

26a

# CONVENCIÓN DE ASTRONOMÍA



**SABADELL**  
14, 15, 16 MARZO  
**2025**

*Más allá de la observación, promoviendo la colaboración PRO-AM*

## Observar el interior de las estrellas

Juan Fabregat



La charla que vamos a ver hoy habla de un par de técnicas relativamente modernas para observar lo que hay dentro del Sol y de las estrellas. ¿Cómo podemos observar qué hay dentro de las estrellas?

Para ilustrar el problema, empiezo con una fotografía familiar para todos. Esto es una fotografía del Sol, como lo vemos cuando lo fotografiamos con luz visible. Lo que vemos es lo que coloquialmente se llama la superficie del Sol. Pero, claro, sabemos que el Sol es una esfera de gas, una bola de gas, y no tiene superficie. Entonces, ¿por qué cuando lo observamos parece que estemos viendo una superficie? Eso se debe a que lo que estamos

viendo es una región que se llama fotosfera, que es la zona desde donde la luz, producida por el calor del Sol, escapa.

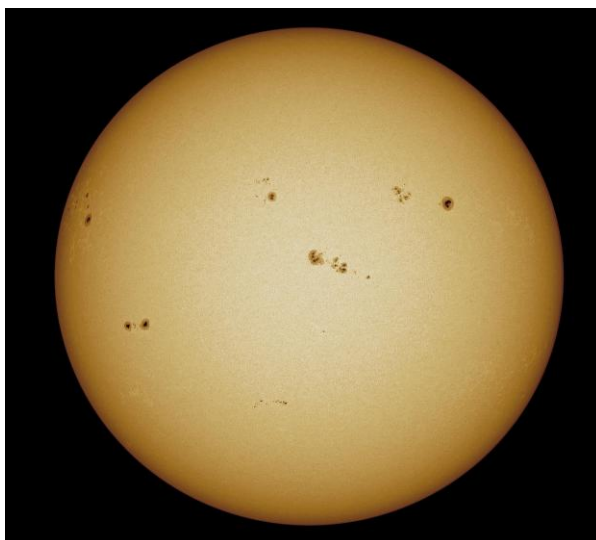


*Imagen del Sol en luz visible*

En el interior del Sol, la materia está en un estado que se llama estado de plasma. Nosotros conocemos los tres estados clásicos de la materia en la Tierra: sólido, líquido y gaseoso. En particular, el Sol es una esfera de gas. Sin embargo, sabemos que, al menos en el rango visible, los gases son transparentes, pero el Sol no lo es. ¿Por qué? Porque en el interior del Sol la materia está en un cuarto estado, el estado de plasma. Este estado se alcanza cuando un gas se calienta a temperaturas de miles de grados o más.

Los átomos del gas se rompen por colisiones. Cuando la temperatura de un gas sube mucho, los átomos y las moléculas empiezan a agitarse cada vez más deprisa y, cuando se agitan demasiado rápido, tienen mucha energía cinética. Llega un momento en que los átomos se rompen por colisiones al chocar unos con otros. En lugar de tener un gas atómico, como el que hay en esta sala, que es transparente, tenemos un gas formado por partículas cargadas.

Los átomos se han roto, y entonces tenemos núcleos atómicos desnudos, desprovistos de los electrones, que tienen carga positiva. Tenemos protones, electrones, es decir, partículas cargadas. En el interior de un gas formado por partículas cargadas, la luz no viaja. La luz, los fotones, es una partícula más que choca con todas las demás. En este gas de núcleos atómicos, protones, electrones y fotones, todos ellos colisionan e interactúan, lo que impide que la luz viaje por el interior del Sol. La luz que se produce dentro del Sol, en el rango de los rayos gamma, no escapa.

¿Qué ocurre cuando nos acercamos a las partes más externas del Sol? Hay una región de transición en la que, a medida que nos alejamos del interior, la temperatura disminuye. En esta región, la temperatura es lo bastante baja como para que los átomos se unan nuevamente.

