

LAS REACCIONES NUCLEARES DE PRODUCCION DE LA ENERGIA SOLAR

Por Walter Sorge Z.
Prof. Asociado - Depto. de Física
Universidad Nacional de Colombia
Medellín

Jaime A. Karles G.
Prof. Asociado - Depto. de Física
Universidad Nacional de Colombia
Medellín

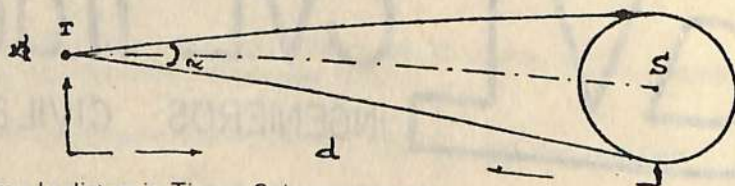
RESUMEN

A partir de la constitución del sol como resultado de análisis de los datos espectroscópicos, se examinan los diferentes procesos que podría originar la energía emitida por el Sol, mostrando cómo solamente es posible que dicha energía provenga de un proceso nuclear.

Se reseñan entonces brevemente las propiedades del núcleo para fundamentar las reacciones termonucleares (cadena protón-protón y ciclo C-N) que han sido postuladas para dar cuenta de la energía emitida por el Sol y las demás estrellas.

a. MAGNITUDES FISICAS DEL SOL

El tamaño del Sol se determina a partir del ángulo visual bajo el cual lo ve el observador y la distancia del observador al Sol.



Como la distancia Tierra-Sol varía con el tiempo, es necesario considerar para d un valor promedio $d \cong 150.10^6$ Km y como ángulo visual promedio resulta ser $\alpha = 31' 59''.26$ se tiene para el diámetro del Sol el valor $D = 1.393.10^6$ Km.

La Ley de Gravitación de NEWTON nos permite calcular la masa del Sol a partir de la masa de la Tierra y de la distancia Tierra-Sol; resulta así que la masa del Sol es:

$$M_s \cong 2.10^{30} \text{ Kg} \cong 3.310^5 M_t$$

Siendo M_t la masa de la Tierra.

La densidad de la materia solar (1.4 relativa al agua) sugiere que ella no puede encontrarse en un estado sólido, sino más bien gaseoso.

La temperatura superficial del Sol se estima sea de 6.000°K , mientras que en el interior la temperatura sería de $20.000.000^{\circ}\text{K}$.

Los últimos resultados experimentales indican que la energía incidente sobre la superficie terrestre es aproximadamente 1.94 cal/min por cada cm^2 de superficie perpendicular a los rayos solares, lo cual indica que la energía total radiada por el Sol sea:

$$E_{\text{tot}} = 5485.10^{24} \text{ cal/min.}$$

b. PRODUCCION DE LA ENERGIA SOLAR

HELMHOLTZ fue el primero en plantear hipótesis sobre la probable fuente de energía que el Sol derrama en el espacio.

Según este científico, la energía podría obtenerse de la combustión del carbón; en este caso, calor y luz se liberan a expensas de la energía química que mantiene unidos a los átomos, puesto que el anhídrido carbónico que se forma en la combinación de carbón y oxígeno necesita, para mantener unidas a sus moléculas, una cantidad de energía química menor que la requerida por carbón y oxígeno antes de combinarse.

El exceso de energía que ya no se emplea para los enlaces químicos sería entonces emitido.

Conociendo la cantidad de energía que puede obtenerse de un volumen dado de carbón y oxígeno, es posible calcular el tiempo durante el cual el Sol puede proporcionar energía (a la velocidad actual) en el supuesto caso que fuera constituido solamente de carbón y oxígeno en las proporciones oportunas. Se encuentra así que el Sol solamente podría radiar 8.000 años, un período muy inferior a su edad estimada que es por menos de 4.7 Evos ($1 \text{ Evo} = 10^9 \text{ años}$). Asignar esta edad al Sol, en realidad es una apreciación por defecto, puesto que 4.7 Evos es la edad de la Tierra, mientras que el Sol parece tenga una edad aproximada de 20 Evos.

A raíz de este insuceso, HELMHOLTZ propuso en 1853 otra teoría apoyada en el hecho de que el Sol se encuentra en un estado gaseoso.

Esta nueva teoría, llamada del "Colapso gravitacional", explica la radiación solar como resultado de una gradual disminución del volumen del Sol.

El calor al interior del Sol sería el producto de las colisiones de los átomos del gas en el proceso de compresión hacia el núcleo central.

