



NEUTRINOS

FRANCISCO J. YNDURÁIN

Este año el premio Nobel de física ha recaído en el italo-americano Riccardo Giacconi, el americano Raymond Davis jr. y el japonés Masatoshi Koshiba; los tres por trabajos relacionados con astronomía exótica. Riccardo Giacconi, de quien no hablaré en este artículo, por astronomía de rayos-X; Davis y Koshiba por detección de neutrinos extraterrestres. Con tal vez una salvedad (que discutiré más adelante) la Academia sueca, sin duda, ha acertado en el premio.

Este premio es al menos el cuarto asociado con física de neutrinos que concede la Academia en los últimos 15 años; lo que puede parecer algo excesivo, aunque yo no creo que sea así, porque el neutrino es algo especial. Los neutrinos (de los que conocemos tres variedades diferentes: neutrino electrónico, neutrino muónico y neutrino tauónico) son las únicas partículas que sólo existen en un estado de quiralidad, *levo* (los neutrinos *dextro*, si existen, sólo interactuarían con el campo de Higgs y la gravitación): los neutrinos, cuando avanzan, *siempre* giran en el sentido contrario al que lo haría un tornillo ordinario. Son, con gran diferencia, las partículas que tienen masa más pequeña (unas diez millones de veces menos que le electrón) y, además, las únicas que tienen un solo tipo de interacción, la débil¹. Debido a esta última propiedad los neutrinos han planteado difíciles retos experimentales en lo que respecta a su detección e identificación, obligando a los físicos a la realización de impresionantes *tours de force*.

Por ejemplo, sólo en los últimos tres o cuatro años hemos podido obtener evidencia (aún incompleta) de que los neutrinos pueden tener masa. Y ello con ayuda de neutrinos provenientes de fuera de la tierra, como los detectados en los experimentos liderados por Davis y Koshiba; todavía no hemos podido verificar esta propiedad con neutrinos producidos en el laboratorio, aunque alguno de los varios experimentos planeados muy probablemente podrán estudiar esta importante cuestión.

Pero también, precisamente por su escasa interacción, los neutrinos han servido, y sin duda servirán en el futuro, para realizar estudios que, con otras partículas, hubieran sido imposibles. Por citar ejemplos cosmológicos, los neutrinos proporcionan información del centro del sol, o del corazón de la explosión de una supernova.

1. Neutrinos en desintegraciones radiactivas

Como acabamos de comentar, los neutrinos son elusivos; únicamente participan en las interacciones débiles, por lo que durante bastante tiempo sólo hubo evidencia indirecta de su existencia. Esta primera evidencia vino a través de la desintegración beta, por la que algunas sustancias emitían misteriosos rayos

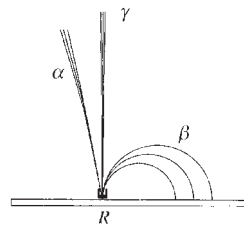


Figura 1. Efecto del campo magnético sobre las radiaciones α y β , lo que permite identificar sus constituyentes y medir sus energías. (Según dibujo de Chadwick, 1921)

conocidos como alfa (α), beta (β) y gamma (γ). Para estudiar su naturaleza se colocaron campos magnéticos de intensidad variable, lo que mostró que los rayos beta se desviaban mucho, los alfa poco y los gamma nada. Esto permitió identificar los β como electrones, los α como núcleos de helio y los γ como fotones de gran energía (ver figura).

