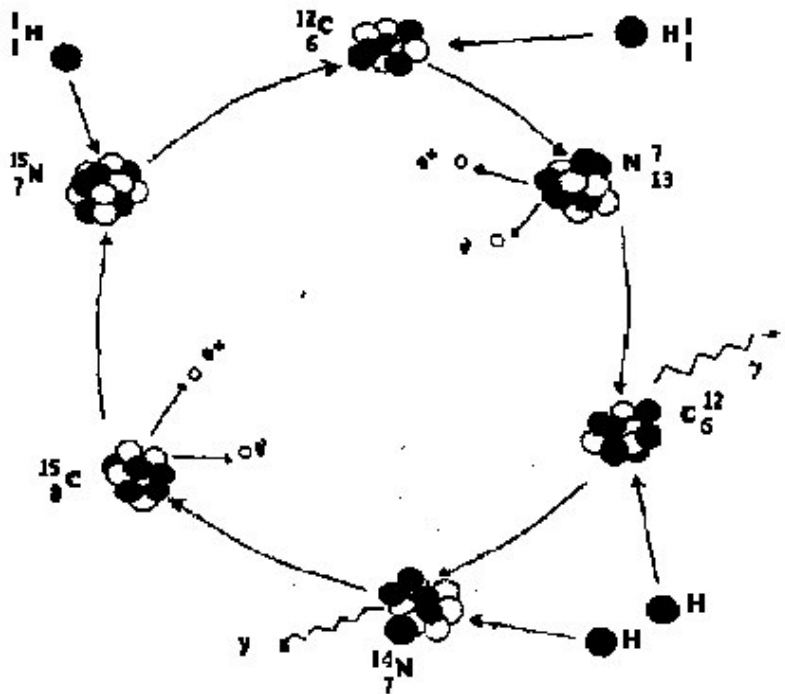


# LAS ESTRELLAS

## 2g.4 ) Origen de la energía Estelar Parte III

*“La mecánica cuántica es la descripción del comportamiento de la materia y de la luz en todos sus detalles, y en particular, de todo aquello que tiene lugar a escala atómica. A muy pequeña escala, las cosas **NO** se comportan en absoluto como aquéllas de las cuales tenemos una experiencia directa. No se comportan como ondas, **no** se comportan como partículas, como nubes ni como bolas de billar, ni como un peso sobre una cuerda, **ni como nada que se haya visto jamás**”*  
(Richard Feynman)

El **ciclo del carbono** fue descubierto simultánea e independientemente, por dos físicos: Hans Bethe y Carl Von Weizsäcker ambos de origen alemán. El proceso es bastante complejo, y parte de la suposición de que en el Sol además de hidrógeno, existen, aunque sean, pequeñas cantidades de otros elementos, por ejemplo el carbono.



1. Se inicia el ciclo con el choque y fusión de un núcleo de hidrógeno con uno de carbono (de masa atómica 12 y 6 unidades de carga), lo que da lugar a un nuevo núcleo atómico ahora de masa atómica 13 y 7 unidades de carga eléctrica, (isótopo radiactivo del nitrógeno. En esa primera reacción hay desprendimiento de energía en forma de rayos gamma, el extremo más energético del espectro.
2. Al cabo de poco tiempo el núcleo de nitrógeno radiactivo expulsa dos partículas: un positrón, (electrón de carga positiva), y un neutrino (partícula sin carga ni masa pero con spin). El núcleo ahora se ha transformado nuevamente en carbono, pero de masa atómica 13, es un isótopo del carbono, que si recibe el impacto de otro átomo de hidrógeno, se fusionarán formando de nuevo nitrógeno, pero ahora de masa 14 y carga 7, liberando energía en forma de rayos gamma. Sin olvidar que el positrón es una muestra de antimateria, que se aniquilará en forma instantánea transformándose también en rayos gamma.
3. Este átomo de nitrógeno se fusionará con otro átomo de hidrógeno, formando un isótopo del oxígeno, ( de masa 15 y carga 8) y liberando energía, nuevamente en forma de rayos gamma. Pero este isótopo del oxígeno es radiactivo, por lo que al cabo de un breve tiempo emitirá un positrón y un neutrino, y se transformará de nuevo en nitrógeno, pero un isótopo de masa 15 del nitrógeno. Cuando hablamos de masa aquí nos referimos al peso atómico.
4. Terminando el proceso este isótopo del nitrógeno se fusionará con otro núcleo de hidrógeno, dando como producto final un nuevo núcleo de carbono y un núcleo de helio.