En el interior del Sol, un núcleo puede captar un electrón y formar un átomo, pero este átomo es destruido inmediatamente en la siguiente colisión. Por eso, en el interior del Sol, la luz no viaja. Cuando llegamos a una zona donde la temperatura ha bajado lo suficiente para que los átomos no se rompan, la materia se vuelve transparente. En esta zona, el gas es atómico y normal. Ahí la luz viaja, y lo que vemos es la fotosfera del Sol. Es la región de transición donde la materia pasa del estado de plasma, en el cual la luz no viaja, al estado gaseoso.

Esto representa un problema. Si la luz que se produce en el interior del Sol no viaja, no podemos ver lo que hay dentro del Sol utilizando técnicas convencionales basadas en la observación de la luz. Durante casi toda su historia, la astronomía ha dependido del análisis de la luz y la radiación de los astros.

Si del interior del Sol no sale luz, no podemos ver lo que hay dentro. Arthur Eddington ya se lamentaba de esto en su libro clásico de astrofísica, "La Constitución Interna de las Estrellas", publicado en 1926. Eddington afirmaba que el interior del Sol y las estrellas parecía ser menos accesible para la investigación científica que cualquier otra región del universo. Podemos observar galaxias en los confines del cosmos, pero no podemos ver el interior del Sol, que está tan cerca.

En su libro, Eddington estudió la estructura interna del Sol basándose únicamente en argumentos teóricos. Aplicando las leyes de la física, como el equilibrio hidrostático, el equilibrio termodinámico, el transporte de calor y la continuidad de la materia, estableció un modelo de la estructura solar. Aunque su modelo ha sido refinado con el tiempo, su propuesta fue acertada. Sin embargo, la teoría, aunque útil, no nos permite ver directamente el interior del Sol.

En el mismo libro, Eddington se pregunta por la fuente de energía del Sol, un tema de discusión en la época. Hoy sabemos que el Sol funciona mediante energía nuclear, a través de reacciones nucleares. Pero en aquel entonces no se tenía certeza sobre estos procesos.

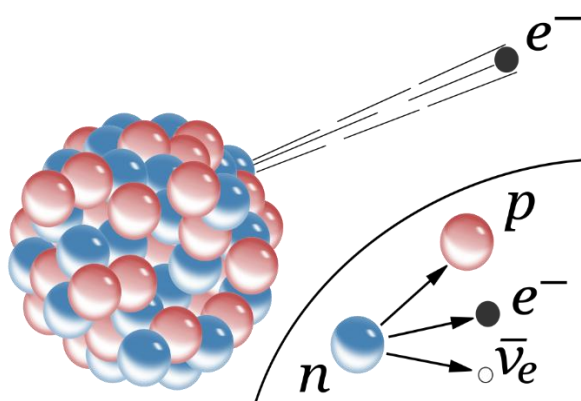
A finales del siglo XIX y principios del XX, se barajaban varias hipótesis sobre el origen del brillo solar. Algunas de ellas, vistas hoy, parecen ingenuas. Se llegó a pensar que el Sol se mantenía caliente debido a la caída continua de cometas y meteoritos sobre su superficie, cuya energía cinética se transformaba en calor. Sin embargo, al hacer cálculos, los números no cuadraban.

La hipótesis más aceptada a finales del siglo XIX y principios del XX era que el Sol se mantenía caliente por contracción gravitatoria, como ocurre con las protoestrellas. Al contraerse, la pérdida de energía potencial gravitatoria se convertía en energía térmica, manteniendo la temperatura de la fotosfera en 5.700 grados. Sin embargo, cuando Helmholtz y Lord Kelvin hicieron cálculos, concluyeron que el tiempo de contracción del Sol desde el tamaño de la nube primigenia hasta su estado actual era de unos 20 millones de años. Esto era inaceptable, pues los avances en geología y paleontología indicaban que la Tierra tenía más de 1.000 millones de años.

Eddington, en su libro, descartó la contracción gravitatoria como fuente de energía solar y propuso otras posibilidades. Una de ellas fue la radiactividad, un fenómeno ya conocido en la época. Sin embargo, al hacer cálculos, se vio que ni siquiera si el núcleo del Sol estuviera compuesto totalmente de uranio o radio, la emisión radioactiva sería suficiente para sostener su brillo durante miles de millones de años.

