·lar entre totes les seves versions, amb molta facilitat podia ser una explicació de per què avui dia hi ha més matèria que antimatèria al univers, ja que en el moment del Big Bang hi havia la mateixa quantitat de matèria que de antimatèria.

Experiments com el Superkamiokande i DoubleChoz estan estudiant les característiques dels antineutrins i de les oscil·lacions dels neutrins per tal de poder aportar informació a aquesta teoria.

8.2. Estudi de la densitat de l'energia de la radiació de fons

Els neutrins, juntament amb els fotons, estan ajudant a estudiar la densitat de l'energia de la radiació de fons, ja que es té en compte la temperatura de transparència del neutrí i la quantitat d'energia dels fons de neutrins per tal de poder determinar-la.

8.3. Estudi de rajos còsmics

Nombrosos detectors han detectat al llarg dels anys grans quantitats de partícules (fotons, neutrins, pions, kaons, muons, etc...) produïdes a l'atmosfera terrestre a causa de rajos còsmics dels quals no se'n sap l'origen, doncs bé, hi ha físics que afirmen que aquest rajos còsmics podrien ser provocats per neutrins, ja que els rajos còsmics son partícules amb molta energia i els neutrins poden assolir aquesta energia.

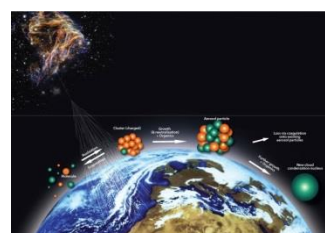


Figura 21. Esquema basic del procés provocat pels rajos còsmics a l'atmosfera



8.4. Manifestació de reaccions nuclears

A causa del fet que en les reaccions nuclears es produeixen neutrins, el estudi dels neutrins pot servir per entendre millor com funcionen les diferents reaccions nuclears i com es manifesten aquestes.

8.5. Estudi del sol i de les reaccions energètiques en el univers

L'observació dels neutrins produïts al sol va fer possible que s'entengui millor quina és l'energia que potencia a les estrelles, la qual és la fusió nuclear.

Els neutrins solars també van provocar una petita modificació del model estàndard per tal de donar-l'hi al neutrí una massa.

Bloc 2

9.Part experimental

A partir d'aquest apartat parlarem sobre la part pràctica d'aquest treball, la qual serà un estudi sobre els resultats obtinguts per T2K.

Però abans d'això s'han d'explicar diferents punts per tal de poder entendre el funcionament de T2K i el perquè d'aquest estudi.

9.1. T2K

T2K, l'experiment pertanyent al Superkamiokande anomenat així ja que els neutrins viatgen des de Tokai fins a Kamioka, té el següent funcionament:

Es llença un feix de protons, impacta en un blanc produint pions negatius i positius, aquests pions entren en una banya magnètica, aquesta és una peça amb un alt corrent, inventat pel físic holandès Simon van der Meer al CERN, que selecciona pions i els centra en un feix, a través de la força d'un camp magnètic. La banya magnètica s'ha d'utilitzar amb els pions, ja que els neutrins no poden ser enfocats amb els camps elèctrics o magnètics, ja que són elèctricament neutres.

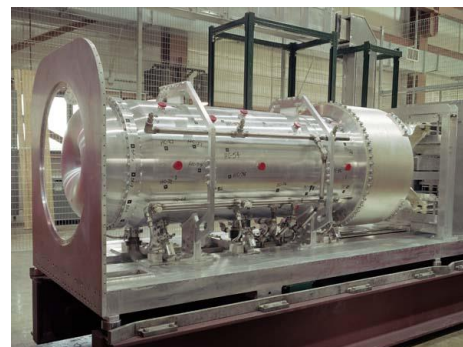


Figura 22. Imatge d'una banya magnètica



La forma de la banya i la força del camp magnètic poden ser sintonitzades per seleccionar una gamma d'energies de les partícules que es volen estudiar. D'aquesta manera, el feix de neutrins resultant esta centrat i es troba en un rang d'energies el qual s'ha triat prèviament.

