NEUTRINOS E FISICA SUBTERRÁNEA*

M. CONCEPCIÓN GONZÁLEZ GARCÍA

Abstract

For years some underground experiments, particularly those related to neutrino physics, have been producing results unexplainable within the theoretical framework we had built so far known as: The Standard Model of Particle Physics. In order to try to solve these puzzles, during the past few decades a set of new and more sophisticated experiments have been set into action. One of them is the Underground Laboratory of Canfranc (LSC), located in the Pyrenees (Aragon, Spain). The results of these experiments may be considered the most significant in particle physics in the past few years and have delivered the most important evidence that the Standard Model needs to be extended.

RESUMO

Durante anos experimentos baixo terra, en particular os relacionados coa física dos neutrinos, teñen producido resultados que non eramos quen de explicar de xeito consistente dentro do marco teórico do Modelo Estándar da Física de Partículas. Para tentar resolver ese misterio durante as últimas décadas un conxunto de novos e máis sofisticados experimentos teñen sido iniciados. Un deles é o LSC ubicado no pirineo aragonés. Os resultados destes experimentos poden ser considerados os máis significantes en física de partículas dos últimos anos, e teñen xerado evidencias de que o Modelo Estándar debe ser ampliado.

INTRODUCIÓN

No pirineo aragonés, baixo o monte "El Tobazo" transcorre o túnel da estrada de Somport que une España con Francia. Nun lateral do túnel hai unha saída pola que se accede ao Laboratorio Subterráneo de Canfranc (LSC). O LSC é un entre unha ducia de laboratorios subterráneos que existen en diferentes partes do planeta. En todos eles, grupos de físicos entérranse literalmente na procura de respostas a algunhas das preguntas que nos quedan en aberto no noso intento de entender o Universo na súa estrutura máis fundamental. Para iso son necesarias unhas condicións tan limpas de "ruído de fondo" que só son posibles en instalacións subterráneas.

* Traducido do castelán por Ramón Cid.

Durante anos algúns destes experimentos subterráneos, en particular aqueles relacionados coa física dos neutrinos, estiveron producindo resultados que non conseguiamos explicar de forma consistente dentro do marco teórico que tiñamos construído ata entón: o chamado Modelo Estándar de Partículas Elementais. Para intentar aclarar estes "puzzles", durante a última década entraron en funcionamento unha serie de experimentos novos e máis sofisticados. Os resultados destes experimentos poden considerarse os máis significativos da física de partículas nestes últimos anos e proporcionáronnos a evidencia máis importante de que o Modelo Estándar ten que ser ampliado.

A autora deste artigo é unha física teórica que tivo a sorte de ser testemuña próxima deste avance. Desde o punto de vista profesional foron uns anos intensos, de actividade frenética por veces, de noites en branco, pero sobre todo dunha immensa satisfacción. Porque para un investigador, nada se pode comparar a ter ante os seus ollos finalmente a resposta a unha dúbida que se resistiu duramente.

Con este artigo, gustaríame achegarvos un pouco a estes avances así como ás preguntas que nos deixaron abertas e á forma en que o LSC pode colaborar en atopar as súas respostas. Tentei evitar o tratamento matemático co fin de chegar a todo tipo de lector, teña coñecementos previos sobre esta a materia ou non. As poucas derivacións formais que se inclúen poden, chegado o caso, ser obviadas sen que iso, espero, impida continuar a lectura do artigo e extraer do mesma a información máis relevante.

Pero empecemos polo principio: de que vai todo isto da física de partículas?

QUE É A FÍSICA DE PARTÍCULAS?

A física de partículas tenta responder á pregunta "de que está feita a materia?" ao nivel máis elemental, ou, o que é o mesmo, na escala de tamaño menor á que somos quen de acceder.

A resposta que atopamos é que a materia está composta por minúsculos "anaquiños" aos que chamamos partículas elementais, rodeados dun amplo espazo entre eles. Ademais, fomos quen de clasificar os posibles anaquiños nun número relativamente pequeno de tipos diferentes que simplemente se repiten e repiten en cantidades astronómicas para formar todo aquilo que nos rodea.

En breve, ao nivel máis fundamental a materia que nos rodea está composta por tres tipos de partículas elementais. Dúas delas chamámolas "quarks": "quark up" e "quark down" que están confinados nos protóns e neutróns que constitúen o núcleo dos átomos, e unha terceira que chamamos electrón que orbita arredor dos mesmos.

Ademais destes dous quarks e o electrón, en experimentos en laboratorios, e no estudo dos raios cósmicos que bombardean continuamente a Terra desde o espazo exterior, atopamos dous pares máis de quarks – que chamamos os quarks "strange" e "charm", e os quarks "bottom" e "top"– e dous tipos máis de partículas parecidas ao electrón pero máis pesadas, que chamamos "muón" e "tau". Tamén hai outras partículas que chamamos neutrinos e das que falarei máis en detalle. Xenericamente ao electrón, ao muón, ao tau e aos seus correspondentes neutrinos chamámolos "leptóns". Na táboa I mostro a lista de quarks e leptones que descubrimos. O número é remarcablemente pequeno. Ademais, como se ve da táboa, as partículas veñen en tres "familias" (ou xeracións) que só se diferencian na masa. Por exemplo a única diferenza entre un "tau", un "muón", e un electrón é que "tau" é 10 veces mas pesado que o "muón" e este é 1000 veces máis pesado que o electrón. Non sabemos por que o número de partículas elementais é tan reducido. Tampouco sabemos porque veñen en tres e só tres copias.