La energía radiada resultaría entonces de la transformación de la energía potencial gravitacional en energía cinética y de ésta en calor.

Un cuerpo gaseoso que sufra este proceso mantendría una temperatura estable (así como el Sol); no obstante esta teoría también falla porque si se calcula la edad

del Sol, en el supuesto que siempre haya emitido energía a la velocidad actual, se obtiene para nuestra estrella una duración máxima de 20 millones de años solamente.

A pesar de que la teoría del colapso gravitacional no explique la producción de la energía solar, ella nos proporciona una buena explicación de cómo el Sol haya podido llegar a tener en su interior una temperatura de 20.10^6K que es necesaria para iniciar el proceso termonuclear que parece ser la verdadera fuente de energía.

Como veremos más adelante, en este proceso una parte de la masa del Sol se transformaría en energía, de tal manera que el Sol perdería, para radiar energía a la velocidad actual, una masa de $4.6 \cdot 10^9 \text{ Kg}$ cada segundo; teniendo en cuenta la masa del Sol, esto le permitiría una vida de aproximadamente 10^4 Evos.

La disminución de la masa del Sol provocaría obviamente un cambio (debilitamiento) de su campo gravitatorio, pero sería tan pequeño que el año terrestre solamente se alargaría de 1 segundo cada 15.000.000 de años, aumento este que no es detectable ni siquiera con los mejores aparatos experimentales.

Para estudiar más en detalle el proceso termonuclear, es necesario que sepamos algo más sobre la constitución química del Sol y sobre las propiedades del núcleo atómico que pueden dar cuenta de la energía solar.

c. CONSTITUCION DEL SOL

La información sobre la constitución química del Sol se puede obtener del estudio de la radiación que él emite; una fracción de esta radiación tiene una frecuencia que cae en la región visible del espectro electromagnético y es de mucho interés en el estudio de la constitución del Sol.

Como es sabido, si examinamos con un espectroscopio la luz emitida por un tubo de H, He, Ne, etc... se encuentra que el espectro consiste de una serie de rayas brillantes; la determinación de estas series, para cada elemento, es de suma importancia porque no existen dos elementos que presenten el mismo espectro, ni dos líneas en los espectros de dos elementos que tengan exactamente la misma frecuencia.

Esto nos sugiere que el análisis del espectro solar nos puede permitir individuar los elementos presentes en el Sol; sin embargo, la luz solar examinada con un espectroscopio produce una banda continua de colores* sin interrupción a partir del rojo hasta llegar al violeta y este hecho parece dificultar nuestro estudio.

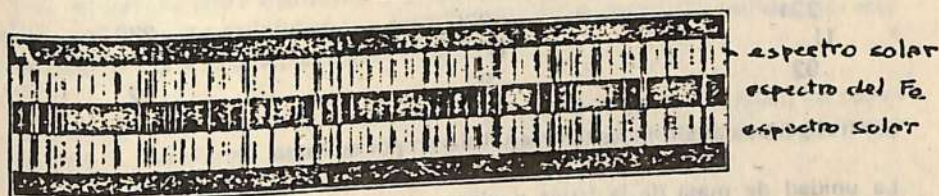
Pero, si la luz, proveniente de una fuente que produce un espectro continuo, atraviesa un gas más frío de baja presión, ocurre que este gas absorbe parte de la radiación y esta absorción se presenta para las frecuencias que para los átomos del gas pueden emitir cuando actúan como radiadores.

* El espectro continuo es característico de sólidos, líquidos o gases incandescentes de alta presión.

Esto quiere decir que en el espectro continuo se presentarán unas rayas oscuras cuyas posiciones corresponden a las posiciones de las líneas brillantes del espectro de emisión del gas que está absorbiendo la energía. Un espectro de rayas oscuras sobre un espectro brillante continuo se llama espectro de absorción y su estudio permite identificar el elemento que está absorbiendo así como las líneas brillantes lo identifican en su espectro de emisión.

Esto es exactamente lo que ocurre en el espectro solar; la banda continua es producida por el gas incandescente de alta presión de su núcleo interior, mientras que las rayas oscuras (espectro de absorción) son producidas por el gas superficial notablemente más frío. La identificación de los elementos que constituyen la materia solar se obtiene comparando la posición de las líneas de absorción (oscuras) del espectro solar con la posición de las líneas brillantes del espectro de emisión de cada elemento.

La figura siguiente (Bb 1) ilustra la identificación del Fe mediante el método anteriormente expuesto.



De esta manera ha sido probada la existencia en el Sol de 67 elementos y exámenes más detallados, conducidos por RUSSELL, han permitido establecer la abundancia de cada elemento a partir de las intensidades de las líneas de absorción.