Però s'ha de tenir en compte que la banya magnètica no desvia el 100% de les partícules que es volen desviar, una petita quantitat d'aquestes aconseguen travessar-la sense desviar-se, llavor s'ha de tenir en compte que en els moments posteriors a aquest tindrem un nombre de partícules les quals no serveixen per al estudi en qüestió i a les quals anomenarem “soroll de fons” Quan els pions després decauen en muons i neutrins o antineutrins, s'obté un feix de neutrins ben enfocada.

Aquest feix passa per les diferents capes de matèria per tal d'eliminar la resta de partícules que no siguin neutrins. Finalment les partícules arriben al detector on són detectades per detectors fotosensibles i són estudiades.

En aquest treball ens centrarem en els antineutrins, ja que T2K acaba de publicar els resultats sobre l'estudi d'aquest i realitzarem un petit estudi amb aquests resultats.

9.2. El problema dels pions negatius

L'estudi d'antineutrins seria medianament fàcil si no fos perquè es produeixen a partir del decaïment dels pions negatius, i aquest, es formen menys que de pions positius. Això és a causa dels quarks que els formen, mentre que el pió positiu esta format per un quark up i un quark antidown el pió negatiu esta format per un quark down i un quark antiup, i com

els pions es poden formar a partir de dues reaccions, col·lisió proto (quarks uud)-protó (quarks up, up, down) i proto (uud)-neutró (udd), això implica que en les reaccions proto-protó els quarks u son més abundants, com es pot veure a continuació:

Proton proton = 2 u + 1 d + 2u + 1d = 4 u + 2 d

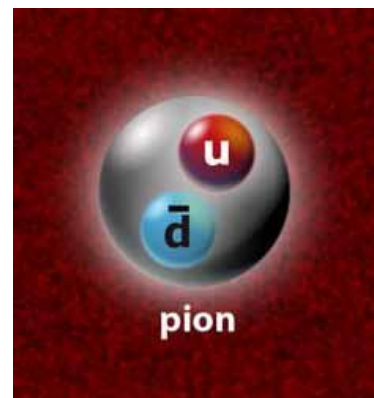


Figura 23. Representació artística d'un pió positiu



Proton neutron = $2u + 1d + 1u + 2d = 3u + 3d$

En total $7u + 5d$, és a dir, és més probable produir π^+ (u anti- d) que π^- (d anti- u).

Això provoca que els pions negatius siguin més difícils de produir. Això és un gran problema per al estudi d'antineutrins, ja que es tenen menys antineutrins i més soroll de fons.

9.3. Secció eficaç dels neutrins i antineutrins

En aquest apartat s'explicaran les diferències entre la secció eficaç dels neutrins i la dels antineutrins, però per poder fer això primer s'ha de definir que és la secció eficaç.

La secció eficaç és una mesura de la probabilitat d'interacció entre o partícules llançades contra un centre dispersor, és una magnitud escalar que té unitats de superfície, en certs casos representa la secció transversal efectiva vista pels projectils en aproximar-se al blanc. La secció eficaç és diferent entre les diferents interaccions de les diferents partícules i entre les diferents energies.

La secció eficaç dels antineutrins (tal com es pot apreciar en la figura 24) és sempre menor que la dels neutrins.

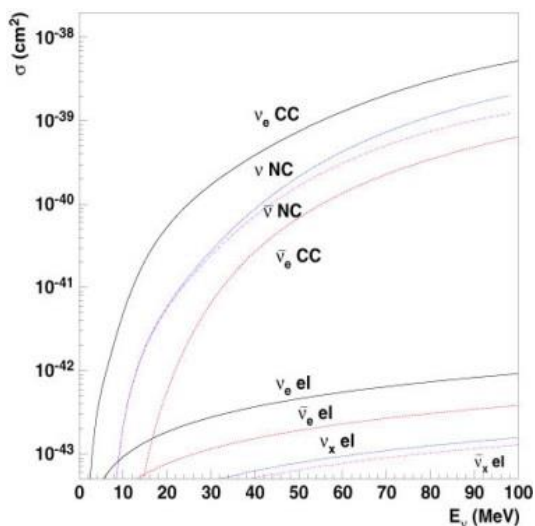


Figura 24. Gràfic de les diferents seccions eficaces dels diferents tipus de neutrins

Això, juntament amb el problema de producció dels antineutrins i la seva baixa interacció, fa que sigui difícil estudiar els antineutrins. Es produeixen menys i interaccions menys.