Pero del estudio de esta reacción se seguía una propiedad desconcertante: la energía del estado inicial era superior a la de los productos de la desintegración. Esta paradoja era un desastre; aparentemente, ponía en cuestión la ley de conservación de la energía, uno de los pilares

sobre los que se asienta todo el edificio de la física. Durante un cierto tiempo pareció incluso que hubiese que abandonar esta ley; pero en 1930, en una famosa carta que Wolfgang Pauli dirigió el 4 de diciembre al congreso de radiactividad celebrado en Tubinga, éste dio cuenta de que el principio de conservación de la energía (y otros problemas relacionados con la estadística) podía salvarse si se suponía que, junto con el electrón, el producto de la desintegración contenía una partícula de masa muy pequeña o nula, eléctricamente neutra y que sólo interactuase débilmente. Dos años después Fermi aplicó las ideas de la relatividad cuántica para afirmar, correctamente, que tanto el neutrino como el electrón se *crean* en el acto de la desintegración beta, utilizando la energía debida a la diferencia de masas entre el neutrón y el protón, según el esquema

$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu},$$

(a nivel más fundamental, podríamos reexpresar esto en términos de quarks, $d \rightarrow u + e + \bar{\nu}$).

También fue Fermi² quien dio a esta nueva partícula el nombre de *neutrino* con el que se la conoce en la actualidad, en el mismo artículo en el que propuso su famosa teoría de las interacciones débiles.

Pero la detección *experimental* de neutrinos no fue sencilla, aunque con el tiempo ha sido factible realizarla cada vez con mayor facilidad. Primero en unos difíciles experimentos llevados a cabo en 1956 por Reines y Cowan (que utilizaron el enorme flujo de neutrinos producidos por un reactor nuclear, como subproducto de la fisión), y luego de manera casi rutinaria, los neutrinos no sólo se detectan, sino que hemos llegado a poderlos utilizar como proyectiles para con ellos (aprovechando precisamente la debilidad de su interacción) penetrar en el interior de otras partículas. La detección directa del primer neutrino fue anunciada por Reines en un simposium en el CERN en 1956, aunque el Comité Nobel sólo le otorgó el premio en 1995.

¹ Por supuesto, los neutrinos tienen también interacción gravitatoria que, en este artículo, no tendremos en cuenta.

² E. Fermi, "Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi beta", *Ricerca Scientifica*, 4, 491 (1933). Para la pequeña historia, mencionamos que el artículo de Fermi fue rechazado por la conocida revista *Nature*, que en la ocasión no dio muestra de gran perspicacia.

La intensidad de las interacciones débiles es proporcional al cuadrado de la energía, para energías pequeñas comparadas con las de las partículas intermedias, las W y Z . Por lo tanto, la probabilidad de que neutrinos de poca energía interactúen, y por tanto de observarlos, es muy pequeña. Por ejemplo, los neutrinos producidos en las desintegraciones beta, con energías de unos pocos MeV (frente a los casi cien GeV que corresponden a las masas de las partículas W y Z) apenas interactúan con todo el planeta tierra. De manera que ha sido necesario o utilizar fuentes muy prolíficas en neutrinos acopladas con detectores gigantescos, y armarse de paciencia (para neutrinos poco energéticos), o producir neutrinos de al menos unos GeV para que sus interacciones sean observables con suficiente detalle.

2. El “puzzle” de los dos neutrinos. Un tercer neutrino

Una buena parte de los descubrimientos en física comienzan por una paradoja que aparece cuando el progreso tecnológico permite explorar, con mayor detalle y precisión de lo hasta entonces posible, un fenómeno tal vez conocido imperfectamente con anterioridad. Así fue el descubrimiento de la existencia de *dos* tipos de neutrino, denotados por los símbolos ν_e y ν_μ , y conocidos con los nombres de “neutrino electrónico” y “neutrino muónico” por acompañar siempre el primero al electrón y el segundo al muón. Aparte de esto, y muy probablemente de una pequeña diferencia de masas (en todo caso minúsculas) que discutiremos más adelante, ν_e y ν_μ parecen tener propiedades idénticas.