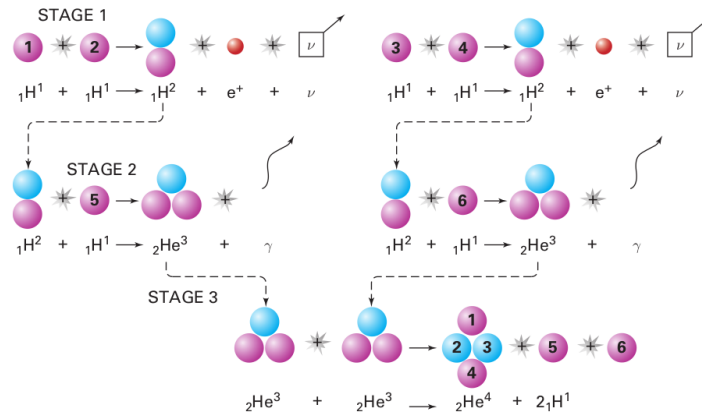
Finalmente, se planteó que la energía del Sol podría provenir de la fusión de elementos más simples en elementos más complejos, lo que hoy conocemos como fusión nuclear. Eddington dedujo que cuatro núcleos de hidrógeno podían fusionarse en uno de helio, perdiendo una pequeña fracción de masa que se convertiría en energía según la ecuación de Einstein,  $E=mc^2$ .

La radiactividad también trajo consigo otro problema: la desintegración beta. Se observó que los electrones emitidos no siempre tenían la misma energía, lo que parecía violar el principio de conservación de la energía. Wolfgang Pauli propuso la existencia de una partícula desconocida que acompañaba al electrón en la desintegración: el neutrino. Este neutrino, sin carga y casi sin masa, fue detectado por primera vez en la década de 1950, confirmando la hipótesis de Pauli.



*Desintegración beta*

En el interior del Sol, la fusión nuclear ocurre en una serie de reacciones en cadena. Un protón se une a otro para formar deuterio, emitiendo un positrón y un neutrino. Luego, este deuterio se fusiona con otro protón para formar helio-3. Finalmente, dos núcleos de helio-3 se combinan en helio-4, liberando protones en el proceso. Este es el mecanismo que mantiene al Sol brillando durante miles de millones de años.



### *Cadena de reacciones nucleares del Sol*

Algunos científicos, motivados por Fowler y Bacall, entre otros, estudiaron el ritmo de producción de energía en el interior del Sol y concluyeron que el flujo de neutrinos emitidos por el Sol podía ser observado en la Tierra. Es importante destacar que el neutrino es una partícula que apenas interacciona con la materia. Los neutrinos generados en el interior del Sol, donde ocurren las reacciones nucleares, atraviesan el Sol sin dificultad. La mayoría llegan a la Tierra y la atraviesan sin ningún efecto perceptible. Cada segundo, miles de neutrinos nos atraviesan sin causar ningún impacto.

Los cálculos realizados indicaban que el flujo de neutrinos del interior del Sol debía ser observable desde la Tierra. Por ello, se inició la construcción del primer telescopio de neutrinos. Un telescopio de neutrinos debe contar con un detector de gran masa, ya que la interacción del neutrino con la materia es extremadamente improbable. Para aumentar la posibilidad de detección, se requiere una cantidad enorme de materia.

El primer detector consistió en un tanque lleno de cloro, con la expectativa de que una reacción entre los neutrinos y el cloro produjera átomos de argón, que luego serían contados. Estos telescopios de neutrinos se instalan en minas profundas para evitar interferencias de los rayos cósmicos, que podrían generar señales no deseadas y contaminar los datos obtenidos.



*Primer detector de neutrinos*

Este telescopio comenzó a detectar neutrinos solares, pero lo hacía a un ritmo muy bajo: aproximadamente un neutrino cada dos días. Esto demuestra lo difícil que es lograr que un