Estos estudios indican que, en el Sol, predominan los elementos ligeros, entre los cuales el H y el He forman cerca del 90% de la masa total.

d. CONSTITUCION DEL NUCLEO

Los átomos consisten de un núcleo central cargado con electricidad positiva alrededor del cual giran partículas negativas (los electrones) cuyo número es tal que el átomo en su totalidad sea eléctricamente neutro.

El núcleo atómico está constituido por dos tipos de partículas, protones y neutrones.

El protón tiene carga positiva igual (aparte del signo) a la del electrón, mientras que los neutrones no tienen carga.

Esto requiere que para cualquier átomo que se encuentre en su estado natural debe cumplirse la relación:

$$\text{número de protones} = \text{número de electrones}$$

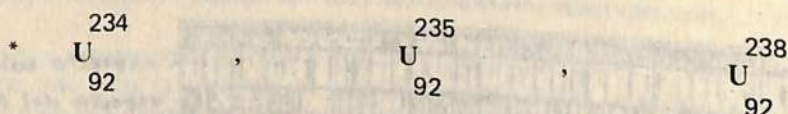
El número de electrones o protones en un átomo se llama número atómico y se indica con Z . El número total de protones y neutrones contenidos en el núcleo se llama número de masa y se indica con A .

Las propiedades químicas de los átomos dependen del número de los electrones, es decir de Z ; por lo tanto, átomos con diferente número de masa A pero con igual número Z de protones son químicamente equivalentes (átomos isótopos) aunque desde el punto de vista nuclear tengan un comportamiento distinto.

Esto requiere que en el estudio de las propiedades nucleares, cada elemento debe individualizarse a través de la indicación de A y Z . Así un elemento X deberá escribirse:



Los tres isótopos del U se indicarán por lo tanto de la siguiente manera:



Las tres partículas atómicas también difieren por su masa.

La unidad de masa de la física nuclear está fijada de manera que el isótopo $^{16}_8O$ del oxígeno definida en esta unidad sea igual a 16 a.m.u. (atomic mass unity).

* En realidad el valor de A determina el nombre del elemento y por lo tanto puede suprimirse en la notación puesto que el elemento U es solamente el que tenga $A = 92$.

En unidades a.m.u. se tiene:

$$\text{masa del protón} = 1.007593 \text{ a.m.u.}$$

$$\text{masa del neutrón} = 1.008982 \text{ a.m.u.}$$

$$\text{masa del electrón} = 5.4876 \cdot 10^{-4} \text{ a.m.u.}$$

De lo anterior se ve que las masas de protón y neutrón son aproximadamente iguales. Este hecho permite identificar ambas partículas con el nombre de NUCLEON en el estudio de las propiedades que no dependen de la carga eléctrica.

e. FUERZAS NUCLEARES

Para que las partículas nucleares (protones y neutrones) se mantengan unidas para formar un núcleo es necesario que exista alguna fuerza de atracción entre ellas, sobre todo si se tiene en cuenta que entre protones actúa una fuerza coulombiana repulsiva.

Los resultados experimentales demuestran que las fuerzas nucleares actúan en un radio del orden de 10^{-12} cm, que varía, según el número de masa del núcleo considerado, de acuerdo a la fórmula:

$$R = R_0 A^{1/3}$$

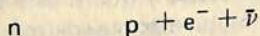
siendo $R_0 = 1.41 \cdot 10^{-13}$ cm

Durante mucho tiempo se creyó que las fuerzas nucleares actuaban solamente entre neutrones y protones, sin embargo en 1935 algunos experimentos* indicaron que las fuerzas nucleares también actúan entre protones, y sucesivos estudios condujeron a la conclusión según la cual las fuerzas entre neutrones ($n - n$) son iguales a las fuerzas entre protones ($p - p$) y también iguales a las fuerzas que se manifiestan entre protones y neutrones ($n - p$).

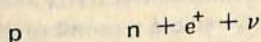
* Scattering de protones de alta velocidad en un gas de H.

Esta semejanza entre neutrones y protones en su comportamiento en el núcleo sugirió entonces la posibilidad que estas dos partículas fueran en realidad dos estados diferentes de la misma partícula (el nucleón).

Después de los estudios de Fermi (Bb5) sobre el decaimiento β según los cuales el neutrón se transforma en un protón con emisión de un electrón y un neutrino:



mientras que el protón se transforma en un neutrón según el esquema



HEISENBERG propuso una teoría de las fuerzas nucleares según la cual protones y neutrones se atraería por el continuo intercambio de electrones (o positrones) y neutrinos. Desafortunadamente este modelo falló porque la fuerza resultante así calculada resultó 10^{14} veces más débil que la fuerza nuclear obtenida experimentalmente.