9.4. Probabilitats de oscil·lació dels neutrins



Se sap que la probabilitat que un neutrí oscil·li és inferior a 1, a causa de diferents experiments en el quals no s'arribava a mesurar un 100% dels neutrins del mateix sabor, sinó que es detectava una part com una mescla de diferents sabors de neutrins.

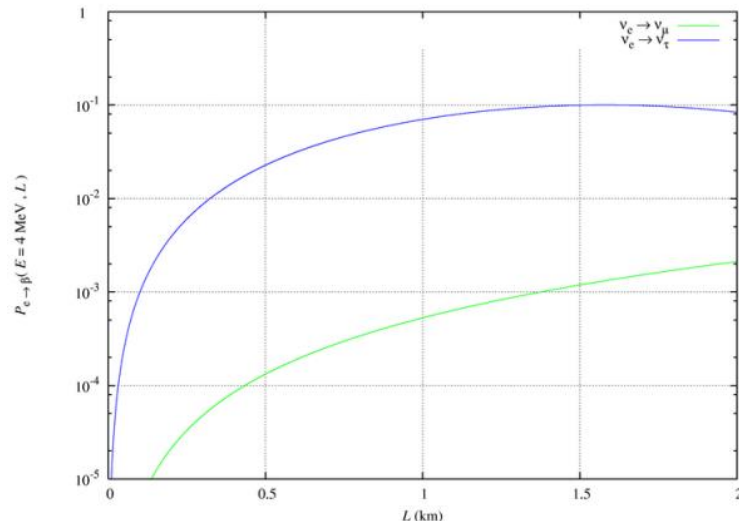


Figura 25. Gràfic de les probabilitats teòriques de que un neutrí oscil·li entre diferents sabors

La probabilitat que un neutrí oscil·li depèn de la distància amb el seu punt d'origen, tal com es pot observar en el gràfic.

Les probabilitats són diferents depenent de quin sabor a quin sabor oscil·len, això és a causa del fet que les probabilitats depenen de diferents paràmetres.

9.5. Que significa jerarquia normal e invertida

Abans d'entrar en detall sobre les diferents probabilitats calculades a partir dels resultats obtinguts per T2K cal explicar que són la jerarquia normal i la invertida:

Com ja s'ha explicat abans en aquest treball, els neutrins tenen tres estats massics, doncs bé la jerarquia té que veure amb ells:

Sabent que el estat massic 1 correspon al de més proporció de neutrí electró, el 2 al muó i el 3 a la tau.

Podem definir la jerarquia normal com el medi en què es compleix que el estat massic 1 és més gran que el 2, i el estat massic 3 és més gran que el 2. És a dir quan segueix la mateixa estructura de massa que los leptons associats. La jerarquia invertida és quan no es compleix lo explicat abans, és a dir, el estat massic 2 és més gran que el 1, i ja s'ha demostrat experimentalment que la massa del 3 és més gran que la del 2.



9.6. δ_{cp}

Es produeix un δ_{cp} quan no es compleix la simetria CP, és a dir, no es compleix ni l'afirmació que diu que les lleis de la Física serien les mateixes si es poguessin intercanviar les partícules amb càrrega positiva amb les de càrrega negativa (P), ni la que diu que les lleis de la física serien les mateixes si s'intercanviessin partícules per antipartícules (C). Les oscil·lacions de neutrins s'han d'estudiar amb diferents variacions de CP per tal de poder veure quina és la més probable.

9.7. Distribució de Poisson

La distribució de Poisson és una distribució de probabilitat discreta que expressa, a partir d'una freqüència d'ocurrència mitjana, la probabilitat que ocorri un determinat nombre d'esdeveniments durant cert període de temps. Concretament, s'especialitza en la probabilitat d'ocurrència de successos amb probabilitats molt petites, o successos "rars".

