

Modelos solares

Manuel Jenaro Ordóñez Ortiz

Licenciado en física teórica por la Universidad Nacional de Ingeniería / Estudios en la
Universidad de Uppsala, Suecia

Introducción

Los seres humanos se han hecho durante siglos las mismas preguntas: *¿quiénes somos?*, *¿de dónde venimos?*, *¿dónde estamos?*, *¿qué estamos haciendo?* y no estamos seguros de cuál es la verdad. La física es uno de los caminos que seguimos para buscar respuesta a nuestras dudas sobre la condición de existir como seres humanos o como parte excedente de un universo de antimateria a cuyos caprichos estamos sometidos.

Es por ello que aquí la física hace un pequeño alto para dirigir su mirada hacia el Sol y decirnos algo de lo maravilloso de dicha estrella que por más de quince millones de años ilumina nuestro sendero hacia la verdad.

A continuación resumo una serie de resultados experimentales y modelos teóricos en base a un

estudio comparativo sobre el flujo de neutrones que provienen del Sol.

Una de las metas de esta parte de la física moderna es dar a conocer los avances que se están haciendo sobre los orígenes de nuestro astro rey. Como es ya de conocimiento universal, el Sol emite constantemente, entre otras partículas, aquellas conocidas como neutrinos, cuya presencia solar ha permitido un estudio en base a una serie de experimentos tales como el de Sage y Gallex, como los de Kamiokande y los Homestake; así mismo los experimentos recientes tales como el experimento SNO (Subbury Neutrino Observatory), el experimento Borexino, el experimento del Super Kamiokande y el experimento del Iodino.

Todos los estudios experimentales han dado resultados que, en cierto modo, discrepan con los resultados de las predicciones teóricas que se desprenden de los modelos solares estándar.

Una de las principales variables asociadas a la dinámica de los neutrinos es la llamada flujo de neutrinos y la sección eficaz de los neutrinos en los diferentes procesos de interacción con otros cuerpos o sistemas. La discrepancia entre los resultados experimentales y las predicciones teóricas radican principalmente en la medida de estas dos variables.

Los físicos experimentales y los físicos teóricos están haciendo sus mejores esfuerzos para encontrar una solución adecuada al problema de la física de neutrinos provenientes del Sol; es por ello que los físicos experimentales proponen una solución astrofísica, la cual necesita tener un Sol más frío que el Sol de los modelos solares estándar teóricos. Por su parte los físicos teóricos proponen como solución desarrollar una nueva física de los neutrinos.

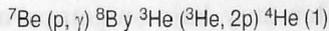
Sin embargo, las discrepancias en la medida del flujo de neutrinos, hecha por físicos experimentales en el experimento de Homestake (1988) o en el experimento de Sage (1992) continúan, dando valores menores que los valores dados por los modelos solares estándar teóricos, como los modelos de BUSSM (Bahcall y Ulrich Solar Standard Model); o el modelo de TSSM (Turckchieze Solar Standard Model). A manera de ilustración en las tablas No. 1 y 2 se muestra la medida del flujo de neutrinos hecha por físicos experimentales y teóricos respectivamente; igualmente, en la figura No. 1 se muestra el espectro para el flujo de neutrinos solares desde el punto de vista de los modelos solares teóricos.

Actualmente se están considerando dos aproximaciones básicas con la finalidad de tratar de explicar las discrepancias entre los resultados experimentales y teóricos en lo que a la medida del flujo solar de neutrinos se refiere.

Una de las aproximaciones es considerar una nueva física de los neutrinos, y la otra aproximación es modificar el modelo solar. En la primera aproximación, es decir, considerar una nueva física de neutrinos, el concepto "mezcla de materia" juega un papel de más importancia y se formula como el modelo MSW (A Yu Smirnov; S.P. Mikheyev, 1985; L. Wolfenstein, 1978). Según este concepto, mezcla de materia, los neutrinos solares (neutrinos electrónicos) V_e se mezclan con otras especies de neutrinos, tales como los neutrinos muónicos (V_μ), o los neutrinos Tau (V_τ), o con los neutrinos estériles creados hipotéticamente. Además ocurre también que los neutrinos solares V_e en su camino hacia el exterior del Sol, al encontrarse con una partícula conocida como resonancias, se mezcla y pierde su condición de neutrino electrónico.