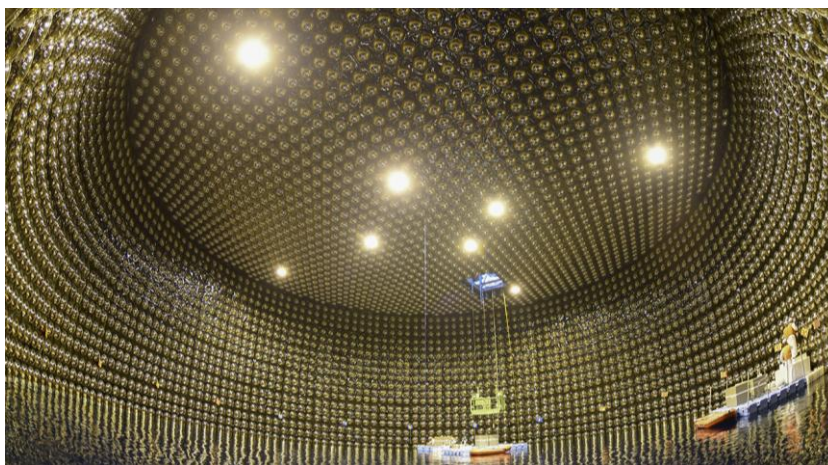
neutrino interaccione con la materia. Sin embargo, al analizar los datos, se descubrió que el flujo de neutrinos detectado era solo un tercio de lo esperado.

Este problema, conocido como el "problema de los neutrinos solares", fue uno de los grandes enigmas de la astrofísica durante tres décadas. Se debatía si el problema radicaba en el modelo solar o en el desconocimiento de las propiedades de los neutrinos. La comunidad científica, dividida entre astrofísicos y físicos de partículas, tardó muchos años en llegar a una conclusión.

Finalmente, se determinó que el problema no estaba en el Sol, sino en los neutrinos. Se descubrió que existen distintos tipos de neutrinos: el neutrino electrónico, el neutrino muónico y el neutrino tauónico. Los telescopios de neutrinos solo detectaban los neutrinos electrónicos, pero en su viaje por el espacio, algunos de estos neutrinos cambiaban de tipo, un fenómeno conocido como "oscilación de neutrinos". Este hallazgo resolvió el enigma y confirmó que el flujo de neutrinos detectado era el correcto.

Este descubrimiento también implicó que los neutrinos tienen masa, ya que la oscilación de neutrinos solo es posible si poseen una masa, aunque extremadamente pequeña.

La astrofísica de neutrinos ha avanzado significativamente desde entonces. Después de los primeros detectores se construyó el detector Superkamiokande, en Japón. No es más que un gran tanque de agua líquida con una gran cantidad de fotomultiplicadores de luz en sus paredes. La idea es que, cuando un neutrino choca contra un electrón, lo acelera y se mueve más rápido que la luz en el agua. Esto produce un destello de luz por efecto Cherenkov, y esta luz podemos detectarla y ampliarla.



*Superkamiokande*

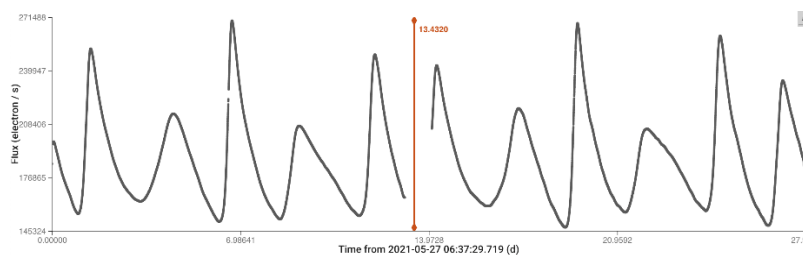
Actualmente, existen grandes telescopios de neutrinos como el KM3Net, que utiliza un kilómetro cúbico de agua de mar como detector, y el IceCube en la Antártida, que emplea un kilómetro cúbico de hielo. Estos instrumentos han permitido detectar neutrinos provenientes de otras partes del universo, aunque en muchos casos su origen es incierto.

La observación de neutrinos solares es una técnica única para estudiar el interior del Sol, ya que otros métodos no permiten una observación directa. Sin embargo, el flujo de neutrinos de otras estrellas es demasiado bajo para ser detectado con los instrumentos actuales.

Otra técnica utilizada para estudiar el interior de las estrellas es la astrosismología, que aplica los principios de la sismología terrestre al estudio de las estrellas. Algunas estrellas presentan pulsaciones periódicas, expandiéndose y contrayéndose de manera regular.

Las estrellas variables cefeidas son un ejemplo bien conocido de este fenómeno. En estas estrellas, el brillo varía de forma periódica debido a cambios en su tamaño y temperatura. Curiosamente, el momento de mayor brillo coincide con la fase en la que la estrella es más pequeña, ya que la temperatura más alta provoca una mayor emisión de luz.