Después de la caída de esta teoría, Yukawa (Bb 6) hipotizó la existencia de una partícula (MESON) cuya carga fuera igual a la del electrón y cuya masa se calcularía de manera que se diera cuenta exacta de la interacción nucleón-mesón propuesta* la fuerza de atracción entre nucleones sería entonces el producto del canje de mesones positivos o negativos según el esquema:

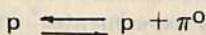


En estos procesos no se conservaría la energía que puede pensarse "prestada" siempre que sea devuelta dentro de un tiempo que se calcula en base al principio de incertidumbre:

$$\Delta E \cdot \Delta t = K$$

Esto quiere decir que el canje necesario puede considerarse un proceso virtual y tiene alguna importancia solamente si en el tiempo Δt el mesón puede recorrer una distancia $c \cdot \Delta t$ del orden del alcance de las fuerzas nucleares [$\sim 10^{-12}$ cm].

Una extensión importante de la teoría de Yukawa fue la predicción de la existencia de un mesón neutro (π^0) por Kemmer (1938) que ofrece una explicación de la fuerza existente entre nucleones iguales, en términos del canje del π^0 , resultante de los procesos virtuales



Si se permiten los canjes de los tres tipos de mesones de fuerzas nucleares pueden, de acuerdo a los resultados experimentales, quedar independientes de la carga de los nucleones.

* Según Yukawa, la masa del mesón debía ser entre 100 y 200 veces la masa del electrón.

El descubrimiento del mesón μ en los rayos cósmicos por parte de ANDERSON y NEDDERMEYER en 1936, pareció confirmar la teoría de YUKAWA, sobre todo teniendo en cuenta que la masa de este mesón es $m_\mu = (207 \pm 1) m_e$. Sin embargo, la escasa interacción de esta partícula con los núcleos llevó a la conclusión de que el mesón μ no era la partícula hipotizada por YUKAWA y que si esta teoría tuviese alguna validez, debería existir otro mesón de masa más grande que fuera responsable de la energía de enlace de los núcleos. Este otro mesón, fue efectivamente descubierto en 1947 por LATTES, MUIRHEAD, OCCHIALINI y POWELL (π).

Su comportamiento, y especialmente su interacción con los núcleos, sigieren que el mesón π sea la partícula responsable de la fuerza de canje entre nucleones. La masa del mesón π resulta ser

$$m_{\pi^+} = (273.4 \pm 0.2) m_e$$

$$m_{\pi^-} = (272.5 \pm 0.3) m_e$$

en buen acuerdo con las previsiones de YUKAWA, además el descubrimiento en 1950 del mesón (π^0) neutro ($m_{\pi^0} \cong 264 m_e$) confirmó la hipótesis de KEMMER y da cuenta de las fuerzas ($n - n$), ($p - p$) en base al canje (del mesón neutro) anteriormente expuesto.

No obstante el éxito notable de la teoría de YUKAWA, estudios posteriores han demostrado que la fuerza de canje de mesón solamente es una componente de las fuerzas nucleares.

Desafortunadamente el conocimiento de la naturaleza de las otras componentes

se encuentra en un estado rudimentario, por lo cual es todavía imposible elaborar un modelo de la estructura nuclear.

f. ENERGIA DE ENLACE DEL NUCLEO

Aunque, como hemos visto, desconozcamos todavía la naturaleza de las fuerzas nucleares, se ha podido calcular con suficiente exactitud la energía (y entonces la intensidad de la fuerza) que mantiene unidos los nucleones en un núcleo.