La paradoja que llevó al descubrimiento de que hay dos tipos de neutrinos apareció al estudiar los *muones*. Estas partículas fueron descubiertas en rayos cósmicos, en 1937. Los muones, sin embargo, no proceden del espacio exterior (rayos cósmicos *primarios*), sino que se producen en las interacciones de los rayos cósmicos primarios con la atmósfera (rayos cósmicos *secundarios*). El mecanismo de producción de muones resulta ser el siguiente. Llega a la atmósfera terrestre un protón cósmico de gran energía, el cual choca con uno de los núcleos de los átomos del aire. En este choque (interacción fuerte) se producen piones, que no son estables; los tres tipos

de pión se desintegran. Así, los π^- se desintegran muy rápidamente produciendo muones (μ^-), los π^+ se desintegran en antimuones (μ^+) y los π^0 lo hacen en fotones. Finalmente, el muón y los antimuones también acaban por desintegrarse, emitiendo electrones y positrones. A este proceso se le conoce, por motivos obvios, como “cascada de desintegraciones”.

El problema de los rayos cósmicos es que son erráticos; y además hay pocos que son la energía suficiente como para que el muón producido en la cascada pueda ser identificado, y no digamos estudiado.

Pero en los años cincuenta se construyeron grandes aceleradores de protones, capaces de proporcionarles las energías necesarias para producir, al chocar con un blanco, cascadas como las de los rayos cósmicos. De esta manera se contó pronto con gran cantidad de muones y se pudo estudiar su desintegración:

$$\mu^- \rightarrow e^- + X.$$

De la naturaleza de X sólo se sabía que contenía dos partículas (esto por consideraciones cinemáticas) y que estas partículas interactuaban muy débilmente, ya que no dejaban trazas en ningún detector. No requirió un gran esfuerzo de imaginación el identificarlas con los mismos neutrinos que se producían en la desintegración beta. Podíamos pues reescribir el proceso de desintegración del muón como

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}, \quad (1)$$

por argumentos teóricos muy generales³ se sabía que uno de los neutrinos tenía que ser, realmente, un *anti*-neutrino, $\bar{\nu}$.

Y aquí aparece la paradoja. Si el proceso descrito en (1) es posible, entonces también puede ocurrir que neutrino y antineutrino se aniquilen en energía (fotones) y entonces, de cuando en cuando, deberíamos detectar la desintegración

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu} \rightarrow e^- + \gamma.$$

Este modo de desintegración no ha sido jamás visto; en la actualidad hay una cota sobre la probabilidad de que ocurra, que debe ser inferior a una billonésima.

Una posible explicación a esta paradoja, como se comprobó *a posteriori* la correcta, consiste en suponer que el neutrino y el antineutrino que se producen en la desintegración del muón son *distintos*. En efecto, una partícula y su antipartícula pueden aniquilarse en energía; pero

una partícula *no* se puede aniquilar con la antipartícula de otra. Introducimos pues dos neutrinos distintos a los que denotamos como ν_μ y ν_e y, tentativamente, reinterpretamos (1) como

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e. \quad (2)$$

Pero tal interpretación no es única. Una prueba incontrovertible de que es la correcta sólo se encontraría detectando el proceso inverso, es decir, lanzando (por ejemplo) neutrinos *muónicos* contra un blanco nuclear y comprobando que *sólo* producían muones. Esto se dice pronto; las dificultades prácticas de realizar tal experimento son enormes.

En los primeros años sesenta del siglo pasado, sólo en el CERN y en Brookhaven existían aceleradores con la energía suficiente para realizar el experimento; y en efecto, en 1961-1962 se estableció una fuerte competencia entre ambos laboratorios para completarlo. El grupo americano tenía ventaja en la utilización de detectores electrónicos (cámara de chispas) pero el europeo era superior porque contaba con un procedimiento para focalizar los neutrinos. Gracias a este las fuerzas estaban igualadas, aunque con ligera ventaja de los europeos. Pero el CERN perdió una batalla que tenía ganada al repartir el tiempo de utilización del acelerador entre el experimento del neutrino y otros proyectos. Esta pérdida de eficiencia fue la que permitió al equipo americano dirigido por L. Lederman, M. Schwartz y J. Steinberger llevarse la gloria y el correspondiente premio Nobel al establecer, de forma definitiva, que el neutrino que acompaña al electrón es distinto del que se produce con muones.