Desde mediados del siglo pasado, se ha descubierto que algunas cefeidas tienen dos períodos de pulsación en lugar de uno. Este comportamiento se explica mediante la teoría de las oscilaciones.



*Cefeida con período doble*

Un ejemplo análogo es el de una cuerda vibrante, como la de una guitarra. La cuerda puede vibrar en su modo fundamental, donde toda la cuerda se mueve en la misma dirección, o en modos superiores, donde diferentes partes de la cuerda vibran de manera opuesta con nodos intermedios.

En las estrellas, la situación es más compleja, ya que la temperatura varía con la profundidad, afectando la velocidad del sonido y, por lo tanto, los modos de pulsación. En las cefeidas, la relación entre los períodos de pulsación de diferentes modos no es la misma que en una cuerda vibrante, sino que refleja la estructura térmica interna de la estrella.

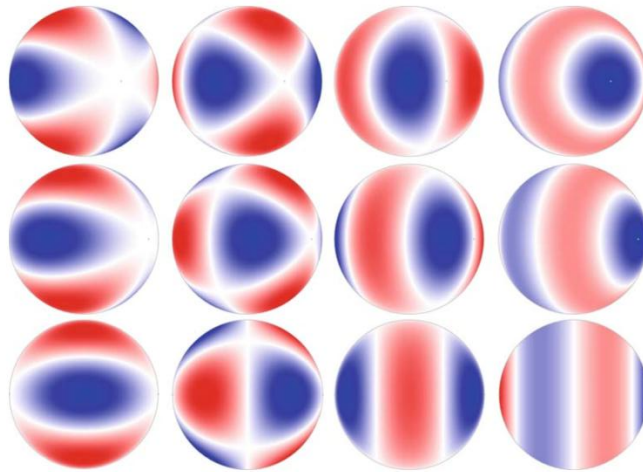
Comparando las cefeidas con otras estrellas pulsantes, como las de tipo Delta Scuti, se ha encontrado que las diferencias en la relación entre sus períodos de oscilación proporcionan información sobre la distribución de la temperatura en su interior.

Además de estas pulsaciones radiales, tenemos pulsaciones no radiales, que serían como lo que ocurre en la superficie de un tambor: mientras una parte sube, otra baja, y así sucesivamente. O en este otro modo, en el que mientras dos partes suben, otras dos bajan. Estos modos no radiales también se dan en estrellas.

En el caso de las cefeidas, veíamos que pulsan de forma radial, independientemente de que tengan uno o dos períodos. Sin embargo, aquí no ocurre lo mismo, ya que estas son pulsaciones no radiales: una parte sale mientras otra entra, y este patrón va cambiando constantemente. Esto nos permite estudiar mejor su estructura.

Aquí tenemos un ejemplo del Sol con algunos de los modos que presenta. Se pueden observar estructuras muy complejas, lo que nos indica cómo se mueve su superficie. Las zonas en azul estarían descendiendo, mientras que las zonas en rojo estarían ascendiendo. Con el tiempo, este patrón se invierte y vuelve a repetirse.

Además de estos modos no radiales observados en la superficie, el Sol también presenta modos radiales. Si analizamos su interior en sentido radial, encontramos nodos en los que la materia no se mueve, mientras que hay zonas ascendentes y descendentes.



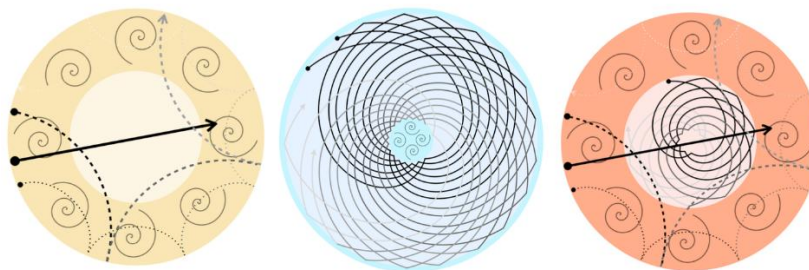
*Diferentes vibraciones de la superficie del Sol*

Todo esto nos permite estudiar la composición y la estructura de temperaturas internas de las estrellas. En el caso de las estrellas de tipo solar, estas se diferencian de otros tipos de estrellas porque en sus capas más externas el calor se transporta de forma convectiva. La materia caliente asciende aportando calor, llega a la superficie, se enfría, desciende y el ciclo se repite. A medida que nos adentramos en la estrella, si se produce una oscilación, esta se propaga hacia el interior.

