



Neutrinos solares ¿Por qué brillan las estrellas?

Salvador Gil
Escuela de Ciencia y Tecnología, Universidad
Nacional de San Martín y Departamento de Física,
Universidad de Buenos Aires

Posiblemente uno de los logros recientes más significativos en el campo de la física fue la solución al enigma de cómo el Sol genera su energía. Por más de treinta años los científicos estuvieron tratando de develar el misterio de los neutrinos solares, que consistía en entender por qué el número de esas partículas que llegan a la Tierra desde el Sol era mucho menor que los modelos de funcionamiento del Sol predecían.

Por más de 30 años los científicos han estado tratando de resolver 'el problema de los neutrinos solares'. ¿Cómo era posible que en la Tierra se midiese solo una fracción de los neutrinos que se esperaba que el Sol emitiera? Un buen modelo debe de hacer predicciones que concuerden con las observaciones. ¿No sería esto indicativo de que los modelos de funcionamiento del Sol estaban equivocados como ya había ocurrido en el pasado?

¿Qué son los neutrinos?

Se trata de partículas elementales que junto con los electrones, muones, taus y quarks constituyen los ladrillos básicos con que está hecha toda la

materia del Universo. Estas partículas se producen en desintegraciones radiactivas y en otras reacciones nucleares. Los neutrinos están estrechamente emparentados con los electrones, muones y taus pero, a diferencia de estos, no tienen carga eléctrica y viajan prácticamente a la velocidad de la luz. Hay tres variedades o 'sabores' de neutrinos: los neutrinos del electrón, ν_e , los neutrinos del muón, ν_μ y los neutrinos tau, ν_τ . Al no poseer carga eléctrica, la interacción de los neutrinos con la materia ordinaria es muy poco frecuente. Estas partículas interactúan con la materia exclusivamente a través de la fuerza nuclear débil. Debido a esta circunstancia, en cada segundo, miles de millones de neutrinos pasan por nuestro cuerpo sin que los percibamos. Si deseásemos reducir su flujo a la mitad, deberíamos construir una pared de plomo cuyo espesor debería ser del orden de la distancia de la Tierra a la estrella Alfa de la constelación Centauro, o sea de unos 4 años luz de espesor. Esta diminuta probabilidad de interacción de los neutrinos con la materia ordinaria, hace que su detección sea extremadamente difícil. Desde que el físico Enrico Fermi predijera su existencia hacia fines de los años 30, hasta que se logró su detección por vez primera, pasaron cerca de 20 años. Sin embargo, como no hay mal que por bien no venga, esta misma propiedad posibilita que los neutrinos transporten información casi inalterada desde sus fuentes de producción en el centro de las estrellas hasta nosotros. En esta región de las estrellas es donde se genera la energía que las caracteriza y donde se sintetizan los núcleos más pesados, en particular se genera helio a partir del hidrógeno. Por lo tanto, el estudio de los neutrinos que se producen en el Sol y en otras estrellas constituye una valiosa fuente de información acerca de los procesos nucleares que ocurren en el interior de las mismas y que son los responsables de su brillo. En el caso particular de nuestra estrella, el Sol, es su energía la que originó y sostiene la vida en nuestro planeta. Pequeñas alteraciones en los mecanismos de producción de esta energía tendrían consecuencias potencialmente catastróficas para la vida en la Tierra. De allí que entender los mecanismos de generación de energía en el Sol sea un desafío intelectual de profundas implicancias prácticas. La predicción de los flujos de neutrinos solares medidos en la Tierra es una de las pruebas más exigentes que se pueden realizar sobre la validez de los modelos solares.

La naturaleza del Sol y su brillo fue motivo de especulación desde la antigüedad. Anaxágoras (500-428 aC), maestro de Pericles, fue encarcelado por sugerir que el Sol era una piedra incandescente. Durante la antigüedad y el medioevo, el Sol

fue el paradigma del Fuego Perfecto, hasta que Galileo descubrió las manchas solares. Entre las muchas herejías que llevaron a Giordano Bruno a la hoguera, se cuenta su hipótesis de que las estrellas eran soles.