Es caracteritza per tenir un gran pic inicial i una llarga cua, tal com mostra la següent imatge:

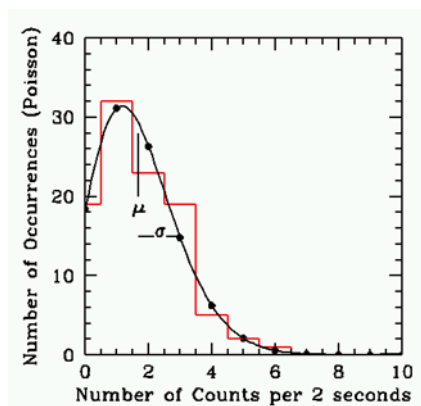


Figura 26. Exemple d'una representació de Poisson

La funció de massa o probabilitat de la distribució de Poisson és

$$f(k, \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$$

Figura 27. Funció de la distribució Poisson

on:



- k és el nombre d'ocurrències de l'esdeveniment o fenomen (la funció ens dóna la probabilitat que l'esdeveniment succeeixi precisament k vegades).
- λ és un paràmetre positiu que representa el nombre de vegades que s'espera que passi el fenomen durant un interval donat. Per exemple, si el succés estudiat té lloc en mitjana 4 vegades per minut i estem interessats en la probabilitat que ocorri k vegades dins d'un interval de 10 minuts, farem servir un model de distribució de Poisson amb $\lambda = 10 \times 4 = 40$.
- e és la base dels logaritmes naturals ($e = 2,71828 \dots$)

9.8. Taula de probabilitats i resultats obtinguts

A continuació veurem unes taules de probabilitats que un antineutrí muònic oscil·li en un antineutrí electrònic en diferents jerarquies i δ_{cp} , calculades a partir dels resultats del T2K, les taules són les següents:

En les taules podem observar:

Signal Anti ν_{μ} - anti ν_e = probabilitats que tinc de captar un antineutrí electrònic derivat a partir d'un antineutrí muònic.

Background ν_{μ} - ν_e = probabilitats que tinc de captar un neutrí electrònic derivat a partir d'un neutrí muònic. (llegir punts 9.4 i 9.5)

Background NC = probabilitats que tinc de captar un neutrí en el qual no es defineix el sabor. (veure punt 5).

Background other = probabilitats que tinc de captar un ν_e original, és a dir, que no ha oscil·lat i que s'ha produït en les col·lisions de protons en el accelerador. Aquestes probabilitats se sumen i el resultat és el nombre de successos que s'esperen per al δ_{cp} pertinent.

9.9. Resultats de T2K

Segons a els Resultats obtinguts paper T2K, als quals es van registrar en tres successos al detector llunyà (SuperKamiokande). El número tres és un nombre petit que es regeix per l'estadística de Poisson.



9.10. Probabilitat amb jerarquia normal

Basant-se en les mesures del nombre de protons en el accelerador i amb els coneixements de les seccions eficaces, es van calcular les probabilitats, amb un càlcul teòric, en jerarquia normal, que es produís un succés amb diferents δ_{cp} , tal com es pot observar en la següent taula:

Events esperats (IH)	$\delta_{cp} = -\pi/2$	$\delta_{cp} = 0$	$\delta_{cp} = \pi/2$
Signal $\bar{\nu}_\mu - \bar{\nu}_e$	1.961	2.636	3.288
Background $\nu_\mu - \nu_e$	0.592	0.505	0.389
Background NC	0.349	0.349	0.349
Background other	0.826	0.826	0.826
Total	3.73	4.32	4.85

Aquests càlculs han sigut extrets del article publicat per T2K al juliol de 2015.

Tenint en compte els resultats obtinguts i representats en aquesta taula es pot observar com el medi més cercà als resultats obtinguts és el qual hi ha un δ_{cp} prop de $-\pi/2$, i també es pot observar com pels altres valors es van allunyant dels resultats obtinguts per T2K, en el total, ja que en el soroll de fons les probabilitats es mantenen iguals menys per als del background $\nu_\mu - \nu_e$ que van disminuint.