En la segunda aproximación básica, es decir, modificar el modelo solar, el procedimiento más sencillo consiste en modificar los parámetros astrofísicos, de modo que las discrepancias con los resultados experimentales se reduzcan.

En la tabla No. 2 se pueden ver con claridad algunas diferencias en los valores del flujo de neutrinos, entre los modelos BUSSM y el modelo TSSM. Estas diferencias tienen una causal principal motivada por el hecho de que cada modelo considera valores diferentes en la rapidez de ocurrencia para las reacciones tales como:



Como los neutrinos están enmarcados dentro del grupo de las llamadas partículas leptónicas, las cuales se caracterizan por ser susceptibles sólo a interacciones débiles entre ellos y la materia, no es fácil detectarlas, lo que hace aún más difícil la medida del flujo de las corrientes de neutrinos que provienen del Sol.

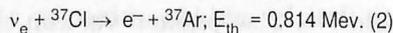
Sin embargo actualmente se están usando dos métodos experimentales para medir el flujo de los neutrinos solares: el método radioquímico y el método dispersivo del proceso de interacción de los neutrinos con los electrones. Sin embargo, una de las dificultades de estos métodos es la necesidad de usar

volúmenes muy grandes de materia que debe ser expuesta para que interactúe con los neutrinos solares incidentes (de 30 - 600 toneladas de materia); y para sólo detectar 0.1 neutrinos / días.

Experimentos sobre los neutrinos solares

En la actualidad hay cinco experimentos relacionados con la medida del flujo de neutrinos que provienen del Sol: Experimento de Kamiokande II y III, relacionados con el proceso dispersivo neutrino electrón; el experimento de Homestake sobre la captura de neutrinos por parte del cloruro; el experimento de Sage, relacionado con la captura del neutrino por parte de gallium; y el experimento de Gallex. Naturalmente que en todo proceso experimental está presente el problema de las calibraciones. En estos experimentos las calibraciones se hacen con ayuda de una fuente radiactiva emisora de partículas beta, como el cromo 51, con una actividad del orden de un megacurie.

En el experimento de Homestake, por ejemplo, se está usando unas 610 toneladas del producto $C_2 Cl_4$ como materia absorbente de neutrinos solares vía la siguiente reacción:



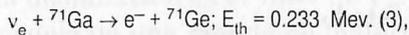
El argón ${}^{37}Ar$ se desintegra luego por captura de un electrón de la capa K, con una vida media de 35 días, y emite un electrón Auger con una energía de 2.82 Kev.

La producción promedio de ${}^{37}Ar$ en este experimento es del orden de 2.28 ó 0.23 SNU (1 SNU = 10^{-36} capturas/átomo tarjeta/seg.); un valor muy bajo en comparación con los resultados dados por los modelos solares estándares.

Algunas veces se llegó a pensar que la presencia de las manchas solares en el Sol tenía influencia sobre la medida en el flujo de neutrinos; sin embargo, algunos experimentos mostraron que tal relación posible entre el flujo de neutrinos y las manchas solares no afectan en casi nada el resultado sobre el flujo de neutrinos. Esto no quiere decir que la teoría de la anticorrelación deba ser acertada o deba ser descartada, todo esto está siempre pendiente de ser confirmado. De todas formas, es muy factible hablar de una relación existente entre el flujo de neutrinos y los campos magnéticos solares, dado que el neutrino posee un momento magnético de Spin que entraría en

resonancia con los campos magnéticos solares, de alguna forma alteraría el flujo de neutrinos; pero la influencia de esta posible correlación es mínima. Entonces, esto hace pensar que en algún lugar donde está un neutrino pueden estar ocurriendo procesos de efectos sistemáticos desconocidos que no pueden ser detectados por los instrumentos usados en los experimentos. La idea es que alguien debe ser el responsable de las discrepancias entre los resultados experimentales y teóricos dados por los modelos solares teóricos estándar.