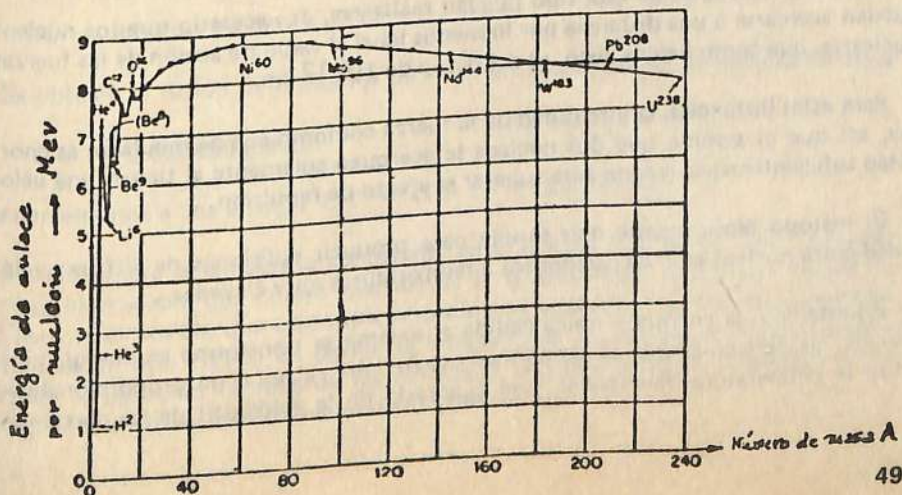
Se podría razonablemente suponer que la masa de un átomo fuera igual a la suma de las masas de las partículas que le componen. Sin embargo resulta siempre que la masa de un átomo es menor que la suma de las masas de las partículas libres que lo constituyen. Para explicar esta diferencia en la masa, se utiliza el principio de equivalencia entre masa y energía, derivado de la teoría de la relatividad especial. Si ΔM es la disminución en la masa cuando un cierto número de protones, neutrones y electrones se combinan para formar un átomo, entonces el anterior principio establece que una cantidad de energía $\Delta E = c^2 \cdot \Delta M$ se libera en el proceso.

La diferencia de masa ΔM se llama **defecto de masa** y representa la cantidad de masa que se ha transformado en energía cuando un átomo se ha formado reuniendo el número adecuado de protones, neutrones y electrones.

La misma cantidad de energía será entonces necesaria para dividir el átomo en sus partículas constituyentes, de manera que la energía equivalente al defecto de masa es una medida de la energía de enlace del átomo. Si desechamos la contribución de los electrones, para un núcleo que tenga A nucleones y Z protones el defecto de masa será:

$$\Delta M = Z m_p + (A - Z) m_n - M_z' A$$

donde se puede calcular la energía de enlace del núcleo. La gráfica siguiente (Bb 2) ilustra la variación de la energía media de enlace por nucleón (energía total de enlace dividida por el número de masa A) en función del número de masa.



Como unidad de medida para la energía de enlace se utiliza generalmente el ev, definido como el trabajo electrostático realizado sobre un electrón cuando se le haga recorrer la distancia entre dos puntos cuya diferencia de potencial sea de 1 volt.

$$1 \text{ ev} = 1.6021 \cdot 10^{-12} \text{ erg}$$

Como se ve en la gráfica, la energía de enlace por nucleón aumenta rápidamente con el aumento de A, hasta alcanzar un max de $\cong 8.8 \text{ Mev}$ ($\text{Mev} = 10^6 \text{ ev}$) alrededor de $A = 50$; después decrece lentamente hasta el valor 7.6 Mev para el U.

La desaparición de una unidad de masa (1 a.m.u.) corresponde a la liberación de una energía de $931.16 \text{ Mev} = 1.492 \cdot 10^{-3} \text{ erg}$.

g. LAS REACCIONES NUCLEARES DE PRODUCCION DE LA ENERGIA SOLAR

Como hemos dicho anteriormente, la imposibilidad de explicar la energía emitida por el Sol con base en las fuentes convencionales de energía hace suponer que en la actividad del Sol esté involucrado un proceso de tipo nuclear. Muchas reacciones nucleares exotérmicas liberan energía de varios Mev por nucleón y teniendo en cuenta que el número de nucleones por gramo de materia solar es aproximadamente 10^{24} , se puede obtener una energía de $\cong 10^{19} \text{ erg}$ por cada gramo de materia.

El problema es entonces encontrar un proceso nuclear compatible con las condiciones físicas y la composición química del Sol.

Ante todo hay que excluir que el proceso de fisión de elementos pesados pueda ser la fuente de la energía solar, puesto que la abundancia de estos elementos en el Sol es muy pequeña. Por otra parte hemos visto que H y He forman aproximadamente el 90% de la materia solar, lo cual induce a pensar que el proceso nuclear que pueda dar cuenta de la producción de la energía solar debe involucrar estos dos elementos.

Para que reacciones de este tipo puedan realizarse, es necesario que los núcleos nucleares, que como hemos visto, es del orden de 10^{-12} cm .

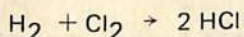
Para estas distancias, la intensidad de la fuerza coulombiana de repulsión es enorme, así que es posible que dos núcleos se acerquen solamente si tienen una velocidad suficientemente grande para superar el efecto de repulsión.

El método teóricamente más simple para producir colisiones de altísima velocidad entre núcleos es el de calentarlos a temperaturas muy elevadas.