La potencia del Sol y su edad son dos propiedades que los científicos creen conocer muy bien, pero que les resultaban difíciles de conciliar. En cierto modo estas propiedades son como las dos caras de una misma moneda. La potencia del Sol o luminosidad es un parámetro que se puede obtener sencillamente. La energía que llega (perpendicular) a la Tierra por unidad de área y tiempo se llama la 'constante solar' y su valor se conoce muy bien: $1,34\text{Kw/m}^2$. Como la distancia Sol-Tierra (d_{ST}) es conocida, multiplicando el área de una esfera de radio igual a d_{ST} por la constante solar se obtiene la luminosidad del Sol. Sabemos además que el Sol es al menos tan antiguo como la Tierra, por lo tanto ha estado brillando por alrededor de cinco mil millones de años. También sabemos que la potencia emitida por el Sol no varió apreciablemente durante su vida y en particular en los últimos mil millones de años. Pequeños cambios en la actividad del Sol, producirían grandes modificaciones en la vida de la Tierra.

En el siglo XIX los físicos suponían que la energía del Sol era de naturaleza gravitatoria. Es bien sabido que una piedra al caer disminuye su energía potencial gravitatoria la que a su vez se transforma en energía cinética. De igual modo, si el Sol disminuyera de tamaño, disminuiría su energía potencial y esa energía sería la que por algún mecanismo se transformaría en su brillo. El bombardeo producido por la llegada de meteoritos al Sol, aumentaría la cantidad de energía disponible, aunque estos también aumentarían su masa. W Thomson (Lord Kelvin) y Hermann von Helmholtz eran partidarios de esta teoría. Sin embargo, dichos mecanismos podrían funcionar a lo sumo por unos 30 millones de años. Esta teoría era aceptable en el siglo XIX cuando aún no se conocían las edades de la Tierra ni del Sol, pero hoy resultan claramente inconsistentes con las evidencias respecto de la edad del Sol. Por otro lado, el origen de la energía del Sol no podía ser de naturaleza química, como la combustión de hidrógeno con oxígeno por ejemplo, ya que esto nos daría una vida media del Sol de solo mil quinientos años! Además implicaría la existencia de grandes cantidades de oxígeno en el Sol, cosa que no se observaba. Los elementos más abundantes en el Sol son el hidrógeno y el helio. Por consiguiente, para explicar el funcionamiento del Sol por cinco mil millones de años, tenemos que suponer que las reacciones que genera su energía son al menos un millón de veces más

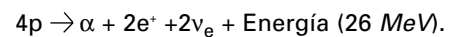


Figura 1. Diagrama esquemático del detector del observatorio de neutrinos de Sudbury (*Sudbury Neutrino Observatory, SNO*). El balón central contiene el agua pesada. La estructura geodésica que lo rodea, soporta los tubos fotomultiplicadores para detectar la luz Cerenkov. El tanque de cemento que contiene al detector está lleno de agua común ultrapura. Todo el detector se encuentra alojado dentro de una mina a unos 2000 m de profundidad. (Foto cortesía de SNO).

energéticas que las químicas. Sabemos que las únicas reacciones capaces de producir tanta energía son las nucleares (incidentalmente, una reacción nuclear es típicamente un millón de veces más energética que una reacción química).

En 1905 Einstein propuso su famosa relación entre masa y energía $E=mc^2$, que indica que pequeñas cantidades de masa pueden en principio convertirse en grandes cantidades de energía, dado que el valor de la velocidad de la luz en el vacío (c) es un número muy grande. Esta relación implica que, si se unen dos protones con dos neutrones para formar un núcleo de helio, se libera una gran cantidad de energía. La masa del helio es menor que la suma de las masas de las partículas que lo forman (2 protones y 2 neutrones), la variación de la masa multiplicada por c^2 nos daría la energía liberada en esta reacción. El origen nuclear de la energía del Sol fue propuesto primeramente