La importancia fundamental del trabajo de Lederman, Schwartz y Steinberger, sin embargo, sólo apareció (como tantas veces ocurre) al ir pasando los años, e irse comprobando de forma cada vez más clara la misteriosa estructura en familias de las partículas, para lo que el experimento del neutrino puso la primera piedra. De hecho, el Comité Nobel esperó hasta 1988 para conceder el premio a Lederman, Schwartz y Steinberger.

Entre 1975 y 1976 se comprobó, por el grupo de Perl (que recibió el premio Nobel por este motivo y por el descubrimiento de la partícula τ), y por los experimentos en DESY, que existe una tercera clase de neutrinos, los que acompañan a las partículas tau; aunque ahora el experimento fue mucho menos traumático. Tanto los métodos de detección como

³ La verificación experimental de que los neutrinos son diferentes de los antineutrinos se debe a R. Davis (que siempre estuvo interesado en física de neutrinos) y D. S. Harmer, *Bull. Amer. Phys. Soc.*, **4**, 217 (1959).

(sobre todo) la teoría habían progresado sustancialmente, y de hecho, la comunidad científica se convenció muy pronto de la realidad de este tercer tipo de neutrino. Sin embargo, la evidencia *directa*, es decir, la comprobación de que los neutrinos de tipo *tau* sólo producen partículas tau es muy reciente, y se debe al experimento conocido como “Donut beam dump”, en el Tevatrón de Fermilab, que consiguió evidencia experimental de este hecho en el año 2000.

A la vista de todo esto podemos preguntarnos si habrá más neutrinos aparte de los que hemos descubierto. La respuesta depende, por supuesto, de cómo definamos lo que es un neutrino. Si lo definimos como partícula de masa pequeña comparada con la de la partícula *Z*, es decir, como mucho de una o dos docenas de veces la del protón; y con propiedades similares a las de los neutrinos que conocemos, entonces la respuesta es *no*. Tanto por argumentos cosmológicos como por el estudio de las desintegraciones de la partícula *Z* sabemos que hay, exactamente, los tres neutrinos que ya hemos identificado. Pero es posible que haya neutrinos muy pesados, y también es muy probable que existan neutrinos de tipo *dextro*, prácticamente indetectables por no tener ni interacciones débiles.

3. Neutrinos extraterrestres

Hemos comentado antes que para poder detectar neutrinos es necesario que estos sean muy energéticos o contar con detectores masivos. Los modernos detectores de neutrinos son en efecto aparatos gigantescos, de muchas toneladas de peso, y son sensibles a los neutrinos

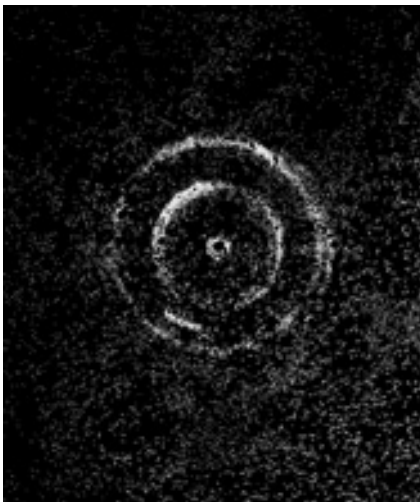


Figura 2. Los anillos de materia incandescente lanzados por la supernova de 1987, fotografiados por el telescopio Hubble.

generados en los procesos nucleares que se llevan a cabo en el sol, y que proporcionan su energía: e incluso, cuando en 1987 se produjo la explosión de una supernova en una de las nubes de Magallanes (galaxias situadas en la vecindad de nuestra Vía Láctea, pero aun así a ciento setenta mil años luz de nosotros), algunos detectores (entre ellos el de Kamioka, en Japón, sobre el que volveremos) pudieron identificar el paso de los neutrinos producidos en la colosal detonación.