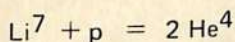
En este caso la energía térmica cedida al sistema se transforma en energía cinética de las partículas que lo componen, según una relación de proporcionalidad entre la temperatura del sistema y el cuadrado de la velocidad de las partículas.

Desde el punto de vista las fusiones nucleares de alta temperatura, o reacciones termonucleares como generalmente se llaman, presentan una analogía con las reacciones químicas.

Naturalmente la energía necesaria para activar la reacción en los dos casos es muy distinta; por ejemplo en la reacción química



la energía de activación es 0.3 ev mientras que la energía de activación es 1.3 Mev para la reacción nuclear:



puesto que las reacciones químicas se desarrollan a temperaturas de centenares de grados, se puede razonablemente suponer que estas reacciones nucleares necesitan temperaturas de algunos millones de grados.

Los estudios de astrofísica han permitido establecer que la temperatura interna de las estrellas es $\cong 20$ millones $^{\circ}\text{K}$ *, lo cual refuerza la hipótesis que las reacciones sean de tipo termonuclear.

Para una temperatura determinada las reacciones de fusión serán más probables cuando es más pequeña la carga eléctrica de los núcleos, puesto que a las interacciones entre núcleos se opone menos la repulsión electrostática. Parecería entonces que el proceso más probable fuera el de fusión de núcleos de H para formar He.

* Temperatura que (como hemos visto) puede obtenerse a través de una contracción gravitacional.

Efectivamente un proceso de este tipo generaría gran cantidad de energía puesto que la masa de 4 átomos de H sería: $4 \text{ H} = 4 \cdot (1008142) \text{ a.m.u.} = 4.032568 \text{ a.m.u.}$ mientras que la masa de un átomo de He es

$$\text{He} = 4.003873 \text{ a.m.u.}$$

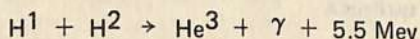
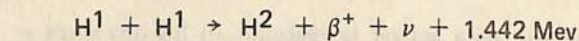
Se obtiene la fusión de 4 átomos de H en un átomo de He un defecto de masa

$$\Delta M = 0.028695 \text{ a.m.u.}$$

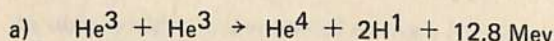
que corresponde a una energía $\Delta E = \Delta M \cdot c^2 = 26.72 \text{ Mev.}$

Sin embargo a la temperatura existente en el interior del Sol ($2 \cdot 10^7$ $^{\circ}\text{K}$) parece muy improbable que cuatro núcleos de H se unan para formar un núcleo de He; pero sí es posible que esta transformación se produzca a través de una serie de reacciones de tipo cíclico en donde la temperatura tan elevada es necesaria para producir la agitación térmica de las partículas y proporcionarles energía cinética para que los choques sean suficientemente frecuentes.

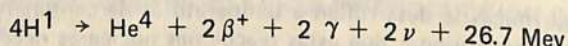
Han sido propuestos dos procesos termonucleares para dar cuenta de la energía solar, el primero, llamado normalmente "cadena protón-protón" consiste de las siguientes reacciones: (Bb 7, 8)



cuando este proceso se haya producido dos veces se han formado dos núcleos He^3 y entonces:

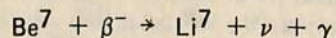
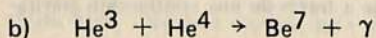
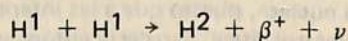


El efecto neto del ciclo es:

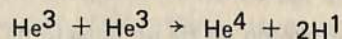


Si se resta la energía cinética de los neutrinos queda una energía disponible de 26.2 Mev. Los positrones emitidos son destruidos por los electrones libres con producción de rayos γ

Anteriormente se creía que la cadena protón-protón estuviera constituida por las reacciones:



que tenía el mismo efecto neto de transformar 4 núcleos de H en uno de He; sin embargo estudios posteriores han indicado que la reacción:

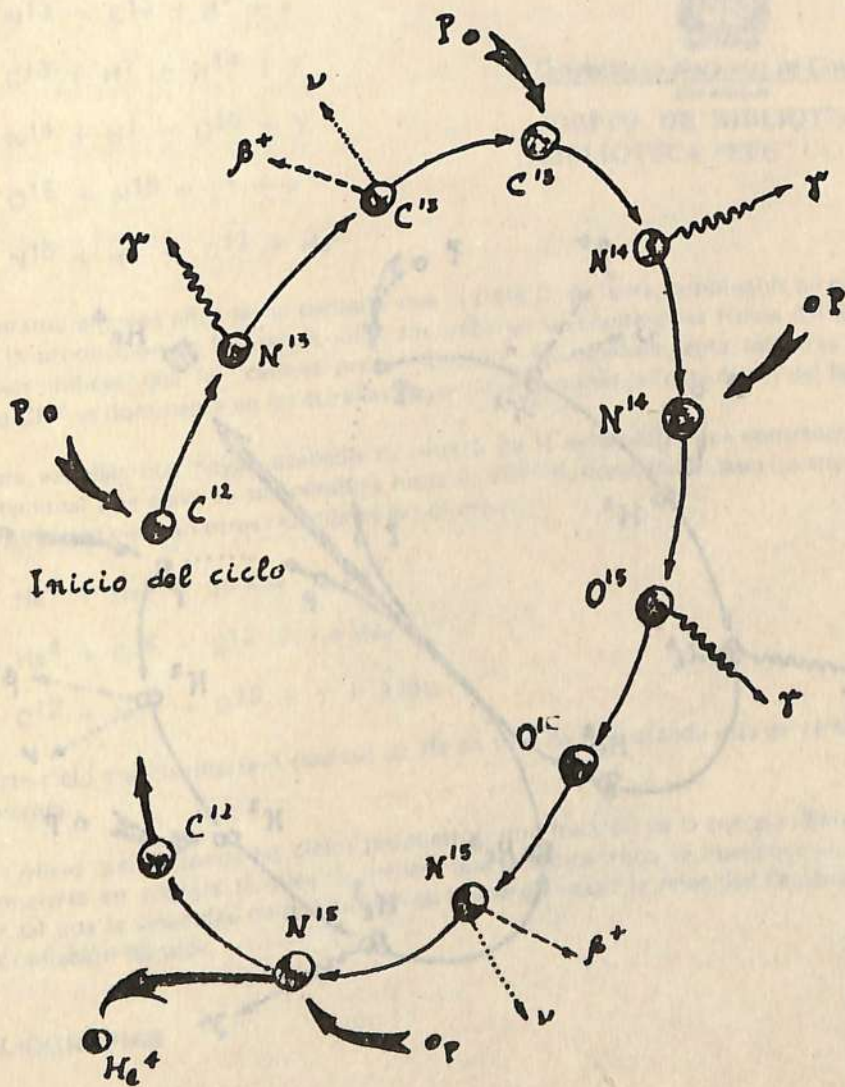


es mucho más probable que la reacción

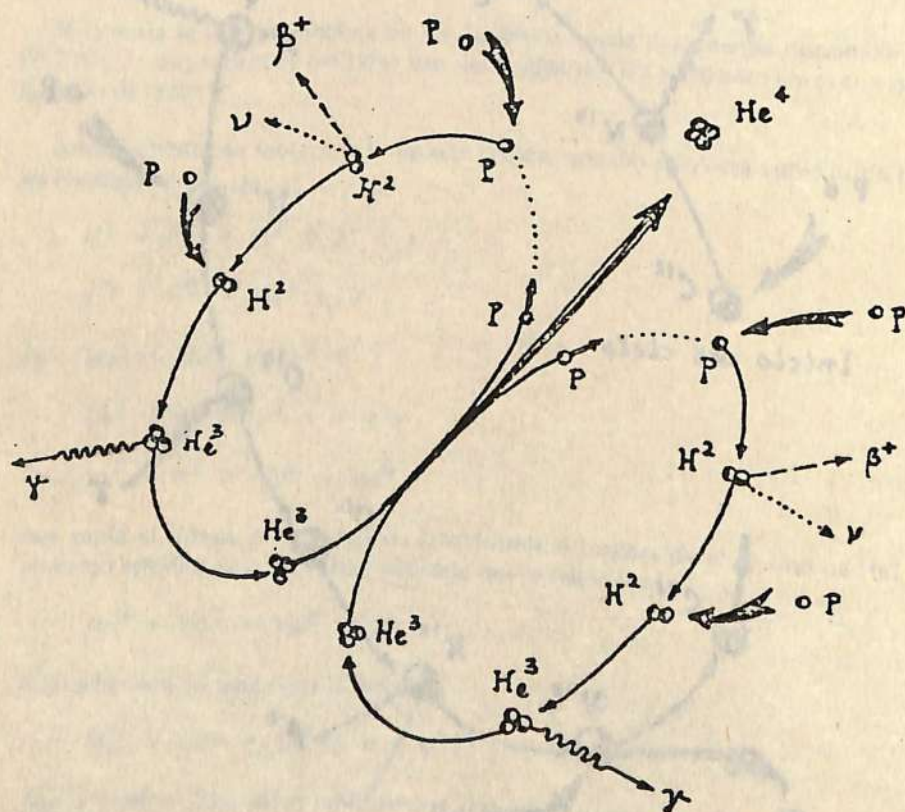


por lo cual el ciclo a) se considera el responsable de la energía solar más que el ciclo b).