**En resumen diremos que 4 núcleos de hidrógeno se fueron fusionando sucesivamente con el primitivo núcleo de carbono, y al cabo de varias transformaciones, el carbono reaparece junto a un núcleo de helio. El carbono ha actuado entonces como un catalizador, propiciando la fusión del hidrógeno, pero conservándose intacto al final de todo el ciclo, con una ligera pérdida de materia que se transformó en energía.**

## El Ciclo Protón-Protón

En la búsqueda de un proceso similar y casi al tiempo que Bethe y Von Weizsäcker elaboraban la complicada serie de transformaciones atómicas que acabamos de conocer como **Ciclo del Carbono**, Bethe inspiró a Charles Critchfield a investigar en otra línea de pensamiento. Sería lo que luego reconoceríamos como cadena, ciclo o reacción protón-protón y que veremos a continuación.

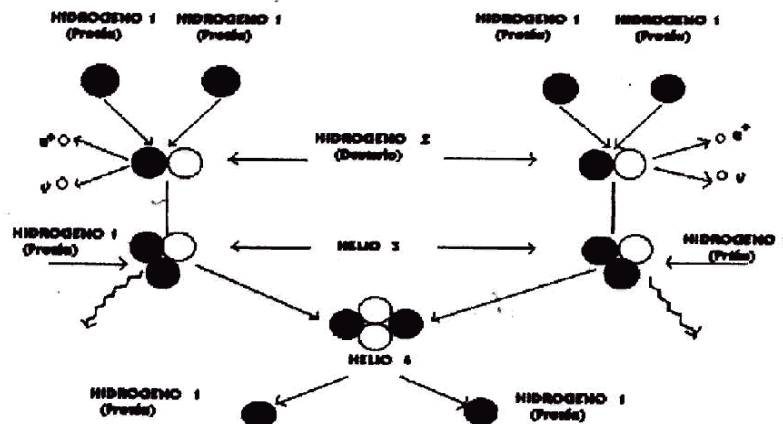
Los protones pueden fusionarse entre sí sin necesidad del catalizador del carbono en la otra reacción. Critchfield calculó que para eso hacen falta determinadas condiciones de temperatura, y, aunque esa reacción es menos probable que otras, es posible. Entonces la fusión directa del hidrógeno pasó a ser otra posibilidad de transformación de materia en energía a ser tomada en cuenta.

**La reacción inicia** con el choque y fusión de dos núcleos de hidrógeno, protones, dando lugar a un núcleo de un isótopo pesado del hidrógeno, llamado deuterio, cuyo peso atómico es 2, y además se emite un positrón y un neutrino.

¿Cuál es la razón de la emisión del positrón?

Sencillamente conservar la carga que existe en el protón generando un neutrón, partícula similar al protón, pero sin carga eléctrica, es decir posee Fuerza de Atracción Nuclear pero no repulsión electromagnética. La emisión del neutrino permite que el protón al perder la carga eléctrica adquiera el spin del neutrón que conformará el átomo de deuterio.

En una **segunda etapa**, el núcleo de deuterio choca y se fusiona con otro núcleo de hidrógeno, y da lugar a la formación de un núcleo de un isótopo del helio,



de masa 3, y se emite rayos gamma.

Dado que éste es un elemento muy inestable en estas condiciones, **la próxima etapa sucede prácticamente en tiempos infinitesimales.**

**En una última etapa**, dos núcleos de ese isótopo del helio se fusionan y producen un núcleo de helio (común) y dejan libres dos núcleos de hidrógeno.

Esta reacción, notoriamente más simple que la del carbono, es fuente también de una importante liberación de energía. Parece ser que en las estrellas de menor masa, y por tanto menor temperatura nuclear, la reacción protón-protón es más probable que el ciclo del carbono; en cambio en las estrellas más calientes, la reacción que predomina es la del carbono.

Pero, ¿cuánta energía se libera en estas reacciones? No es difícil hacer el cálculo; por lo menos en forma aproximada:

El núcleo del hidrógeno (común), es decir el protón, tiene una masa atómica que equivale a 1,0076. Por lo tanto si sumamos la masa de 4 núcleos de hidrógeno tendremos: 4,03. Pero el núcleo de helio tiene una masa de 4,0026. Por lo tanto, si el hidrógeno se transformó en helio, se perdió algo de masa: la diferencia entre

$$4,03 - 4,0026 = 0,0274 \text{ U.A.M.}$$

Esta masa se transformó en rayos gamma, y en la energía cinética llevada por los positrones y los neutrinos desprendidos durante las reacciones nucleares que hemos visto. Pero ¿cuánto vale esa energía?