	Leptóns		Quarks	
Familia	Nome	Símbolo	Nome	Símbolo
Primeira	neutrino electrónico	ν_e	up	u
Primeira	electrón	e^-	down	d
Segunda	neutrino muónico	ν_μ	charm	c
Segunda	muón	μ^-	strange	s
Terceira	neutrino tau	ν_τ	top	t
Terceira	tau	τ^-	bottom	b

Táboa I: Quarks e Leptóns do Modelo Estándar

O que si sabemos é que por cada partícula existe unha antipartícula, é dicir unha partícula coa súa mesma masa pero cos números cuánticos, en particular a carga eléctrica, de signo oposto. Así por exemplo, existe o "antielectrón" (que chamamos positrón), os antiquarks e os anti-neutrinos.

Tamén fomos quen de entender de forma cuantitativa como se comportan estas partículas e antipartículas: como interaccionan, como se producen, como se desintegran etc. Na actualidade temos un modelo que explica de forma satisfactoria case que todo o que observamos sobre estas partículas. Chamámolo o Modelo Estándar que é unha teoría que agrupa os principios básicos da física cuántica e a relatividade especial e que está baseada en principios de simetría polos cales as interaccións entre as partículas da táboa I débense á acción a distancia asociada co intercambio doutro tipo de partículas que chamamos "bosóns de gauge" e que tamén veñen en diferentes (e poucos) tipos: fotóns (γ), gluóns (g), $W^\pm$ e Zº. As partículas experimentan tres tipos de interaccións fundamentais, a interacción electromagnética (que se debe ao intercambio de fotóns), a interacción forte ou nuclear (debida ao intercambio de gluóns) e a interacción débil (que se entende polo intercambio de bosóns W e Z), que é a responsable dalgunhas das desintegracións nucleares.

O Modelo Estándar, a pesar do éxito que tivo explicando case que todo o que observamos do mundo das partículas elementais, está moi lonxe de ser o que os físicos de partículas chamamos a "teoría última?" que nos permitise explicar o Universo microscópico e macroscópico de forma autoconsistente e autodeterminado. É fermoso pero non chega a tanto. Para comezar, contén un gran número de parámetros que hai que extraer de experimentos, en particular as constantes de axuste e as masas das partículas, e cuxos valores non sabemos explicar desde primeiros principios. De feito nin sequera temos confirmado experimentalmente o mecanismo polo cal as partículas adquiren a súa masa.

Ademais o Modelo Estándar non fai ningunha referencia á Gravidade, e de feito carecemos dunha teoría consistente que sexa capaz de axuntar a Gravidade e a física de partículas. Tamén fracasa en explicar o Universo macroscópico no que vivimos. Por exemplo, sabemos que existe unha forma de materia que non está formada polas partículas que describín anteriormente e que constitúe aproximadamente o 25% do Universo exterior, a chamada Materia Escura. Temos evidencia, ademais doutra forma de enerxía, que chamamos na nosa ignorancia "enerxía escura" que non temos nin idea do que é, pero que ten que existir para explicar a forma en que o Universo parece expandirse e que na actualidade constitúe un 70% do mesmo, etc.

A única forma de avanzarmos na resposta a todas estas preguntas é a forma en que a ciencia o fixo sempre: mediante o desenvolvemento de novos experimentos. O que queremos é ter novos resultados que non podemos explicar co Modelo Estándar e que nos obriguen a amplialo e achegarmos máis á teoría última.

Neste camiño, como veremos, os neutrinos xogaron un papel fundamental durante a última década. De feito os neutrinos teñen unha historia tan fascinante por se mesmos que paga a pena pararse un pouco nela.

UN POCO DE HISTORIA DOS NEUTRINOS

Os neutrinos son unhas partículas que non teñen carga eléctrica e por tanto son "invisibles" electromagneticamente. Tampouco senten a interacción forte. Só se producen e detéctanse mediante a interacción débil, o cal, como o seu nome indica, leva a que os neutrinos poidan "vivir" ao noso arredor en gran número, pero moi raramente se fan evidentes e por iso o seu descubrimento foi relativamente tardío.

A entrada do neutrino no mundo da física ven da man do descubrimento da radioactividade. A comezos do século 20 descubríronse tres tipos de desintegracións nucleares radioactivas que se clasificaron segundo o tipo de partícula que era emitida polo núcleo: as desintegracións alfa en que se emitia un núcleo de Helio 4, as desintegracións gamma en que se emitía un fotón, e as desintegracións beta en que se emitia un electrón. Nestas últimas aparentemente ocorre:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + \text{electrón} \qquad (1)$$

Teoricamente, desta reacción agardábase que para un núcleo determinado a enerxía dos electróns emitidos na súa desintegración beta estivese fixada pola conservación da enerxía, sendo a diferenza entre a masa do núcleo pai (A, Z) e a do núcleo fillo (A, Z + 1). Sen embargo, en 1914 James Chadwick atopou que isto non era así, e que o electrón era emitido cuns valores de enerxía que podían variar desde o mínimo posible dado pola masa do electrón e un máximo dado precisamente pola diferencia de masa dos dous núcleos (ver Figura I).

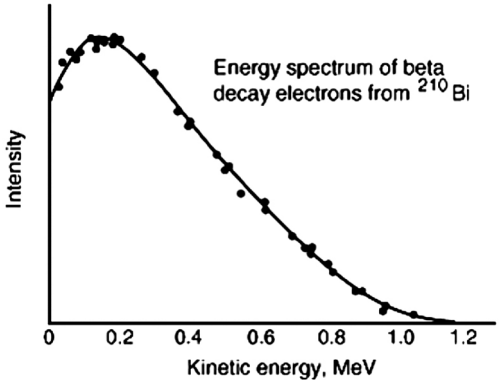

Figura 1: Espectro de enerxía dos electróns producidos nunha desintegración β nuclear.