En aquesta taula es pot observar que hi ha un romanent de soroll de fons de $\nu_\mu - \nu_e$ a causa de les limitacions de la generació i detecció de antineutrins. Com es pot observar l'efecte del canvi del valor de δ_{cp} afecta en direccions oposades a antineutrins (augmenten) que a neutrins (disminueixen), δ_{cp} fa que neutrins i antineutrins es comportin de manera diferent.

9.11. Probabilitat amb jerarquia invertida

Basant-se en les mesures del nombre de protons a l'accelerador i amb els coneixements de les seccions eficaces es van calcular les probabilitats, en jerarquia invertida, que succeís un succés amb diferents δ_{cp} , tal com es pot observar en la següent taula:



Events esperats (IH)	$\delta_{cp} = -\pi/2$	$\delta_{cp} = 0$	$\delta_{cp} = \pi/2$
Signal $\bar{\nu}_\mu - \bar{\nu}_e$	2.481	3.254	3.939
Background ν_μ - ν_e	0.531	0.423	0.341
Background NC	0.349	0.349	0.349
Background other	0.826	0.821	0.821
Total	4.18	4.85	5.45

Tenint en compte els resultats obtinguts i representats en aquesta taula es pot observar com el medi més cercà als resultats obtinguts és el qual hi ha un δ_{cp} de $-\pi/2$, i també es pot observar com els altres medis es van allunyant dels resultats obtinguts per T2K, en el total, ja que en el soroll de fons les probabilitats es mantenen iguals en tots els medis, menys para el de Background ν_μ - ν_e com hem explicat anteriorment.

Es pot observar com les probabilitats amb jerarquia invertida disten bastant dels resultats obtinguts pel T2K, però no el suficient com per no tenir-los en compte.

9.12. Que es pot fer amb els resultats obtinguts ara?

Amb els resultats obtinguts per T2K en aquest experiment, es pot estimar quin és el cas més probable de entre totes les possibilitats de les dues jerarquies, el qual és amb $\delta_{cp} = -\pi/2$ i jerarquia normal, ja que és el que té una probabilitat més propera als resultats obtinguts pel T2K. Les probabilitats de veure tres successos segons el nombre esperat amb els càlculs de T2K i calculades amb la fórmula de Poisson les mostrem en la següent taula:

	Jerarquia Normal	Jerarquia invertida
$\delta_{cp} = -\pi/2$	21%	19%
$\delta_{cp} = 0$	18%	15%
$\delta_{cp} = \pi/2$	15%	12%



Com es pot veure el més probable és $\delta_{cp} = -\pi/2$ i jerarquia invertida però amb els resultats obtinguts per T2K no es poden descartar la resta de possibilitats, ja que no hi ha suficient diferència entre les probabilitats i els resultats.

Per tant, per tal de poder definir quin és el cas més probable definitivament farà falta fer més experiments com el realitzat per T2K, més o menys com fer córrer T2K 100 vegades més que el actual, com demostraré ara.

Si tenim en compte que la taula explicada anteriorment provoca una probabilitat de tipus gaussiana, podem calcular quants successos farien falta per poder descartar totes les possibilitats menys un petit rang de valors arreu de 3.75. Si realitzem els càlculs pertinents obtenim que amb 10 vegades la producció actual de neutrins tindriem les següents probabilitats:

	Jerarquia normal	Jerarquia invertida
$\delta_{cp} = -\pi/2$	1.0 (esta agafat com a referent)	0.762275
$\delta_{cp} = 0$	0.627117	0.186094
$\delta_{cp} = \pi/2$	0.186094	0.0189551

Podem representar aquestes probabilitats a un gràfic com el següent:

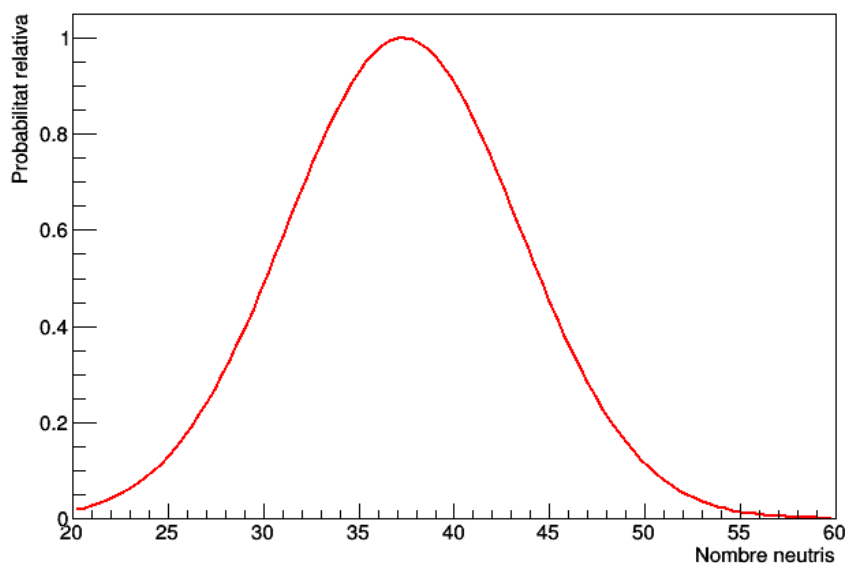


Figura 28. Gràfica de probabilitat relativa amb una producció 10 vegades més gran



Per tant amb una producció 10 més gran que l'actual podríem descartar l'opció més allunyada dels resultats obtinguts per l'experiment T2K (Jerarquia invertida i $\delta_{cp} = \pi/2$), però no la resta.

Si realitzem els càlculs pertinents amb una producció 100 vegades més gran que l'actual obtenim les següents probabilitats:

	Jerarquia normal	Jerarquia invertida
$\delta_{cp} = -\pi/2$	1.0 (esta agafat com a referent)	0.0662396
$\delta_{cp} = 0$	0.00940777	4.98118e-08
$\delta_{cp} = \pi/2$	4.98118e-08	5.98763e-18

Aquests resultats es poden representar en un gràfic com el següent:

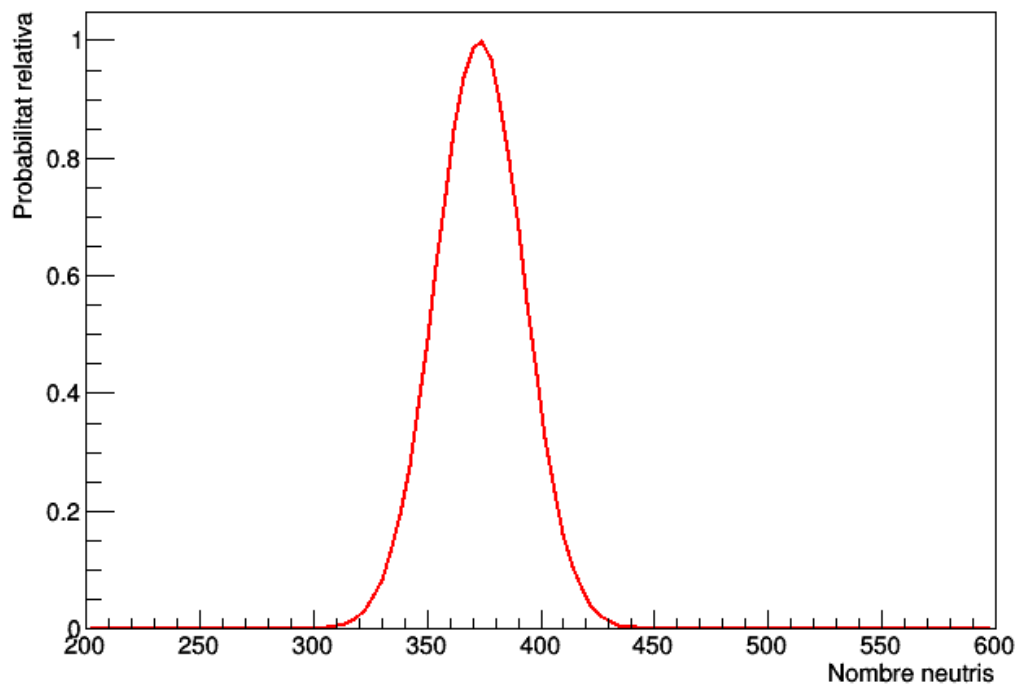


Figura 29. Gràfica de probabilitat relativa amb una producció 100 vegades més gran



Per tant, podem dir que amb una producció 100 més gran que l'actual podríem descartar la resta d'opcions i tenir com a vàlid un cert rang molt proper als resultats obtinguts per T2K.