Si volvemos a la ecuación de Einstein de equivalencia entre masa y energía:

$E = m \cdot c^2$  donde la energía **E** se expresa en ergios, la masa **m** en gramos y la velocidad de la luz **c** en centímetros por segundo. Como está impreso en todos los libros de texto simples de física del mundo, digamos que si transformamos 1 gramo de hidrógeno en uno de helio, (menos la diferencia de masas, que será de 0.007 gramos), se libera una energía de aproximadamente 750.000 kilovatios/hora.

En el Sol cada segundo se convierten 640 millones de toneladas de hidrógeno en 636 toneladas de helio, y 4 millones de toneladas de materia se convierten en energía radiante.

Entonces al fin sabemos que y como se produce la energía en el Sol. Pero la zona donde ésta se produce, es el núcleo solar, de aproximadamente la décima parte del radio solar, y donde se concentra alrededor del 10% de la masa total del Sol. Allí la temperatura es de unos 15 millones de grados, la densidad llega a  $150 \text{ gr/cm}^3$ , y la presión es de uno 130.000 millones de atmósferas.

La materia se encuentra allí en estado de **plasma** con ionización total de sus átomos. En estas condiciones extremas los protones chocan entre sí, y debido al efecto túnel, se fusionan, liberando energía y produciendo helio como subproducto.

La energía liberada en el núcleo debe salir al exterior atravesando un enorme manto de gases (hidrógeno y helio principalmente) que van a transmitir la energía hasta la fotosfera, donde será irradiada al espacio exterior. **Tal y como lo vimos en la estructura interna de las estrellas en módulos anteriores.**

Si ampliamos ahora algún concepto brevemente veremos que el proceso de conducción radiante es sumamente lento. Cada fotón gamma es absorbido por un núcleo el cual lo reemite no como un único fotón sino como dos o más fotones entre los que se reparte la energía, de modo que cada uno de ellos va a tener mayor longitud de onda, (y por tanto menos energía), que el fotón original. Estos fotones secundarios saldrán dispersos en todas direcciones, y cada uno será a su vez absorbido por otro núcleo, que volverá a reemitirlo y así sucesivamente. Este proceso hace que la radiación gamma generada en el núcleo solar tarde varios millones de años en llegar a la fotosfera; y cuando llega, ya no es radiación gamma, sino que sus fotones se han ido transformando en muchísimos fotones de menor energía. Gracias a esto de la fotosfera salen radiaciones de longitudes de onda moderadamente más larga: ultravioleta, luz visible, infrarrojos.

Por tanto las radiaciones gamma y los rayos X que nos llegan provenientes del Sol, tienen su origen principalmente en las fulguraciones, (enormes explosiones que se producen en zonas activas de la superficie solar de forma ocasional).

### **El equilibrio que “hace” a la estrella**

Si constantemente la estrella es una congregación de millones de explosiones atómicas en su núcleo, ¿por qué no vuela en pedazos?

Existe siempre en una estrella un equilibrio entre la gravedad y las otras fuerzas con una sola excepción.

En la secuencia principal y los estadios de gigante y supergigantes rojas existe un equilibrio entre la gravedad que contrae la estrella hacia el centro y la presión de la radiación que empuja los gases hacia fuera. Esta resultante, con variaciones, y a veces con desastrosos resultados como veremos en el próximo módulo es siempre válida.

A veces se termina el “combustible” y la estrella se mantiene en equilibrio sobre las capas de electrones en las enanas blancas o sobre el contacto de sus mismos neutrones en los pulsares o estrellas de neutrones. Pero casi siempre hay equilibrio.

Sin embargo el equilibrio es roto cuando hablamos de un agujero negro, el subproducto masivo de una explosión de supernova que excede el límite de masas solares.

### **La nucleosíntesis de elementos pesados en las estrellas**

Volveremos a explicar mejor este punto cuando veamos la evolución estelar de estrellas de gran masa, ahora a modo de resumen veamos:

Las estrellas generan su energía por el proceso de fusión atómica. Núcleos de elementos ligeros como el hidrógeno se fusionan para formar otros más masivos como el helio, liberándose en este proceso gran cantidad de energía, ya sea por el método de protón-protón, (cuando las temperaturas son menores), o por el ciclo del carbono, (cuando las temperaturas son mayores).

Incluso cuando la teoría prevé que a temperaturas mucho más altas, el propio helio puede fusionarse consigo mismo dando lugar a elementos más masivos como el carbono, el oxígeno siguiendo hasta llegar al hierro, (donde el proceso deja de producir energía para consumirla, y debemos recordar que si esto sucede la fuerza de atracción gravitatoria está allí como una amenaza constante). Obviamente existen elementos más pesados que el Hierro, obviamente los mecanismos que estudiamos en el núcleo de las estrellas que hemos investigado no pueden explicar ni sostener el proceso sin consecuencias.

Esto nos lleva directamente a nuestro siguiente tema.

### **La evolución estelar.**