por el físico británico Sir Arthur Eddington en la década del 20. Sin embargo, los modelos detallados recién estuvieron maduros hacia fines de los años cincuenta, cuando físicos de la talla de George Gamow, Hans Bethe, Willy Fowler y John Bahcall, entre otros, contribuyeron en forma significativa al desarrollo de los modelos solares. La idea central de estos modelos es que, en el interior del Sol, existe una probabilidad muy pequeña pero no nula de que cuando dos protones (núcleos de hidrógeno) estén muy próximos, gracias a la fuerza nuclear débil, tenga lugar la transformación de un protón (p) en un neutrón (n), un electrón positivo (e^+) y un neutrino (ν_e). La levedad de la interacción débil hace a esta reacción muy poco probable, de modo que típicamente la vida media de un estrella de masa y brillo comparable a nuestro Sol, sea de unos diez mil millones de años. La interacción débil actúa como una especie de ancla del Sol. El neutrón así generado puede combinarse con el otro protón para formar un núcleo de deuterio o deuterón. Mediante otras reacciones estos núcleos de deuterio se combinan para generar partículas α (núcleos de helio), que son el resultado final de este proceso. Simbólicamente esta cadena de reacciones, conocida genéricamente como la cadena p - p , se escribe así:



Un hecho importante para destacar es que junto a la energía producida (que se transforma en energía cinética de las partículas producidas y que luego se transforma en calor y luz), también se produce un número bien definido de *neutrinos del electrón*, ν_e . La cadena p - p no es la única reacción nuclear que ocurre en el interior del Sol, pero es por lejos la más probable. Esta reacción nuclear es una típica reacción de fusión, que consiste en que núcleos livianos se unan (fusionen) para formar otros más pesados, produciendo al mismo tiempo energía y nuevos núcleos más masivos. Si el mecanismo de generación de energía es efectivamente el descrito más arriba, conociendo la potencia del Sol, podemos calcular el número de este tipo de reacciones que se producen en el Sol por segundo y por consiguiente el número de ν_e producidos por segundo. Como dijimos antes, los neutrinos prácticamente no interactúan con la materia y deberían llegar prácticamente inalterados a la Tierra. Si pudiésemos contar el número de ν_e que nos llegan por segundo, podríamos convalidar el mecanismo de producción de energía y de este modo validar o no el modelo solar. Los experimentos para detectar estos neutrinos (solares) comenzaron en la década de los 60.

El primer experimento

Uno de los experimentos pioneros en este campo fue llevado a cabo por Raymond Davis Jr., profesor de la Universidad de Pennsylvania e investigador del Brookhaven National Laboratory que utilizó un tanque de unos 400m³ de percloro etileno (C₂Cl₄), un fluido usado en limpieza, ubicado en el interior de una mina de oro a 1500m de profundidad en Homestake, South Dakota. La clave de este experimento es que el cloro puede reaccionar con los neutrinos ν_e para producir argón (Ar). El argón es un gas noble que puede separarse del percloro etileno. Conociendo la probabilidad de interacción de los neutrinos con el cloro y midiendo el número de átomos de Ar es posible determinar el flujo de neutrinos. La razón de ubicar los detectores de neutrinos en minas profundas está relacionada con el hecho de que la radiación cósmica que permanentemente llega a la Tierra produce unas partículas subatómicas (muones) que generan una gran cantidad de 'ruido' electrónico en los detectores. Esta radiación es fuertemente atenuada luego de atravesar 1km de roca. Según los modelos teóricos, la producción de Ar debía ser de un solo átomo por día. Por lo tanto la tarea de Davis consistía en acumular átomos de Ar en el detector por alrededor de un mes y luego separarlos del C₂Cl₄ y contarlos. Para darnos una idea de la magnitud de este emprendimiento, Davis tenía que detectar cada mes, unos 30 átomos de Ar dentro de un tanque que tenía 10³⁰ moléculas de C₂Cl₄. Si toda la Tierra estuviese formada de granitos de arena de 0,5mm de diámetro, tendríamos alrededor de 10²⁸ granos. Por lo tanto, el desafío experimental de Davis era comparable a encontrar unos 30 granos de arena en un volumen del tamaño de toda la Tierra! Lo notable de este experimento es que efectivamente Davis y sus colaboradores lograron hacerlo. Sin embargo, a medida que los datos se acumulaban y mientras se perfeccionaban las mediciones y calibraciones de los métodos usados, comenzó a ser evidente que se detectaba solo un tercio de los neutrinos que debían llegar de acuerdo con las predicciones de los modelos solares. En los años subsiguientes, nuevos experimentos se montaron para resolver este misterio, pero solo lograron hacer más evidente y robusto el déficit de neutrinos que llegaban a la Tierra. El enigma fue tan serio que llegó a tener nombre propio, 'el problema de los neutrinos solares'.