9.13. Conclusions

Utilitzant mètodes estadístics similars als utilitzats en els experiments de neutrins (encara que simplificats), hem vist que els resultats de T2K afavoreixen lleugerament la jerarquia normal i $\delta_{cp} = -\pi/2$ però que no pot eliminar altres possibles resultats amb absoluta certesa. De fet aquest resultat també està afavorit per les mesures de T2K amb neutrins, la qual cosa és una bona indicació. De totes maneres, amb el estudi realitzat anteriorment podem arribar a la conclusió que faria falta que T2K funcionés amb una producció 100 vegades més gran que l'actual, és a dir, detectant 300 neutrins en comptes de 3, per tal de poder descartar totes les possibilitats menys 1 petit rang proper a 3.73. L'existència d'un valor de δ_{cp} diferent de zero en neutrins, és a dir, que es produeixi una violació de la simetria cp és, ara mateix, l'única explicació d'un univers fet sol de matèria.

L'entesa de l'univers en què vivim és una bona motivació per continuar prenent dades en T2K 100 vegades més. No podem operar T2K durant 100 anys, però els científics estan buscant maneres d'augmentar la producció de neutrins el que facilitaria la tasca.

10. Webgrafia

El Tamiz, la vida privada de las estrellas (en línia)

<<http://eltamiz.com/2007/09/06/la-vida-privada-de-las-estrellas-las-entranas-de-una-estrella/>> (consulta 1/3/2015)

Physicsworld, article ice cube finds còsmic neutrinos at the south pole (en línia)
<<http://physicsworld.com/cws/article/news/2013/nov/21/icecube-finds-cosmic-neutrinos-at-the-south-pole>>(consulta 1/3/2015)

T2K, (en línia)

<<http://t2k-experiment.org/>>(consulta 1/3/2015)



Jhon Vo Medina, Neutrins Final Talk (en línia)

<file:///C:/Users/HP630/Downloads/Neutrins_Final_Talk_4.pdf>(consulta 13/4/2015)

UCI, neutrino (en línia)

<<http://www.ps.uci.edu/~superk/neutrino.html>>(consulta 13/4/2015)

Ice Cube, neutrinos (en línia)

<<https://icecube.wisc.edu/outreach/neutrinos>>(consulta 20/4/2015)

Hyperphysics, neutrino (en línia)

<<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/particles/neutrino.html>>(consulta 20/4/2015)

Wikipedia, astronomia de neutrinos (en línia)

<[http://es.wikipedia.org/wiki/Astronom%C3%ADa_de_neutrinos#Dise.C3.B1o_d el_detector](http://es.wikipedia.org/wiki/Astronom%C3%ADa_de_neutrinos#Dise.C3.B1o_del_detector)>(consulta 20/4/2015)

El Tamiz, ek detector de neutrinos super-kamiokande (en línia)

<<http://eltamiz.com/2007/07/05/el-detector-de-neutrinos-super-kamiokande/>>(consulta 30/4/2015)

The free dictionary, muon neutrino (en línia)

<<http://www.thefreedictionary.com/muon+neutrino>>(consulta 7/5/2015)

Dictionary, muon-neutrino (en línia)

<<http://dictionary.reference.com/browse/muon-neutrino>>(consulta 7/5/2015)

Docsetools, articulos enciclopedicos (en línia)

<http://docsetools.com/articulos-enciclopedicos/article_81609.html>(consulta 7/5/2015)



Invisibles, neutrinos fernandez (en línia)

<http://invisibles.eu/sites/default/files/outreach_entries/documents/neutrinos-fernandez_0.pdf>(consulta 7/5/2015)