En nuestro camino, en busca de la fuente posible de “error” o en busca del causante de tales discrepancias, nos encontramos con los dos experimentos de Gallium sobre la captura de neutrinos realizados por Sage y Gallex, los cuales usan la siguiente reacción:



donde del ${}^{71}\text{Ge}$ se desintegra luego con una vida media de 11 días. La única ventaja que nos brindan los experimentos con el galio es que nos permite observar hasta los neutrinos solares que provienen de las reacciones protón – protón (p p). Los valores obtenidos con el experimento de Sage dan un flujo de neutrinos del orden de 58 ó 14 SNU, un rango de error que da mucho que pensar, puesto que dentro de ese margen pueden ocurrir muchos procesos que no son detectados por los instrumentos de medida y que pueden estar afectando las discrepancias entre los resultados teóricos y experimentales en la medida del flujo de neutrinos solares.

Modelos solares

No es tan sencillo tener imaginación científica sobre la estructura del Sol. Hay una gran variedad de modelos científicos que tratan de darnos una explicación adecuada sobre la estructura solar; sin embargo los modelos que actualmente han tomado mucha importancia son aquéllos donde el Sol es considerado como una gran masa de una estrella proto; es decir, como una nube homogénea de hidrógeno y helio con una pequeña mezcla de elementos más pesados, con una edad de 4.6 billones de años y que tiene una luminosidad y un radio.

El Sol se considera con una estructura dividida en dos zonas físicas: la zona interna, caracterizada por ser la zona radiactiva

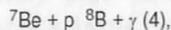
y donde la energía generada en el corazón del Sol es transferida por radiación; y una zona convectiva externa donde la energía es transferida por convección turbulenta. La zona convectiva viene representada por un solo parámetro conocido como "la longitud de mezcla".

Tanto el parámetro "longitud de mezcla" como el parámetro "abundancia de helio", han sido considerados como los parámetros libres por los diseñadores de los modelos teóricos solares estándar, porque son parámetros muy susceptibles de ser reajustados para que las discrepancias entre los resultados experimentales y teóricos en la medida del flujo de neutrinos solares sea la menor posible. Naturalmente que éstos no son los parámetros únicos, también hay otros tales como abundancia de elementos pesados, opacidad radiactiva, los parámetros que caracterizan las reacciones nucleares, la edad del Sol y la ecuación de estado.

En términos generales se puede decir que los modelos teóricos estándar sobre el Sol tienen una gran concordancia en sus resultados con las observaciones astronómicas, como es el caso de las oscilaciones de los modos - p (ondas p). Como también hay algunas discrepancias, como por ejemplo, sobre la cantidad de litio en la superficie solar.

Es de suponer que la gran cantidad de neutrinos que nos visitan provienen en cierto modo de los elementos litio (Li) y del boro (B). Es por ello que muchos experimentos son diseñados para medir el flujo de neutrinos que provienen de dichos elementos.

Entre otros parámetros que intervinieron en la estructura solar están el parámetro que mide la cantidad de producción del B, como un producto de la reacción



donde los neutrinos producidos provienen del boro por desintegración del mismo, también el parámetro que mide la abundancia de elementos pesados (z) en el Sol; también el llamado parámetro de opacidad. Un aumento en el valor de la temperatura T_c en el corazón solar, y, con ello, un aumento en el flujo de neutrinos solares según las formas dadas por las relaciones:

$$\begin{aligned} \phi({}^8\text{B}) &\propto T_c^{18} \\ \phi({}^8\text{B}) &\propto T_c^{18} \quad (5) \end{aligned}$$

Sin embargo, los neutrinos en mayor abundancia solar son los que provienen de la reacción protón – protón y de la reacción PEP protón – electrón – protón, los cuales cubren más del 50% del flujo total de neutrinos, reduciéndose éste al disminuir la temperatura en el corazón nuclear (T_c).

En algunos modelos solares N° estándar, como en el caso del modelo WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) las partículas pesadas pueden transportar la energía nuclear producida en el corazón solar dando lugar a una disminución en la gradiente de la temperatura y una consecuente baja en el valor de T_c .