El problema de la detección de neutrinos solares *no* se debe a escasez de estos. El sol emite unos 10^{38} neutrinos por segundo, de los que en la tierra se reciben unos diez billones (10^{13}) por metro cuadrado y por segundo. Ciertamente una enorme cantidad, pero difícilmente detectable. En efecto, la gran mayoría de estos neutrinos se generan por fusión del hidrógeno en helio, y tienen muy poca energía, siendo, por tanto, inobservables: hay que tener en cuenta que la probabilidad de interacción de neutrinos de baja energía tiende hacia cero cuando la energía es muy pequeña. Es necesario pues buscar reacciones secundarias que proporcionen neutrinos más energéticos y, además, amplificar las posibilidades de detección.

De esta manera, la historia de los experimentos con neutrinos solares empezó desde dos direcciones completamente distintas. En 1958 ocurrió el descubrimiento experimental de Holmgren y Johnston de que la producción del isótopo berilio-7 en la fusión de helio-3 y helio-4 era unas mil veces más frecuente de lo que se creía con anterioridad. Esto llevó a W. Fowler y A. Cameron a sugerir que estos procesos, posibles en el interior del sol, debían producir enormes cantidades de neutrinos en la posterior desintegración del boro-8, producido a su vez de la fusión del boro-7 con protones. El interés de esta subreacción es que los correspondientes neutrinos son muy energéticos, en comparación con los debidos a fusión ordinaria y, por tanto, podían producir más interacciones: se tenía pues una importante fuente de neutrinos solares potencialmente detectables.

La segunda dirección desde la que llegaron informaciones que hicieron el experimento factible fue la observación, hecha por John Bahcall en 1963, de que la probabilidad de absorción de neutrinos por el cloro es particularmente grande, gracias a un efecto de resonancia. Los neutrinos absorbidos convertían al cloro en argón radiactivo, de forma muy ef-

ciente. Había pues mecanismos de producción y posible detección de neutrinos en cantidades que hacían el experimento factible. El interés astrofísico de esta detección sería enorme. Ya que los neutrinos apenas interactúan en su trayecto en el interior del sol, su observación proporcionaría información directa sobre el corazón solar: podemos calificar a los detectores de neutrinos cósmicos como *telescopios de neutrinos*.

En 1964 se realizó la propuesta formal de construir un detector con casi medio millón de kilos de un compuesto de cloro (*percloroetileno*), que sería capaz de registrar las señales de estos neutrinos solares. Después de varias peripecias, y con la ayuda del Laboratorio Nacional de Brookhaven, en Estados Unidos, un pequeño equipo formado por Raymond Davis, Don Harmer y John Galvin diseñó y construyó el experimento en la mina de oro Homestead, en Dakota del Sur, en 1965. La razón de utilizar una mina (como en el experimento de Davis) o el interior de un túnel, como en otros experimentos, es que en tales lugares se está blindado contra los rayos cósmicos que, de lo contrario, producirían un gran ruido de fondo, imposibilitando la detección de algo tan sutil como las interacciones de los neutrinos.



Figura 3. Davis y Bahcall, con el recipiente utilizado en el experimento de Davis.

Davis y colaboradores rellenaron el depósito con el medio millón de litros de percloroetileno; cada varios meses se ciclaba el material por detectores de radiactividad, esperándose detectar algún átomo de argón radiactivo, y por tanto el rastro de la interacción de algún neutrino, una o dos veces al año. Pero durante mucho tiempo el experimento, conocido como *experimento de Davis* (que era quien lo lideraba), funcionó sin éxito aparente. Las señales de neutrinos tardaron en llegar y, cuando llegaron (a partir de 1968), resultaron mucho menos frecuentes de lo que se esperaba: al menos un factor dos, tal vez un factor tres. Sin

embargo, el detector de Davis era tan difícil de controlar que la comunidad científica no prestó demasiada atención al hecho y durante casi veinte años Davis prosiguió, prácticamente ignorado, sus experimentos, a cuyos resultados la comunidad se refería ocasionalmente como *el problema de los neutrinos solares*.