La hora cero, breve historia del modelo estandar (en línia)

<<http://lahoracero.org/breve-historia-del-modelo-estandar/>>(consulta 22/5/2015)

Fisica practica, fuerza gravitatòria (en línia)

<<http://www.fisicapractica.com/fuerza-gravitatoria.php>>(consulta 22/5/2015)

Desy, neutrino astronomy (en línia)

<https://astro.desy.de/neutrino_astronomy/previous_projects/baikal/index_eng.html>(consulta 4/6/2015)

Uam, neutrino (en línia)

<http://www.uam.es/personal_pas/txrf/neutrino/neutrino.html>(consulta 4/6/2015)

Docsetools, article 106215 (en línia)

<http://docsetools.com/articulos-utiles/article_106215.html>(consulta 4/6/2015)

Hyperphysics, nuclear (en línia)

<<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/nuclear/beta.html>>(consulta 4/6/2015)

La guia 2000, principio de exclusion de Pauli (en línia)

<<http://quimica.laguia2000.com/general/principio-de-exclusion-de-pauli>>(consulta 4/6/2015)



Chess , magnetic horns for neutrino experiments (en línia)

<<http://jclub.chess.cornell.edu/papers/Magnetic%20focusing%20Horns%20for%20neutrino%20experiments.pdf>>(consulta 4/6/2015)

Wikipedia, magnètic horn (en línia)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_horn>(consulta 20/6/2015)

Wikipedia, neutrino oscillation (en línia)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Neutrino_oscillation>(consulta 20/6/2015)

Hyperphysics, hadron (en línia)

<<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/particles/hadron.html>>(consulta 1/7/2015)

Wikipedia, quark abajo (en línia)

<https://es.wikipedia.org/wiki/Quark_abajo>(consulta 1/7/2015)

Wikipedia, pion (en línia)

<<https://en.wikipedia.org/wiki/Pion>>(consulta 1/7/2015)

Wikipedia, protón (en línia)

<<https://es.wikipedia.org/wiki/Prot%C3%B3n>>(consulta 14/8/2015)

Wikipedia, quark arriba (en línia)

<https://es.wikipedia.org/wiki/Quark_arriba>(consulta 14/8/2015)

Phys, oscillations (en línia)

<<http://nu.phys.laurentian.ca/~fleurot/oscillations/>>(consulta 14/8/2015)

Wikipedia, sección eficaz (en línia)

<https://es.wikipedia.org/wiki/Secci%C3%B3n_eficaz>(consulta 30/8/2015)



Wikipedia, paridad (en línia)

<[https://es.wikipedia.org/wiki/Paridad_\(f%C3%ADsica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Paridad_(f%C3%ADsica))> (consulta 30/8/2015)

Wikipedia, simetria CPT (en línia)

<https://es.wikipedia.org/wiki/Simetr%C3%ADa_CPT>(consulta 15/9/2015)

Astrojem, simetria (en línia)

<<http://astrojem.com/teorias/simetria.html>>(consulta 3/10/2015)

Wikipedia, radiacion de Cherenkov (en linia)

<https://es.wikipedia.org/wiki/Radiaci%C3%B3n_de_Cherenkov>(consulta 3/10/2015)

Web exhibits, cause of color (en línia)

<<http://www.webexhibits.org/causesofcolor/4BA.html>>(consulta 3/10/2015)

The spectrum of riemannium, askaryan radiation (en linia)

<<https://thespectrumofriemannium.wordpress.com/tag/askaryan-radiation/>>(consulta 3/10/2015)

11. Bibliografia

EISBERG, Robert; RESNICK, Robert. “*Física cuántica*”, Balderas, editorial Limusa, 1997

GASIOROWICZ, Stephen. “*Quantum Physics*”, Estats Units ,John Wiley & Sons,1996

HOOFT, Gerard't. “*Partículas elementales*”,Barcelona, editorial Planeta, 2013

FEYNMAN, Richard. *The Feynman Lectures on Physics*. EEUU; New York, Basic Books, 1965.

KRANE, Kenneth. *Introductory Nuclear Physics*. EEUU; New York, 1988.