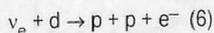
En el modelo solar de los campos magnéticos fuertes, un campo magnético del orden de 10^9 Gauss en el corazón solar da la presión necesaria para sostener al Sol provocando de ésta manera una disminución en el valor de T_c .

En el modelo de una mezcla de materia se considera al Sol como un cuerpo formado por una mezcla de materia a través de un proceso llamado difusión turbulenta, acompañado de otros procesos secundarios de efectos hidrodinámicos. Estos tipos de procesos en la formación del Sol dan lugar a una disminución en la temperatura T_c .

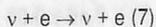
Sin embargo, en los modelos solares estándar teóricos una disminución en la temperatura T_c se consigue disminuyendo los valores de los parámetros Z y el parámetros de opacidad.

Todos los modelos solares, sean teóricos o experimentales, dan un valor de la temperatura T_c en el corazón solar del orden: 1.564×10^7 °K .

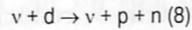
A pesar de todos los esfuerzos que se están haciendo para medir el flujo de neutrinos solares con la mayor exactitud y veracidad, se están preparando nuevos proyectos para ese fin, como el proyecto SNO que utiliza una kilo-tonelada de agua pesada (D_2O) para que interactúe con los neutrinos solares. Este proceso de interacción ocurre vía los siguientes procesos:



proceso motivado por las corrientes de carga;

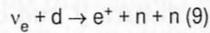


proceso dispersivo elástico, que ocurre vía las corrientes de carga y las corrientes neutras;

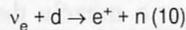


proceso que ocurre motivado solo por las corrientes neutras.

El experimento SNO también puede detectar la existencia de antineutrinos solares a través de la reacción



El experimento de Borexino es también muy sensitivo a los antineutrinos solares lo cual permite detectar los positrones vía la reacción.



A pesar de todos los avances por saber la verdad sobre nuestro astro rey, aún quedan muchas dudas por resolver y esperamos que el futuro nos diga la verdad.

Tabla N° 1
Datos experimentales sobre corrientes de neutrinos

Detector	Homestake	Kamiokande	Gallium Exp.
Material	C ₂ Cl ₄	H ₂ O	Ga Cl ₃ - HCl
Cantidad de masa	610 ton.	680 ton.	30 ton. Ga
Reacción	³⁷ Cl (ν _e , e ⁻) ³⁷ Ar	ν - e, disper.	⁷¹ Ga (ν _e , e ⁻) ⁷¹ Ge
umbral	ν _e , solamente 0.814 Mev	ν _e , ν _μ , ν _τ , ν 7.5 Mev	ν _e , solamente 0.233 Mev
tipo	radioquímico integ. temporal integ. energía	conteo tiempo real espectroscop.	radioquímico integ. temporal integ. energía
predicción			
BUSSM	7.9 ± 2.6 SNU	1.0 ± 0.37	132 SNU
predicción			
TSSM	6.4 ± 1.3 SNU	1.0 ± 0.37	125 ± 5 SNU
N° de eventos	0.5/día	0.3/día	0.3/día
Flujo observado	2.28 ± 0.23 SNU	0.46 ± 0.05	83 ± 19 SNU

Tabla N° 2
Flujo de neutrinos solares: BUSSM y TSSM

Fuente neutrino	predicciones BUSSM		
	^{37}Cl exp. (SNU)	^{71}Ga (SNU)	Kamiokande (BUSSM)
p p	0 (0)	70.8 (70.6)	0 (0)
p e p	0.2 (0.8)	3.0 (2.8)	0 (0)
^7Be	1.1 (1.0)	34.4 (30.6)	0 (0)
^8B	6.1 (4.6)	14.0 (9.3)	1.0 (0.75)
^{13}N	0.1 (0.1)	3.8 (3.9)	0 (0)
^{15}O	0.3 (0.4)	6.0 (6.5)	0 (0)
Total	7.9 (6.4)	132.0 (125)	1.0 (0.75)

Fuente: Revista especializada "Centro Internacional de Física Teórica" Trieste - Italia.

Figura 1