Sin embargo, a finales de la década de los ochenta, y a lo largo de los noventa del pasado siglo, y ayudados los investigadores por la experiencia adquirida en los intentos de detectar la desintegración del protón, se han llevado a cabo otros experimentos utilizando materiales distintos del de Davis, y con sensibilidad a neutrinos producidos en reacciones solares distintas de las consideradas por él. Particularmente interesantes son los experimentos utilizando galio, sensible a neutrinos solares procedentes de procesos menos alambicados que la cadena helio-3 - helio-4 - boro-7 - boro-8 y, por lo tanto, menos dependientes de detalles de modelos astrofísicos del interior del sol⁴. Los resultados de estos experimentos confirmaron los hallazgos del original de Davis.

También fueron cruciales en la solución del rompecabezas de los neutrinos los experimentos reconvertidos de intentos de detectar la desintegración del protón, en especial el de Kamiokande en una mina en las montañas del Japón (dirigidos por Masatoshi Koshihira y Yoji Totsika), que estuvieron entre los que observaron los neutrinos de la supernova en 1987. El nombre de *Kamiokande* deriva del lugar donde está localizado el experimento, *Kamioka*, y de las iniciales de *nucleon decay experiment*: como hemos mencionado, los experimentos comenzaron con intentos de encontrar desintegraciones de protones o neutrones (ligados), conocidos colectivamente como *nucleones*.

A partir de 1996, el detector se reemplazó por uno mucho más grande, conocido como Superkamiokande, en que la posibilidad de detectar neutrinos de origen extraterrestre se tuvo en cuenta desde el principio. En la actualidad se planean también detectores de neutrinos procedentes de rayos cósmicos ultraenergéticos, algunos en lugares tan exóticos como el polo sur (AMANDA), las profundidades del Mediterráneo (ANTARES, NESTOR) e incluso en el espacio.

Aunque los experimentos son muy duros, ya que después de grandes esfuer-

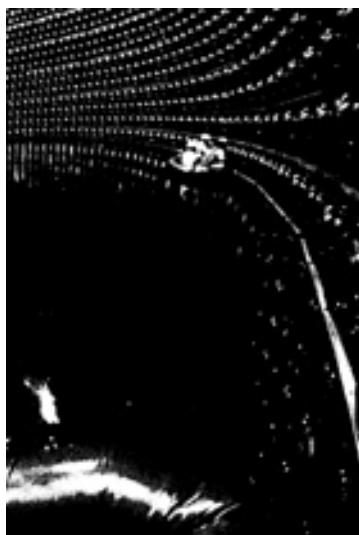


Figura 4. Interior del detector Superkamiokande. La estructura en “panal de abejas” son los fotomultiplicadores que sirven para amplificar las señales.

zos sólo se recogen unos pocos sucesos en varios años, la conclusión se confirma: se detectan algo menos de la mitad de los neutrinos que el sol emite. Lo que es más, los experimentos con rayos cósmicos parecen indicar que también el número de interacciones de neutrinos procedentes de esta fuente⁵ decrece, cuando los neutrinos tienen que viajar un largo recorrido antes de llegar al detector. Esto lo podemos saber porque en los más modernos experimentos (en particular en los realizados en Kamioka) es posible inferir la *dirección* desde la que llegan los neutrinos. Es por tanto posible diferenciar entre los neutrinos producidos en la atmósfera por rayos cósmicos directamente encima del detector, y aquellos neutrinos que llegan después de atravesar la tierra, habiendo sido producidos en los antípodas. El sorprendente resultado que se encuentra es que el número de neutrinos procedentes de los antípodas que se detectan es bastante inferior a los neutrinos detectados procedentes de encima del detector: aparentemente, desde los antípodas al detector desaparece casi la mitad de los neutrinos.