Esta observación creou una auténtica crise na comunidade de físicos, dado que parecía levar a unha clara contradición co principio de conservación da enerxía como, entre outros, chegou a pensar Niels Bohr.

A solución do enigma non foi postulada ata 1930 cando Wolfgang Pauli nunha carta enviada aos participantes dunha conferencia que tivo lugar en Tubiengen (Alemania), e á que el non puido acudir. Presentou a posibilidade de que na desintegración beta, non só se emitise un electrón se

non tamén outra partícula, que debería ser neutra electricamente e moi lixeira y que portase a parte da enerxía que non levaba o electrón. É dicir que nunha desintegración beta realmente o que acontece é:

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + \text{electrón} + \text{antineutrino} \qquad (2)$$

Un par de anos mais tarde, Enrico Fermi bautizou a esta partícula como "neutrino" e ademais construíu o primeiro modelo teórico para explicar a desintegración beta nuclear que puxo os alicerces para o desenvolvemento da teoría das interaccións débiles.

Con este modelo teórico foi fácil estimar a probabilidade de interacción dun neutrino coa materia. Xa en 1934 Hans Bethe e Rudolf Peierls demostraron que a probabilidade de interacción dun neutrino era tan pequena, que un neutrino podería atravesar todo o planeta Terra sen "velo" (e por tanto sen que nós o podamos detectar).

Dada esa escasísima probabilidade de interacción, a única esperanza de detectalo neutrino é ter unha fonte moi intensa dos mesmos de forma que algún deles consiga facerse visible mediante, por exemplo, unha reacción beta inversa ($\bar{\nu}_e$ é o simbolo para un antineutrino electrónico)

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \qquad (3)$$

É dicir, unha fonte intensas de antineutrino permitiría que un deles interaccionase cun protón que se convertiría en neutrón xerándose ademais un positrón.

A fonte máis intensa de neutrinos "a man" chegou nos anos 40 co desaenvolvemento da enerxía nuclear. Foi Frederick Reines quen en 1951 propuxo a posibilidade de colocar un detector preto dunha das explosións nucleares de proba que levaban a cabo nos Alamos. A idea non callou. Así que houbo que esperar ata 1956, cando xunto con Clyde Cowan, decidiron usar unha fonte menos "dramática" de neutrinos (de feito de antineutrinos): algún dos primeiros reactores nucleares que se puxeron en funcionamento. O experimento definitivo levárono adiante na planta nuclear de Savahna River, en Carolina do Sur. Para iso usaron como detector 400 litros de auga con Cloruro de Cadmio. Cando un antineutrino interacciona cun protón da auga, produce unha reacción beta inversa que transforma o protón nun neutrón e emite un positrón. O positrón aniquílase cun electrón da auga e produce un par de fotóns. O neutrón vaise freando ata que é capturado polo núcleo de Cadmio que emite tamén un fotón. O tempo medio entre a emisión do primeiro par de fotóns e o segundo fotón é 15 microsegundos. Este sinal caracteristica permitiu identificar a interacción do antineutrino por primeira vez e valeulle o premio Nobel de Física de 1995 a Reines (Cowan morrera vinte anos antes). É interesante observar que, a día de hoxe, os detectores de neutrinos para experimentos en reactores son basicamente versións a maior escala do detector de Reynes e Cowan.

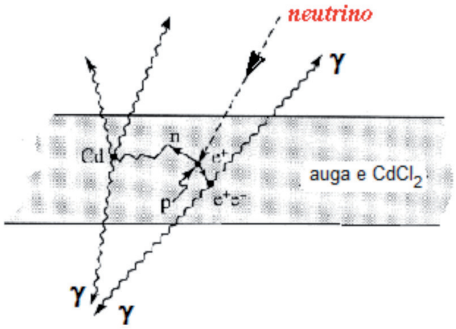

Figura 2: Esquema do experimento de Cowan e Reines.

Na linguaxe da física de partículas moderna, sabemos que o antineutrino detectado por Raines e Cowan é un antineutrino electrónico xa que se produce xunto cun electrón. Como dixemos antes, sabemos que existen dúas copias mais pesadas do electrón que son o muón e o tau. Dicimos que existen tres "sabores" de leptóns: o sabor electrónico, o sabor muónico e o sabor tau. A pregunta natural é se existen tamén tres sabores de neutrinos. A resposta é si. Iso si, a evidencia experimental da existencia do neutrino muónico e de que era de feito unha partícula diferente ao neutrino electrónico non chegou até 1962, e só foi posible grazas á creación do primeiro "feixe" de neutrinos no acelerador de Brookhaven (New York). Por construción, a maior parte dos neutrinos dun feixe de acelerador son producidos na desintegracion dun muón e por tanto si o sabor muónico é diferente do electrónico. Cando os devanditos neutrinos interaccionan deben producir un muón e non un electrón. Precisamente isto é o que M. Schwartz, Leon Lederman, Jack Steinberger e Jean-Marc Gaillard observaron. Para iso usaron como detector unha das primeiras cámaras de faíscas (spark chamber), unha das técnicas de detección que segue sendo utilizada na actualidade en detectores de neutrinos producidos en aceleradores. Esta detección do neutrino muónico valeulles o premio Nobel de Física en 1988 aos tres primeiros.

Por ultimo, a detección directa do neutrino do tau só foi posible no ano 2000 no experimento Donut en Fermilab (Illinois).

Resumindo, medio século foi preciso desde a introdución "teórica" do neutrino na física de partículas por parte de Pauli, ata a confirmación experimental da existencia do tres tipos de neutrinos (e os seus correspondentes antineutrinos) que forman parte do Modelo Estándar.