Cuando la onda de presión se desplaza hacia el interior, la temperatura aumenta y, con ello, la velocidad del sonido en esa región. Dado que la velocidad del sonido no es la misma en diferentes capas, la onda de presión se refracta.

Este fenómeno es similar a la refracción de la luz en una lente o un prisma. En el caso de la luz, esta cambia de dirección porque su velocidad en el aire es diferente a la que tiene en el cristal. De la misma manera, en las ondas de presión dentro de una estrella, cuando la onda viaja hacia el interior y la velocidad del sonido cambia, la onda se refracta hasta volver a salir a la superficie. Allí se refleja, regresa al interior, se refracta y vuelve a emerger.

La frecuencia de la pulsación nos indica el tiempo que la onda tarda en recorrer todo su ciclo. Esta frecuencia depende de cómo varía la velocidad del sonido a lo largo de su trayectoria. Es decir, el tiempo que tarda el sonido en ir de un punto a otro determina la frecuencia que observamos en la fotometría.



*Velocidad y refracción de las ondas en el interior de una estrella*

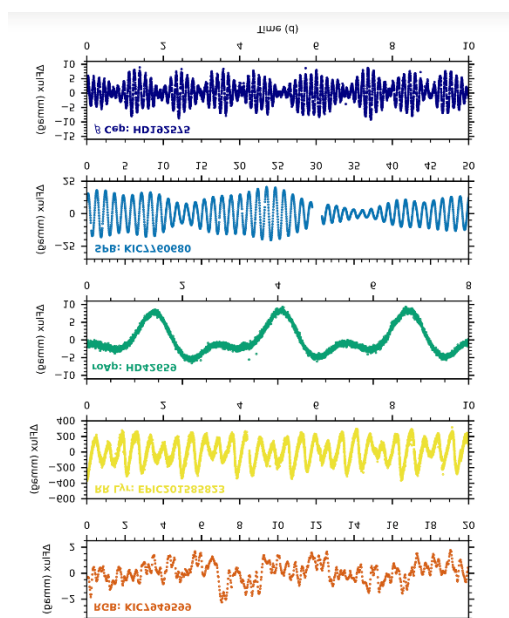
Gracias a esto, podemos trazar el perfil de temperaturas en el interior de las estrellas. Diferentes frecuencias permiten estudiar distintas profundidades. Analizando un amplio espectro de frecuencias, se puede construir un perfil detallado de temperaturas del interior estelar.

En el caso del Sol, estas pulsaciones han sido estudiadas durante muchos años con gran precisión, lo que ha permitido conocer su estructura interna no solo mediante modelos teóricos, sino a partir de mediciones directas. Se ha logrado determinar el perfil de temperaturas en un 90 % de la profundidad solar con precisiones menores al 1 %.

Hoy en día, este tipo de análisis se puede realizar en muchas otras estrellas gracias a la fotometría espacial. Las imágenes obtenidas por la misión Kepler han sido clave para estos estudios. Kepler, conocido por su éxito en la detección de exoplanetas, ha proporcionado datos valiosos para la sismología estelar.

Las técnicas utilizadas para estudiar exoplanetas y estrellas variables son similares, ya que en ambos casos se necesitan series fotométricas de alta precisión y larga duración. En los exoplanetas, estos datos permiten detectar tránsitos, mientras que en las estrellas ayudan a analizar sus variaciones.

En algunas estrellas, se observa un patrón característico en el que la amplitud de la pulsación aumenta y disminuye. Esto se debe a la interferencia entre dos frecuencias muy similares: cuando la interferencia es constructiva, la amplitud crece, y cuando es destructiva, disminuye.



*Distintas frecuencias de oscilación*

Estos estudios, llevados a cabo con observatorios espaciales, permiten analizar la estructura interna de estrellas variables de diferentes tipos.



L'ASTRONÒMICA  
DE SABADELL