Es curioso este comportamiento de los neutrinos. Cuando viajan una pequeña distancia entre la fuente que los produce y el detector, como es el caso con los generados en reactores nucleares, en la atmósfera inmediatamente encima del detector, o en aceleradores, sus señales son exactamente lo que se espera teóricamente. Pero cuando media una gran

distancia entre fuente y detector parece que los neutrinos se perdiesen por el camino.

Se han propuesto docenas de explicaciones para este fenómeno. La más sencilla y probable, sugerida ya en 1968 por Vladimir Gribov y Bruno Pontecorvo, es suponer que los neutrinos tienen una muy pequeña masa (tal vez generada por el mecanismo de Higgs), con lo cual podrían desintegrarse, o tal vez oscilar, entre los tres posibles tipos de neutrino. Así, el neutrino electrónico (que es el que producen las reacciones solares) podría desintegrarse, o transmutarse, en neutrinos tipo *mu* o *tau*, que los aparatos utilizados por Davis y los demás experimentos no son capaces de detectar; y lo mismo le ocurriría a los neutrinos de tipo μ , que son a quienes es sensible el detector de Kamioka.

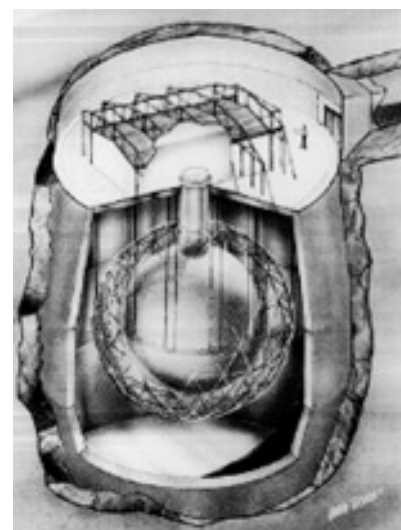


Figura 5. Esquema del detector instalado en SNO (Sudbury neutrino observatory). En el centro, agua pesada (deuterio); en el exterior, agua normal. La escala la da la minúscula figura humana situada en la plataforma de arriba, a la derecha.

Evidentemente, lo que se necesita es un detector sensible a *todos* los tipos de neutrino; y esto lo ha proporcionado el conocido como SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*) en Canadá. En él (ver la figura) un detector central, con agua pesada, es capaz de detectar todo tipo de neutrinos; el exterior (con agua ordinaria) sólo da señales de los neutrinos de tipo electrónico. Las conclusiones de las observaciones de SNO, completadas en el último año, son concluyentes: el número de neutrinos detectados en el interior es el que se espera produzca el sol; el

⁴ Citamos entre estos la colaboración germano-franco-italo-israelí-americana conocida como GALLEX, y la rusa SAGE.

⁵ Estos neutrinos no son, estrictamente hablando, extraterrestres; aunque los rayos cósmicos que los producen *sí* proceden del espacio exterior, los neutrinos propiamente dichos son generados por las interacciones de los rayos cósmicos primarios en la atmósfera.

numero de los detectados en el exterior está en acuerdo con los resultados del experimento de Davis, y similares. La conclusión es inevitable: en el camino entre el sol y la tierra, ya sea por oscilación o por desintegración, se transmutan algo más de la mitad de los neutrinos electrónicos en los otros dos tipos de neutrinos. Es una pena que el comité Nobel no haya dejado a Giacconi para otra ocasión (según sus estatutos sólo se pueden premiar a tres personas) y no haya incluido a un representante del experimento de SNO, sin duda el que ha aclarado la situación de los neutrinos (en especial de los solares) de forma definitiva.