Estos resultados implicaban que, o bien los modelos propuestos para explicar la producción de energía en las estrellas no eran correctos o que, tal vez, algo en la física del problema era inadecuado, algo similar a lo ocurrido con los modelos propuestos para los mecanismos de producción de energía

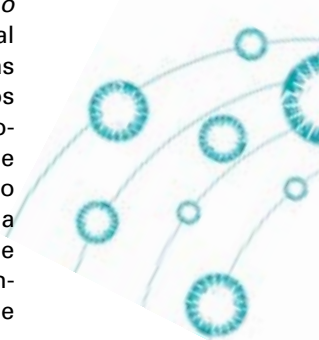


Figura 2. Esfera geodésica que soporta los tubos fotomultiplicadores del detector SNO. (Foto cortesía de SNO).

en el Sol en el siglo XIX. Sin embargo, los científicos eran reacios a modificar modelos que funcionaban perfectamente para el resto de las variables. Una alternativa que surgió como posible explicación postulaba que los neutrinos del electrón transmutaran a otra variedad de neutrinos, otros 'sabores', en su camino desde el Sol, es decir que los neutrinos sufrieran una especie de 'desorden de personalidad múltiple'. Como los detectores solo detectan neutrinos del electrón, claramente notaríamos un déficit de los mismos, ya que algunos habrían cambiado de 'sabor'. Esta transmutación que en principio parece rebuscada como explicación es, en realidad, muy posible entre partículas con características similares. Sin embargo esto implicaría que el modelo estándar de las partículas elementales, uno de los paradigmas más exitosos de la física moderna (ver CIENCIA HOY, 26:38-39, 1994), debería ser modificado.

Los nuevos experimentos

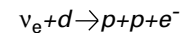
En la década de los 90 se formaron varias colaboraciones internacionales de científicos que idearon experimentos para intentar resolver el problema. Una de ellas fue la construcción del observatorio de neutrinos de Sudbury (*Sudbury Neutrino Observatory* o SNO), localizado a unos 300km al norte de Toronto, Canadá, en una de las minas más profundas de América del Norte, a unos 2000m de profundidad. El detector del SNO (pronunciase 'snou') consiste en un inmenso balón de acrílico de unos 12m de diámetro conteniendo 1000 toneladas de agua pesada (agua en la que a las moléculas se les reemplaza los átomos de hidrógeno, protón, por deuterio, cuyo núcleo contienen un protón más un neutrón) y rodeado de



una esfera geodésica conteniendo unos 10.000 tubos fotomultiplicadores (*Photomultiplier tubes* o PMTs). Estos tubos detectan la luz que se produce en el interior del detector debido a diferentes procesos. La operación del detector es una tarea muy compleja dado que una buena parte de la electrónica opera bajo agua. Además es necesario disminuir la contaminación de núcleos radiactivos naturales a un mínimo ya que la radiactividad natural contenida en un vaso de polvo o suciedad ordinaria podría enmascarar por completo las señales que se buscan medir. Uno de los mecanis-

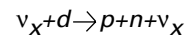
(velocidad de la luz en el vacío) ya que $n > 1$. Por ejemplo en agua el índice de refracción es $n = 1,33$, de modo que la luz viaja en ella a un 75 por ciento de la velocidad con la que lo hace en el vacío. En estas condiciones, es perfectamente posible que la velocidad de los electrones sea mayor que c/n y menor que c , en consistencia con lo requerido por la teoría de la relatividad. La radiación Cerenkov es fácilmente detectada por los tubos fotomultiplicadores. Es importante notar que esta reacción de choque puede ocurrir entre cualquier tipo de neutrino (ν_x) con un electrón, aunque cada variedad o 'sabor' de neutrino tiene una probabilidad de interacción diferente. Sin embargo hay dos tipos de reacciones más que son posibles dentro del detector SNO:

1. la absorción de neutrino del electrón, ν_e , mediante la reacción



donde el neutrino golpea al núcleo de deuterio de la molécula de agua pesada, es absorbido, transforma a un neutrón en un protón y genera un electrón; y

2. la ruptura del núcleo de deuterio por medio de cualquier tipo de neutrino, ν_x , mediante la reacción



Cada una de estas reacciones tiene una señal característica y discernible experimentalmente. De este modo lo particularmente singular del detector del SNO es que puede medir tanto el flujo de todos los tipos de neutrino (ϕ_x) como el flujo de neutrinos de electrón (ϕ_e) en forma separada. De este modo si ambos flujos fuesen iguales, como *el Sol solo produce neutrinos del electrón*, esto implicaría que los neutrinos no transmutan unos en otros. Por el contrario, si el flujo total (de todos los tipos de neutrinos) fuese mayor que el flujo de neutrinos del electrón ($\phi_x > \phi_e$), sería una prueba directa de que los neutrinos efectivamente transmutan de una variedad en otra.

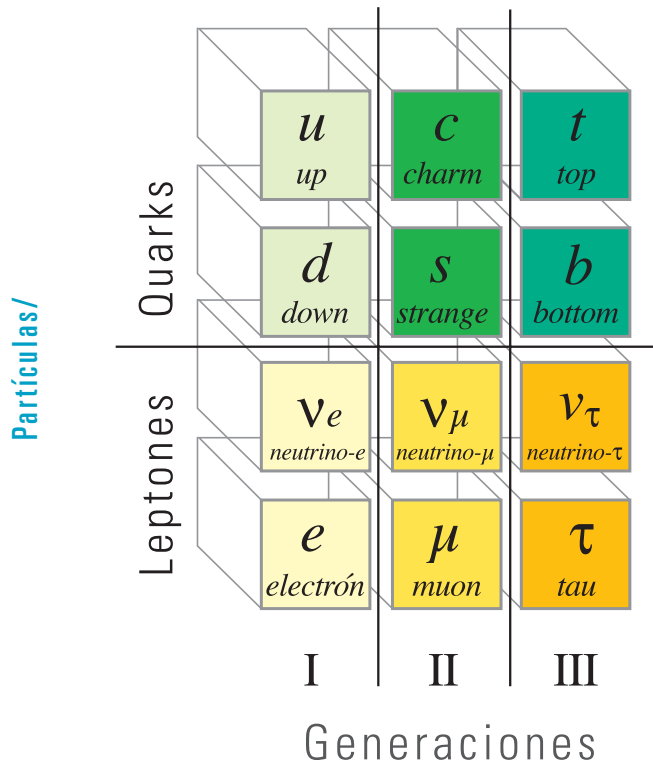
Luego de cuatro años de toma de datos la colaboración SNO anunció sus resultados más importantes a mediados de 2001 mostrando que el flujo de neutrinos del electrón es solo un 35 por ciento del que predicen los modelos solares. De esta manera confirmó fehacientemente y cuantitativamente los resultados de los experimentos anteriores. Pero lo más significativo de este experimento es que demostró que el flujo total de neutrinos es mayor que el flujo de neutrinos del electrón. *Este resultado experimental constituye una de las evi-*



Figura 3. Ubicación geográfica de Sudbury, Ontario, Canadá, donde se encuentra emplazado el detector SNO. Sudbury está situado en una zona muy rica en minas de cobre y níquel. La mayoría de las minas se encuentran ubicadas al borde de lo que se cree fue un gran cráter, producido por el impacto de un gran meteorito de 1 a 3km de diámetro ocurrido hace unos 1800 millones de años. De hecho, se presume que la riqueza minera de la zona es un subproducto de aquel evento devastador.

mos a través de los cuales es posible detectar a los neutrinos, es por un simple choque de un neutrino con un electrón, una especie de billar subatómico en el cual el electrón impactado por un neutrino de alta energía, sale despedido a una velocidad cercana a la velocidad de la luz en el vacío, en la dirección del neutrino incidente. Cuando una partícula cargada viaja en un medio a una velocidad que supera la velocidad de la luz en ese medio, emite una radiación azulada característica llamada radiación Cerenkov. Nótese que la velocidad de la luz en un medio material transparente de índice de refracción n es c/n que es siempre menor que c

El modelo estándar



Gravitatoria:

La más débil y universal de todas. Actúa sobre todas las partículas. Es de largo alcance.