E todo iso, como dixen anteriormente, porque son difíciles de detectar, non porque non sexan abundantes no noso contorno. De feito vivimos rodeados de neutrinos. Para empezar, cando o Big Bang que deu lugar ao noso Universo tivo lugar, producíronse neutrinos dos cales algúns sobreviviron ata os nosos días. Son o equivalente en neutrinos do fondo de radiacion de microondas. Vivimos inmersos neste "océano" de neutrinos (uns 300 por centímetro cúbico) aínda que teñen unha enerxia baixísima e nunca foron detectados directamente.

Ademais destes neutrinos cosmológicos e xunto cos neutrinos que producimos nos reactores nucleares e nos aceleradores, a Terra emite unha cantidade considerable de neutrinos (chamados xeoneutrinos) debido á existencia de Potasio e Uranio na súa composición e que os xeran por desintegración. Tamén as estrelas emiten cantidades inxentes de neutrinos nas reaccións nucleares que as fan brillar. En particular o Sol é unha fonte intensa que nos fai chegar á Terra un fluxo de máis de 60 000 millóns de neutrinos electrónicos por segundo e centímetro cadrado.

Tamén se producen neutrinos nas partes altas da atmosfera cando os raios cósmicos (na súa maioria protóns) chocan coa atmosfera e producen chuvieiras de novas partículas entre as cales hai neutrinos (e antineutrinos) electrónicos e muónicos. Estes neutrinos atmosféricos teñen unha enerxía en media 100 000 veces maior que os neutrinos solares e atravésanos un por segundo e centímetro cadrado. A detección por primeira vez de neutrinos solares por Ray Davis en 1969 no experimento da mina de Homestake e de neutrinos atmosféricos polo experimento Kamiokande en Japon (cuxo lider era M. Koshiba) valeulles a ámbolos dous o premio Nobel de Física do 2002.

Por último, e só como unha curiosidade, un corpo humano emite (debido ao Potasio que contemos) unha media de 300 millóns de neutrinos ao día. De todos as fontes de neutrinos que comentei aquí, estes son os únicos que a día de hoxe non foron utilizados polos físicos de partículas.

OSCILAN ERGO PESAN

Como comentei anteriormente, desde a introdución do neutrino como partícula teorica para explicar o balance de enerxía na desintegración beta, estaba claro que os neutrinos, caso de teren masa, debían ser moi lixeiros, máis lixeiros que ningunha das outras partículas (salvo os fotóns) detectadas ata o momento.

As propiedades do neutrino, e en particular a cuestión da súa masa ten intrigado aos físicos de partículas desde que foi proposto. Desde o principio tentouse determinar, sen exito, a súa masa. Ao longo dos anos estes tests fóronse facendo máis e máis precisos ata alcanzar un límite superior sobre a masa do neutrino electrónico da orde dunha millonesima da masa do electrón. Todo iso levou a pensarmos se de feito os neutrinos, do mesmo xeito que os fotóns, tiñan realmente masa nula. E se era así cal era a razón.

Para poder medir masas aínda menores é posible usar o feito, inicialmente proposto por Bruno Pontecorvo, de que se os neutrinos teñen masa pode darse o fenómeno mecanocuántico de oscilacións de sabor que permite que un neutrino que se produciu cun sabor determinado (por exemplo un neutrino electrónico) teña un sabor diferente cando sexa detectado (por exemplo muónico). Isto é así porque os neutrinos de sabor definidos poden non ter unha masa definida senón ser unha combinacion lineal dos estados de masa. E iso leva a un fenómeno de intereferencia mecanocuántica que é o que coñecemos co nome de "oscilacións de neutrinos".

Por exemplo, supoñamos que temos dous sabores de neutrinos, electrónico e muónico, e dous estados: ν_1 con masa m_1 e ν_2 con masa m_2, que están relacionados mediante o chamado ángulo de mestura:

$$\begin{aligned} |\nu_e\rangle &= \cos\theta|\nu_1\rangle + \sin\theta|\nu_2\rangle \\ |\nu_\mu\rangle &= -\sin\theta|\nu_1\rangle + \cos\theta|\nu_2\rangle \end{aligned} \qquad (4)$$

Supoñamos que a t=0 o estado inicial era $|\nu_e\rangle$. Máis tarde (a un tempo t e a unha distancia L~c·t, sendo c a velocidade da luz) o estado terá evolucionado segundo as normas da mecánica cuántica que nos dí que cada estado de enerxía definida adquire unha fase proporcional a esta. Como durante a propagación é a masa a que determina a enerxía dos neutrinos, a fase que adquiren as compoñentes $|\nu_1\rangle$ e $|\nu_2\rangle$ non é a mesma. Entón,

$$|\nu(t)\rangle = Exp(-i\frac{E_1 t}{\hbar})\cos\theta|\nu_1\rangle + Exp(-i\frac{E_2 t}{\hbar})\sin\theta|\nu_2\rangle \qquad (5)$$

con $E_i = \sqrt{m_i^2c^4 + p^2c^2}$

Como consecuencia, este neutrino, orixinalmente $|\nu_e\rangle$ pode ser detectado a unha distancia L como $|\nu_e\rangle$ ou $|\nu_\mu\rangle$ cunha probabilidade:

$$\begin{aligned} P_{osc} = P_{e\mu} = 1 - P_{ee} &= |\langle\nu(t)|\nu_\mu\rangle|^2 = \sin^2(2\theta)\sin^2\frac{(E_2-E_1)t}{2\hbar} \\ &\simeq \sin^2(2\theta)\sin^2\left(1.27\frac{((m_2^2-m_1^2)/\mathrm{eV}^2)(L/\mathrm{m})}{(E/\mathrm{MeV})}\right) \end{aligned} \qquad (6)$$

No último paso tense asumido que os neutrinos teñen unha masa moito menor que o seu momento (E ~ p), e temos introducido algunhas unidades características (1 MeV = 10^6 eV = 1.60217646 × 10^{-13} Joules).