4. Las masas de los neutrinos

Fue el propio Fermi el que sugirió el método con el que, todavía hoy, se obtiene la mejor cota superior sobre la masa del neutrino electrónico: la medida del espectro de energías de los rayos beta (electrones) en la desintegración del tritio. En efecto, es muy difícil observar a los neutrinos directamente y por tanto las mejores estimaciones de sus masas son siempre indirectas.

Fermi no llevó a cabo el experimento, pero este se ha realizado por otros grupos, incluso muy recientemente. Gracias a ellos se sabe que $m(\nu_e)c^2 \leq 15 \text{ eV}$; esto es, como mucho el neutrino electrónico tiene una masa de treinta millonésimas de la del electrón.

Las masas de los otros dos neutrinos son mucho peor conocidas; no existe para ellos un proceso que permita fijarlas con tanta precisión como la del neutrino electrónico. Tenemos que la masa del neutrino muónico es menor que un tercio de la del electrón,

$$m(\nu_\mu)c^2 \leq 0,17 \text{ MeV},$$

y la del neutrino tau podría, como máximo, ser cincuenta veces la del electrón:

$$m(\nu_\tau)c^2 \leq 24 \text{ MeV},$$

Estos límites nos dan valores *máximos* posibles para las masas de los neutrinos. Pero, ¿qué hay de valores *mínimos*? ¿Podrían las masas de los neutrinos ser cero? En el modelo de Glashow-Weinberg-Salam de las interacciones débiles la masa de todos los neutrinos es estrictamente cero; pero no es difícil modificarlo, añadiendo una pequeña interacción del campo de Higgs con los neutrinos⁶ para obtener una teoría con cualquier valor que se nos ocurra para las masas de los neutrinos (dentro, por supuesto, de los límites experimentales conocidos) e idéntica con la de Glashow-Weinberg-Salam a todos los demás respectos.

Nos encontramos, por tanto, sin guía teórica para los valores de las masas de los neutrinos, y tendremos que dejar que los experimentos nos iluminen. Estos experimentos pueden ser de dos tipos: como los ya mencionados, de observa-

ción (mejor dicho, de *no observación*) de neutrinos extraterrestres, y, con más precisión, los proyectados tanto en Europa como en los E.E.U.U., de enviar neutrinos producidos en aceleradores a grandes distancias, de trescientos a tres mil kilómetros, que nos podrían proporcionar informaciones con un cierto detalle en los próximos diez o quince años. De momento, nos tenemos que conformar con saber que los experimentos de Kamioka y otros similares nos indican que la diferencia entre los cuadrados de las masas de los neutrinos muónicos y los demás es del orden de un treintavo de eV cuadrado:

$$m_{\nu_\mu}^2 - m_{\text{otros } \nu}^2 \cong 3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 / c^4.$$

Finalmente, en 1996 Koshiba y sus colaboradores pusieron en marcha el Super-Kamiokande, un experimento que involucra 50.000 toneladas de agua con 10.000 fotomultiplicadores para detectar neutrinos. En 1998, proporcionó la primera indicación de la oscilación de los neutrinos e información muy detallada de los neutrinos solares.

Este artículo está adaptado del capítulo de igual título del autor "Electrones, neutrinos y quarks". Ed. Crítica, 2001.

Francisco J. Ynduráin
está en el Dpto. de Física Teórica.
Univ. Autónoma de Madrid

Para celebrar el Centenario de la RSEF, Revista Española de Física editará, en el año 2003, seis números a todo color.

Por este motivo los precios de la suscripción a REF serán los siguientes:

- **Instituciones 50 E**
- **Individuales 40 E**
- **Estudiantes 30 E**

⁶ Hace falta además introducir unos nuevos estados de los neutrinos, los neutrinos *dextro*, extraordinariamente difíciles de observar experimentalmente ya que sólo interaccionarían con la partícula de Higgs.