Nuclear débil:

Afecta a los quarks y leptones. Es de muy corto alcance. Responsable del decaimiento beta.

Electromagnética:

Afecta a las partículas con carga eléctrica.

Nuclear fuerte:

Afecta solo a los quarks y a partículas compuestas de quarks (protones y neutrones). Responsable de la estabilidad de los núcleos. Es de corto alcance.

Los antiguos griegos sostenían que el mundo estaba formado por cuatro elementos fundamentales: *fuego, aire, agua y tierra*. Continuando con aquel anhelo reduccionista, la física moderna sostiene que los constituyentes básicos de la materia son los quarks y los leptones, que interactúan entre sí mediante cuatro fuerzas o interacciones. A diferencia de los antiguos griegos, cuyas aseveraciones acerca de la naturaleza se basaban en la intuición y la especulación, el modelo estándar (ME), uno de los paradigmas más significativos y exitosos de las ciencias, surge de la utilización del método científico.

El diagrama de la izquierda constituye una especie de 'tabla periódica' de las partículas elementales, de las cuales creemos está compuesta toda la materia del Universo. Mediante las cuatro fuerzas, indicadas a la derecha, y las ecuaciones de movimiento (leyes de Newton o de la Mecánica Cuántica) es posible explicar todos los fenómenos físicos observados: núcleos, átomos, moléculas, galaxias, etc.

El ME es una teoría cuántica que describe las interacciones nucleares fuertes entre los quarks (cromodinámica cuántica o QCD) y la interacción electrodébil, que unifica las

fuerzas electromagnéticas y nuclear débil. La interacción gravitatoria está incluida en el cuadro de la derecha por ser una de las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza, pero ella no es parte del ME. Varias de las partículas que aparecen en el diagrama de la izquierda y sus propiedades fueron predichas por el ME. El posterior descubrimiento de estas partículas constituyó uno de los logros más espectaculares de este modelo. Las partículas indicadas a la izquierda se clasifican en tres generaciones o familias (agrupadas verticalmente). La mayor parte de la materia ordinaria está compuesta de las partículas de la generación I. Por ejemplo, un átomo de Helio está compuesto de un núcleo que contiene dos protones y dos neutrones y de dos electrones (e). A su vez el protón está compuesto de tres quarks, dos quarks 'up' (u) y un quark 'down' (d), es decir (uud). De modo similar, el neutrón está compuesto de dos quarks 'down' y un quark 'up' o sea (ddu). Los neutrinos del electrón (ν_e) son naturalmente emitidos en los decaimientos radiactivos beta. Asimismo, la teoría cuántica indica que las interacciones entre las partículas se realizan mediante el intercambio de otras partículas mediadoras

llamadas bosones. El rango o alcance de las fuerzas depende inversamente de la *masa* de estas partículas mediadoras. El hecho de que las partículas mediadoras de las fuerzas gravitatoria (gravitones) y electromagnética (fotones) tengan masa nula tiene como consecuencia que dichas fuerzas sean de muy largo alcance. Sabemos que la interacción gravitatoria actúa entre planetas y galaxias. Por otro lado, como las partículas mediadoras de las fuerzas nucleares débiles y fuertes son muy masivas, dichas fuerzas son de muy corto alcance.

Otra consecuencia del modelo estándar es que los neutrinos no tienen masa y viajan a la velocidad de la luz. Los resultados obtenidos con los detectores de neutrinos solares indican que los neutrinos de una familia transmutan unos en otros, en una especie de esquizofrenia subatómica. Este comportamiento nos lleva a concluir que los neutrinos deben tener una masa no nula, en desacuerdo con el ME. Por lo tanto, estos resultados experimentales son muy significativos ya que constituyen una de las primeras y más notables anomalías en esta teoría, que por otro lado fue una de las más exitosas de la física.