Resumindo, dependendo da distancia á que detectemos o neutrino e da súa enerxía temos unha probabilidade maior ou menor de detectalo co seu sabor orixinal ou con outro diferente. Como se ve na Figura 3 a probabilidade de detectalo cun sabor ou con outro "oscila" como función da distancia desde a fonte ao detector. A lonxitude de onda desta oscilación dános unha medida da diferenza de masas dos dous estados e a amplitude da oscilación dános unha medida do angulo de mestura.

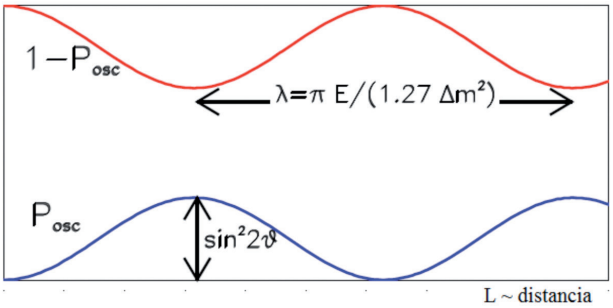

Figura 3: Probabilidade de oscilación nun sistema de dous neutrinos como función da distancia desde o punto de producción do neutrino ao punto de detección.

Grazas a este fenómeno puidemos explicar algúns resultados experimentais que durante décadas nos tiñan confundidos como paso a describir brevemente.

Desde a primeira detección de neutrinos solares por Ray Davis observouse un déficit no número de neutrinos electrónicos detectados en comparación co que predicían os cálculos teóricos do modelo solar realizados por John Bahcall. Tras corenta anos de continuas melloras nos cálculos teóricos e de novos experimentos máis e máis precisos que medían os neutrinos solares con diferentes tipos de detectores o déficit continuaba a existir. Este chamado "problema dos neutrinos solares" suxeriu desde o principio que poderíanse estar observando o fenómeno de oscilacións (neste caso ampliadas polo efecto da materia solar) polo cal non todos os neutrinos que chegaban á Terra desde o Sol tiñan o sabor electrónico co que foron producidos. Por suposto, non faltaban escépticos que dudadaban da fiabilidade dos cálculos teóricos.

Para clarificar este problema construíuse en Canada, no laboratorio subterráneo de Sudbury (de feito nunha mina aínda activa a máis de 2000 metros de profundidade), o experimento SNO, que era quen de detectar os neutrinos provenientes do Sol, independentemente do sabor que tivesen (ver Figura 4). En xuño de 2001 este experimento produciu os seus primeiros resultados e máis definitivamente en abril de 2002 puido dar unha medida do fluxo de neutrinos solares independentemente do seu sabor que coincidía co que os cálculos teoricos predecian. En resumo, os neutrinos solares prodúcense cun sabor electrónico pero para cando chegan á Terra (en realidade cando salen do Sol) xa só unha proporción deles (o 30% no rango de enerxia en que se observaban en SNO) ten sabor electrónico mentres que o outro 70% oscilou e detéctase con sabor muónico (ou tau). Para poder explicar este fenómeno é preciso que polo menos un neutrino teña masa e que esta sexa maior que unha cenmillonésima da masa do electrón e ademais que haxa un ángulo de mestura de arredor de 30 graos.

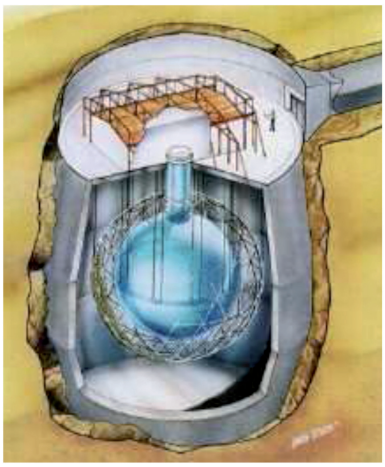

Figura 4: Reproducción artistica do detector SNO.
Nótese o seu tamaño comparado coa escala humana.

Pouco despois do comezo da detección dos neutrinos solares, iniciáronse unha serie de experimentos que podian detectar tamén neutrinos atmosféricos, en particular o experimento Kamiokande na mina do mesmo nome no Xapón. Desde o seu comezo estes experimentos observaban un déficit de neutrinos muónicos atmosféricos comparados cos calculos teóricos correspondentes. Coa posta en funcionamento do experimento SuperKamiokande (ver Figura 5) foi posible estudar como o déficit dependía da direccion de chegada do neutrino e da súa enerxía. Dependendo da dirección de chegada a distancia entre o punto de produción do neutrino na atmosfera e o detector varía de 10 km aproximadamente (se o neutrino se produece na vertical sobre o detector e chega por arriba) a 10000 km aproximadamente (se se produce alén da Terra e chega ao detector por abaixo). O que se observou foi que o déficit aumentaba coa distancia e decrecía coa enerxía, precisamente como se espera do fenomeno de oscilacións o cal se anunciou "oficialmente" por primeira vez en 1998.

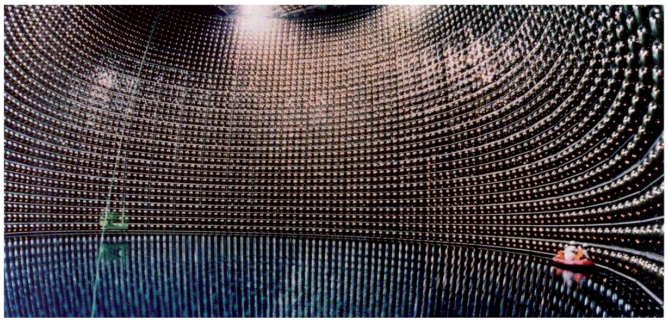

Figura 5: Fotografía do detector SuperKamiokande cando aínda non estaba totalmente cheo.
Nótese a lancha con dous físicos comprobando o estado dos fotomultiplicadores.