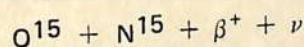
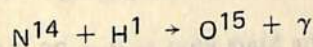
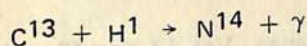
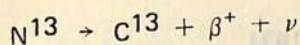
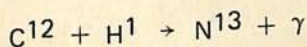
Labrador Protein-Protein



Cadena Protón-Protón



Otra serie de reacciones, el "ciclo carbón—nitrógeno" ha sido propuesto por BETHE (Bb 9) para dar cuenta de la producción de energía en el Sol y otras estrellas; estas reacciones tienen la atractiva propiedad que el carbón y el nitrógeno no son consumidos en el ciclo porque son regenerados, es decir, que estos núcleos actúan como **catilizadores** en reacciones en las cuales 4 protones se convierten en un núcleo de He liberando una energía de $\cong 26$ Mev. La secuencia propuesta es:



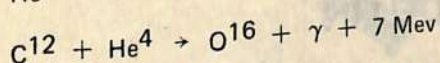
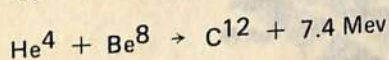
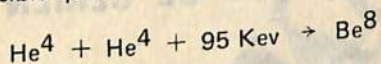
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

BOGOTÁ

DEPTO. DE BIBLIOTECAS
BIBLIOTECA "EFE" GOMEZ

Durante algunos años se ha pensado que el ciclo C—N fuera responsable de casi toda la producción de la energía solar, sin embargo las condiciones físicas del Sol parecen indicar que la "cadena protón—protón" sea predominante mientras el "ciclo CN" es dominante en las estrellas cuyo núcleo sea más caliente que el del Sol.

Para estrellas que hayan acabado su reserva de H se hipotiza una contracción gravitacional que eleve su temperatura hasta $2 \cdot 10^8$ OK, condiciones para las cuales es posible que ocurran otras reacciones exotérmicas:



Este ciclo transformaría 4 núcleos de He en uno de O liberando más de 14 Mev de energía.

Es obvio que en todos los ciclos propuestos, una fracción de la energía liberada se convierte en energía térmica de manera que la temperatura se mantenga en un valor tal que la velocidad de producción de la energía iguale la velocidad de pérdida de la radiación térmica.

BIBLIOGRAFÍAS

Bibliografía General

- (Bb 1) E. A. FATH. The elements of Astronomy. McGraw—Hill Book Company Inc — 1955.

(Bb 2) RICHTMYER — KENNARD — LAURITSEN. Introducción to Modern Physics. McGraw—Hill Book Company Inc — 1955.

(Bb 3) Nuclear Physics. Addison — Wesley Publishing Company Inc— 1958.

(Bb 4) V. BENZI. Le reazioni nucleari. Ed. Capelli — 1962.

Bibliografía Específica

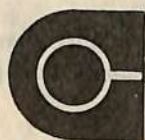
(Bb 5) E. FERMI — Z. Physik. Vol 88 pag. 161 — 1934.

(Bb 6) H. YAKAWA. Proc. Math. Phys. Soc. Japan. Vol 17 pag 48 — 1935.

(Bb 7) E.E. SALPETER. Nuclear Reactions in the Stars Phys — Rev. 88, 547 — 1952.

(Bb 8) E.A. FRIEMAN, L. MOTZ. The proton—proton Reaction and Energy Production in the Stars Phys. Rev. 89, 648 — 1953.

(Bb 9) H.A. BETHE. Energy production in Stars Phys. Rev. 55, 434 — 1939.



**INSTITUTO COLOMBIANO
DE PRODUCTORES DE CEMENTO**

I. C. P. C.

OFICINAS EN MEDELLIN

Edificio Camacol

Cra. 63 No. 49A-31, Piso: 6

Teléfonos: 30 34 80 - 30 34 88

30 33 28 - 30 31 88

Apartado Aéreo 52816

Télex 06 — 697 — CNARE

Cables: INCOCEMENTO

OFICINAS EN BOGOTA

Edificio Sociedad Colombiana de Arquitectos

Cra. 6a. No. 26-85, Piso: 7

Teléfonos: 2 82 89 72

2 83 97 31

Apartado Aéreo 19991

Afiliado a Camacol