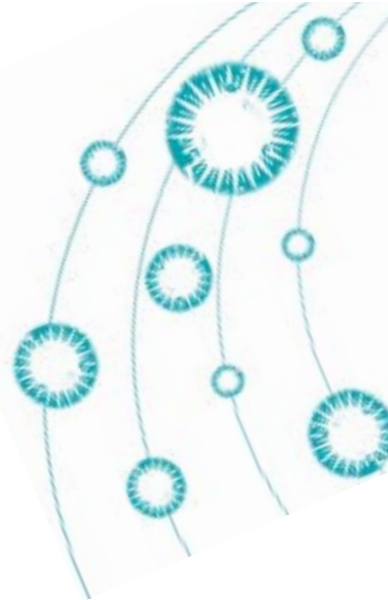
dencias más claras y directas de que los neutrinos efectivamente transmutan de una variedad a otra. Más aún, la comparación del flujo de neutrinos de todos los tipos coincide perfectamente, dentro de los errores experimentales, con las predicciones de los modelos solares, confirmando la evidencia indirecta obtenida anteriormente en otros experimentos, en particular por el detector de neutrinos de Super-Kamiokande ubicado en Japón.

Finalmente una respuesta

Los resultados del SNO han dado una respuesta definitiva al 'problema de los neutrinos solares' y nos permiten afirmar que la energía que potencia las estrellas es efectivamente la fusión nuclear. También indican que es necesario enmendar el modelo estándar de las partículas elementales de modo que el mismo incluya una masa finita para los neutrinos del electrón y las mutaciones observadas experimentalmente. Sin embargo, estos importantes resultados experimentales no son completos, en el sentido de que los parámetros necesarios para caracterizar la mutación de los neutrinos no surgen en toda su extensión de estos experimentos. La mutación de los neutrinos de una variedad es sensible a la energía de los mismos y a la diferencia de sus masas, pero estos experimentos no nos permiten conocer sus masas respectivas. Otros experimentos se están realizando para completar esta información. En particular, la colaboración japonesa-norteamericana KamLAND, busca determinar la mutación de los antineutrinos del electrón producidos en varios reactores nucleares ubicados a distintas distancias del detector KamLAND ubicado en Kamioka, Japón. Estudiando las proporciones de transmutación de neutrinos en función de la distancia a cada reactor, este grupo espera acotar los valores de los parámetros que permitan caracterizar fenomenológicamente la física de los neutrinos.

En síntesis, el estudio de los neutrinos solares nos permitió contestar en forma cuantitativa la pregunta ¿por qué brillan las estrellas?, y al mismo tiempo descubrir la primera anomalía en el modelo estándar de las partículas elementales. Estos experimentos abren una nueva ventana al cosmos, ya que la astronomía de los neutrinos es una de las herramientas más promisorias para estudiar cómo 'viven' y cómo 'mueren' las estrellas.

En reconocimiento a estos logros en la astrofísica, la Academia Sueca otorgó el premio Nobel de Física 2002 a los pioneros de la detección de los neutrinos solares: R Davis Jr. y M Koshiba que lo compartieron con R Giacconi.



Agradecimientos

A A Schwint, D Digregorio, L Pelliza, C Waltham y A García por la lectura de este manuscrito y las múltiples sugerencias realizadas.



Salvador Gil:

Profesor de física de la Universidad Nacional de San Martín y de la Universidad de Buenos Aires. Es miembro del Sudbury Neutrino Observatory (SNO). Es coautor de libro Física re-Creativa y de los sitios de Internet: www.fisicarecreativa.com y www.cienciaedcreativa.org. sgil@df.uba.ar



Lecturas sugeridas

1. Sitio de Internet de SNO
<http://www.sno.phys.queensu.ca>
2. Sitio de Neutrino Oscillation Industry - Argone Nat. Lab.
<http://neutrinooscillation.org>
3. Solar neutrino puzzle is solved – *Physics World* – IoP July 2001
(<http://physicsweb.org/article/world/14/7/10>)
4. 'Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory'- SNO Collaboration *Phys. Rev. Lett.* 89, (1), 011301 (2002).
5. 'Measurement of Day and Night Neutrino Energy Spectra at SNO and Constraints on Neutrino Mixing Parameters' - SNO Collaboration *Phys. Rev. Lett.* 89, (1), 011302 (2002).