Durante a década ultima estas evidencias de oscilacións dos neutrinos solares e atmosféricos víronse corroboradas con experimentos subterráneos realizados con neutrinos procendentes de reactores (como KamLAND no Xapón) e de aceleradores, como o experiemento MINOS, que detecta o feixe de neutrinos do laboratorio Fermilab a unha distacia de 800 km na mina de Soudan en Minnesota. Ambolos dous teñen confirmado con gran precisión que os neutrinos oscilan en sabor e que o fan como se espera do fenómeno asociado coa presenza da súa masa.

Para explicar de forma global todos os resultados fai falta que polo menos dous neutrinos, dos tres do Modelo Estándar , sexan masivos e que un deles teña polo menos unha masa unha dezmillonésima da masa do electrón e outro alomenos unha cenmillonésima. Ademais polo menos dous do tres ángulos de mestura teñen que ser grandes: un da orde de 30 graos e outro da orde de 45 graos. O terceiro pode ser ou non nulo.

Non sabemos por que os neutrinos son tanto máis lixeiros que os seus correspondentes acompañantes cargados (electrón, muón e tau). Pero sabemos que isto implica que temos que ampliar o Modelo Estándar. Os físicos tentamos construír estas ampliacións que nos permiten acomodar de forma natural este feito. Na máis aceptada delas, a chamada teoría do "balancín" (see-saw en inglés), a tan pequena masa do neutrino débese a que resulta ser inversamente proporcional á masa dunhas novas partículas presentes na teoría. Canto máis pesadas sexan esas novas partículas menos pesan os neutrinos (de aí o do balancín). Para que os neutrinos sexan tan tan lixeiros como determinamos estas novas partículas deben ter masas da orde de máis de 10^{10} veces a masa do protón.

Pero o que é máis interesante, como os neutrinos teñen masa podémonos propor unha pregunta que ten unha profundo significado físico: pode ser que un neutrino e un antineutrino sexan de feito a mesma partícula? Posta asi, pode parecer unha pregunta retórica. Nada máis equivocado. En realidade, como tentarei explicar, se a resposta é positiva, pode axudarnos a entender como un Universo onde nós existimos é posible.

OS NEUTRINOS E A ASIMETRÍA MATERIA-ANTIMATERIA

Como dixemos, por cada partícula existe a súa antipartícula que é unha partícula coa mesma masa pero con todos os numeros cuanticos con signo contrario, en particular a súa carga eléctrica. Cando unha partícula con carga eléctrica choca coa súa antipartícula, ambas se aniquilan e máis cedo que tarde dan lugar a un par de fotóns.

Na teoría do Big Bang, o Universo xurdíu a partir dunha singularidade esencial (que é o que se chama o Big Bang), e moi desde o principio estivo composto por un plasma denso que contiña tanto partículas como antipartículas. As partículas e os seus correspondentes antipartículas ou ben se ían desintegrando a partículas e antiparticulas máis lixeiras, ou se aniquilaban para dar lugar a pares de fotóns. Dous fotóns tambien podían aniquilarse (un fotón é a súa propia antipartícula) e dar lugar a pares de partícula-antipartícula. Segundo o Universo se foi expandindo este plasma foise facendo menos denso e todos estes procesos fóronse facendo menos frequentes (mais que nada porque cada vez era máis díficil atopar preto un veciño co que aniquilarse). Así pois o Universo foise arrefriando e arrefriando ata que quedou case baleiro cunhas poucas partículas e antipartículas danzando por aí suficientemente lonxe unhas doutras como para sobrevivir mutuamente. Neste Universo non se terían formado galaxias, nin estrelas, nin por suposto nós.

O Universo que observamos é moi diferente. É un Universo formado por materia (excepcion feita da materia escura e da energia escura), é dicir, estruturas complexas formadas a partir de partículas. Practicamente non existe antimateria (agás a que se forma momentaneamente polos

choques de partículas). É neste Universo onde se puideron formar galaxias, sistemas solares con planetas e a vida como a coñecemos. A pregunta do millón é, como chegamos a este Universo desde unha sopa quente formada tras o Big Bang en que tanto partículas como antipartículas existían na mesma cantidade? Que é o que, ao longo da evolución do Universo levou a que as antipartículas desaparecesen máis que as partículas? A que é debido esta asimetría materia-antimateria grazas á cal existimos?

Foi Andrei Sakharov quen primeiro determinou as condicións que deben cumprirse para que unha teoría do Universo microscópico (ie unha teoría das interaccións das partículas elementais) incorpore a posibilidade de xerar este Universo macroscopico asimétrico a partir dunhas cantidades iniciais iguais de partículas e antipartículas. A primeira condición é que haxa un número cuántico que distinga partículas de antipartículas que non se conserve nalgunha reacción. A segunda é que fai falta que a teoría permita que algunhas reaccións con partículas e as súas correspondentes reaccións con antipartículas non sexan igual de rápidas. A terceira é que o sistema estea fóra de equilibrio termodinámico. O Modelo Estándar tal e como o introducimos non cumpre estes requisitos. Podería cumprilos, pero de feito, non chega.

Agora imaxinemos que os neutrinos son a súa propia antipartícula. Poden selo porque son electricamente neutros, así que de entrada non temos un signo de carga que nos permita distinguir un neutrino dun antineutrino. Iso quere dicir que existe un número cuántico que debese distinguir partículas de antipartículas (o que seria 1 para un neutrino e -1 para un antineutrino; de feito é 1 para os leptóns e -1 para os antileptóns) que non esta ben definido, e é posible ter reaccións nas que non se conserva. Xa temos a condicion primeira. Imaxinemos que existen ademais eses estados pesados que dixen antes que nos hacian falta para explicar a tan pequena masa do neutrino. Eles tamén formaban parte da sopa inicial, pero como eran moi pesados se desintegraron moi ao principio. Si cando se desintegraban o facían un pouco máis frecuentemente (unha vez cada 1000 millóns aproximadamente) en partículas que en antipartículas (teoricamente isto é moi facil de implementar), xa temos a condición segunda. Imaxinemos que o seu tempo de vida medio era maior que o tempo de vida medio de expansión do Universo na época en que se desintegraron. Ahi vai a condicion terceira. O demais é cuantificar e ver si funciona. E de feito funciona. É o que chamamos leptoxénese: xeración da asimetría materia-antimateria via a produción duns poucos máis de leptóns que antileptóns no Universo primitivo.

Por suposto todo isto pode parecer moi especulativo. E o é. Esa é unha dos labores dos físicos teóricos, idear modelos, teorías que permiten explicar os fenómenos que observamos. Tamén nos corresponde aos físicos idear tests das nosas ideas e polos en funcionamento.

Así que empecemos polo primeiro que podemos verificar desta conxectura: si os neutrinos son ou non son a súa propia antipartícula. Para iso temos que buscar un sinal experimental inequívoca de que ese numero cuántico que distingue un leptón dun antileptón non se conserva.

Para iso consideremos unha desintegración nuclear chamada dobre beta, na que dous neutróns do núcleo pai (A,Z) se transforman en sendos protóns máis dous electróns e dous antineutrinos:

$$(A,Z) \rightarrow (A,Z+2) + e^- + \bar{\nu}_e + e^- + \bar{\nu}_e \qquad (7)$$

Xa que logo nesta desintegracíón o estado final contén dous electróns (dous leptóns) e dous antineutrinos (dous antileptóns). Así que o número de leptóns é cero no estado inicial e 0 tamén no estado final (2 - 2 = 0). En resume, o número leptónico consérvase.

Pero si ν_e e $\bar{\nu}_e$ son o mesmo estado (partícula igual a antipartícula), é posible que esta reacción se produza mediante unha desintegración beta simple dun dos dous neutróns do núcleo pai, pero na que o "antineutrino" producido se comporte como un neutrino e polo tanto poida ser

reabsorbido por un segundo neutrón para dar una segunda desintegracion beta e que non quede ningun neutrino algún no estado final (ver Figura V).

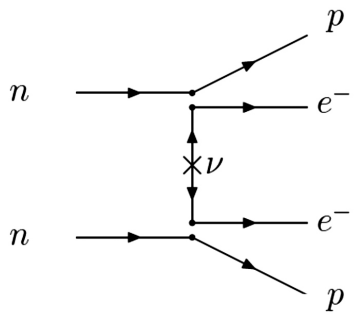

Figura 6: Esquema da desintegración dobre beta sen neutrinos, sinal inequivoco de que os neutrinos son a súas propias antipartículas. O nº cuántico asociado ao número de leptóns, L, non se conserva: non existen leptóns no estado inicial (L=0) e hai 2 e^- e ningún antileptón no estado final (L=2).

Se observásemos esta desintegración dobre beta sen neutrinos teríamos a proba fidedigna de que os neutrinos son a súa propia antipartícula e dariamos o primeiro paso na posible explicación da asimetría materia-antimateria.

O problema é que cando facemos a estimación teórica de como de frequente é esta reacción obtemos unha probabilidade moi pequena. De feito a probabilidade é proporcional á masa dos neutrinos así que como esta é tan pequena, observar esta reacción é extremadamente difícil.

De feito a dia de hoxe non se ten observado aínda, pero non sabemos se isto se debe a que non é posible (é dicir porque os neutrinos non son a súa propia antipartícula), ou porque os experimentos que a buscaron ata o de agora non eran o suficientemente precisos. Atopar a resposta a esta cuestión importa tanto aos físicos de partículas que existen nestes momentos unha media ducia de novos experimentos en construción no mundo buscando detectar esta reaccion con diversos tipos de núcleos e de detectores. Todo eles en laboratorios subterráneos, e entre eles o laboratorio subterráneo de Canfranc. Na próxima, e derradeira sección, falaremos un pouco destes laboratorios, do seu onde e o seu por que.

Pero acabo esta sección cunha nota anecdótica. Os físicos de partículas falamos de neutrinos de Majorana se resultan ser as súas propias antipartículas (e de neutrinos de Dirac se non o son). Ettore Majorana era un físico de partículas italiano que foi o primeiro en propoñer a posibilidade de describir formalmente estados de partículas que son as súas propias antipartículas xa nos anos 30. Era un xenio e ao parecer unha persoa complexa. Fixo a tese en Roma baixo a dirección de Enrico Fermi e tras iso conseguiu unha bolsa postdoutoral para ir a Leipzig a traballar con Heisenberg. Alí viviu os comezos da Alemaña nazi e pronto regresou a Italia onde se estableceu, aínda que se volveu máis e máis solitario. O último que se soubo del foi que nun día de 1938 tomou un barco desde Palermo cara a Nápoles onde nunca chegou nunha travesía sen paradas intermedias. Non se atopou o seu corpo. Isto deu lugar a todo tipo de especulacións, desde a máis aceptada de que se suicidou tirandose pola borda e o seu corpo perdeuse no mar, a que escapou, ben a un mosteiro ou ben a Sudamérica, por razóns persoais ou para fuxir do ser involucrado no desenvolvmento da bomba nuclear.

LABORATORIOS SUBTERRÁNEOS: CANFRANC

A historia dos neutrinos e os avances aos que nos levou vai ligada ao desenvolvmento do que chamamos física de partículas experimental subterránea. Case que todos os experimentos dos que falei sobre a detección de neutrinos, a detección de oscilacións, a procura de desintegración dobre beta sen neutrinos, etc., todos teñen lugar en laboratorios subterráneos.

A razón é que os sinais que estamos a buscar son pouco frecuentes e non queremos confundilas con algo que non son. Como dixemos antes, a Terra está a ser bombardeada constantemente por raios cósmicos. Estes chocan coa atmosfera e producen unha chuvieira de partículas que "chove" sobre nós a cotío. Parte da chuvieira se absorbe na atmosfera mesmo, pero parte (a máis penetrante formada principalmente por muóns e neutrinos) chega ata a superficie terrestre. De feito o muón, por exemplo, foi descuberto por primeira vez así, e existe un amplo campo de estudo de física de raios cósmicos que tenta detectar e caracterizar estas chuvieiras como forma de determinar de que parte do Universo proceden estes raios cósmicos.

Pero á súa vez, todas estas partículas producidas na atmosfera estórbannos cando queremos estudar procesos que son "raros", xa que cando pasan polo detector poden producir sinais que se parecen bastante ás que buscamos. É o que se chama ruído de fondo. Todo experimento de partículas ten que lidar con ruídos de fondo de orixe diversa, e parte do traballo consiste en deseñar técnicas para diferenciar o sinal verdadeiro deses ruídos. A forma máis eficiente de librarse do ruído debido aos raios cósmicos é usar a Terra como pantalla que os absorba. Canta máis terra mellor, e de aí a creación de laboratorios subterráneos.

Existen no mundo unha decena de laboratorios subterráneos. Dependendo da súa profundidade son máis aptos para un tipo ou outro de experimentos. Na Figura VII móstrase a intensidade de muóns orixinados polos raios cósmicos na atmosfera como función da profundidade á que se atopa o laboratorio. A profundidade adóitase medir nos metros de auga que nos darían a mesma cantidade de materia que a rocha sobre o laboratorio (isto faise así porque non todas as rochas son igualmente densas). Neste gráfico aparecen unha boa cantidade dos laboratorios que fun mencionando nesta historia, e en particular o laboratorio subterráneo de Canfranc.

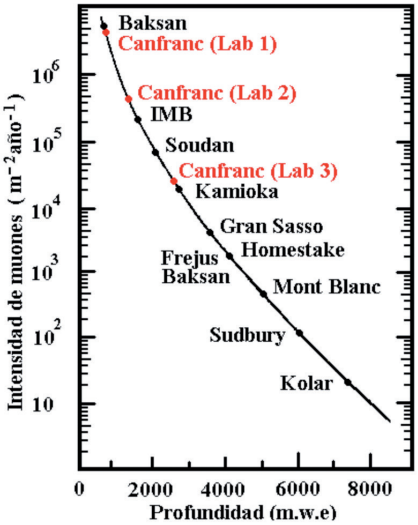

Figura 7: Intensidade do ruído de fondo de muóns como función da profundidade.

Este laboratorio xurdiu do esforzo pioneiro do Grupo de Investigación de Física Nuclear e de Astropartículas da Universidade de Zaragoza, que en 1985, baixo a direccion do falecido profesor Angel Morais, estableceu o primeiro LSC. O laboratorio orixinal (Lab 1 e 2 na figura) consistía nunha galería principal de arredor de 120 m^2 e outras dúas galerías duns 18 m^2 que eran accesibles ao través do antigo túnel de tren abandonado.

A construción do novo túnel para estrada en Canfranc, e o apoio dos gobernos nacional e rexional permitiu a construción do novo LSC (Lab3, ver tamén Fig.VII) que consta dunha sala principal de 40x15x10,5 metros e dun novo laboratorio de ruído de fondo ultra baixo cunhas medidas de 15x10x7,5 metros. Estas galerias están escavadas na roca a 850 metros de profundidade (2500 metros equivalentes de auga).

A construción deste novo laboratorio vai impulsar aínda máis a física subterránea en España cara o ámbito internacional. A existencia desta infraestrutura permitiu a formación de novas colaboracións experimentais que están a construír novos experimentos que se emprazarán no LSC. Estes experimentos contan cunha importante presenza de grupos de físicos españois así como de grupos de diversos paises dentro de Europa e de Estados Unidos.

O programa científico do laboratorio está centrado principalmente en dous tipos de procuras: a detección da desintegracion dobre beta sen neutrinos, e a detección directa da materia escura. Hoxe tenteivos contar un pouco sobre a primeira que é a que ten unha maior tradición neste laboratorio e coa que estou máis involucrada. Da fascinante Materia Escura falaremos outro día.

Figura 8: Sala principal do novo Laboratorio Subetrráneo de Canfranc.

PARA MÁIS INFORMACIÓN

1 "Neutrino Astrophysics", J.N. Bahcall, Cambridge University Press, 1989.

2 "Neutrino Unbound", C. Giunti http://www.nu.to.infn.it/

3 "Spaceship Neutrino", C. Sutton, Cambridge University Press, 1992.

M. Concepción González García é Profesora de Investigacion ICREA (Institució Catalana de Recerca i Estudis Avançats) na Universidade de Barcelona, Profesora no C. N. Yang Institute for Theoretical Physics, State University of New York at Stony Brook, New York e Profesora de Investigacion del CSIC en excedencia. Ten escrito máis de 100 artigos de investigacion en fenomenoloxia de fisica de particulas e tivo diversas posicións na Universidade de Wisconsin, no grupo de teoria do laboratorio CERN en Xenebra e na Universidade de Sao Paulo.