

Dr. Erich P. Heilmair K.

## Reacciones nucleares como fuente de energía estelar



EN el problema de la constitución interna de las estrellas tropezamos con un fenómeno cuya explicación es imposible dar a base de los conceptos clásicos de la Física. Me refiero a la fuente de la cual las estrellas sacan la energía suficiente para compensar durante millones de años, las pérdidas de energía por radiación, que podemos observar. Así, por ejemplo, la radiación solar es de  $3.8 \times 10^{33}$  ergs/seg., es decir, de  $1.2 \times 10^{41}$  ergs/año. Esta inmensa energía no puede tener su origen en una contracción estelar, una combustión química, un proceso radiactivo u otro fenómeno corriente sin que se produzcan cambios apreciables en la estrella dentro de tiempos relativamente cortos. <sup>v</sup>

Consideremos, por consiguiente, primero todas las diversas formas de energía de las cuales se compone la energía total de una estrella. Tenemos: 1) la energía correspondiente a las masas en reposo de las partículas elementales, como son protones, neutrones, electrones; 2) la energía de ligación entre estas partículas elementales al componer el núcleo atómico; 3) la energía electromagnética debido a las fuerzas entre los núcleos atómicos y sus electrones exteriores; 4) la energía de gravitación debido a las fuerzas de atracción mecánica entre las partículas; 5) la

energía cinética de las partículas en movimiento: y 6) la energía de radiación debido a la presencia de fotones en el interior estelar. Las sumas de estas energías dividida por el cuadrado de la velocidad de propagación de la luz es la masa de la estrella que observamos.

Solamente el aprovechamiento de las dos clases de energía citadas al principio, es decir, la transformación de la materia en energía a la desintegración de núcleos atómicos nos lleva a resultados numéricos que podemos poner de acuerdo con las radiaciones y los demás datos estelares observados. En especial, basta con la suposición de ciertas transmutaciones atómicas para explicar la pérdida de energía por radiación, siendo necesario demostrar que estas transmutaciones se puedan realmente realizar en el interior de las estrellas.

Para que la desintegración de los átomos tenga lugar, es necesario, que dos núcleos lleguen al contacto. Sin embargo, a esto se oponen las cargas eléctricas de las cuales ambos núcleos están provistos. Al acercarse una partícula de carga positiva a un núcleo atómico, actúan sobre ella primero fuerzas de repulsión de acuerdo con la ley de Coulomb hasta una distancia de más o menos  $10^{-11}$  cm. entre partícula y núcleo. Pero muy cercano al núcleo deben existir fuerzas de atracción. De otro modo se rompería el núcleo. De ahí, que el potencial que rodea el núcleo en función de la distancia representa una curva conocida con el nombre de «pozo potencial». El núcleo se encuentra en medio de este pozo, rodeado a cierta distancia de una barrera de potencial que alcanza un valor de 1 millón de electrón-volts. Para que la partícula positiva penetre en el núcleo, debe vencer esta barrera. Es decir, según las leyes de la Electrodinámica clásica debe estar prevista por lo menos de la energía correspondiente a la ordenada de esta barrera.

Sin embargo, experimentos verificados por *Rausch von Trauberg* han demostrado, que partículas  $\alpha$  pueden llegar has-

ta el núcleo, aunque tengan energías inferiores a la nombrada. En general, existe cierta probabilidad, de que una partícula de carga positiva penetre en un núcleo atómico, cualquiera que sea la energía de esta partícula. Esta probabilidad que la mecánica ondulatoria puede calcular, aumenta con la energía de la partícula y disminuye en forma exponencial con el producto de las cargas del núcleo y de la partícula, respectivamente. Además depende algo de la masa reducida del sistema. De ahí, que para la producción de reacciones nucleares sean necesarios átomos livianos, cuya carga nuclear es siempre pequeña, y grandes energías.

Para saber si en el interior de una estrella los átomos tienen estas grandes energías necesarias, tenemos que considerar primero la constitución interna de las estrellas. De antemano sea dicho, que las investigaciones al respecto todavía no han llegado a resultados definitivos y que muchos de estos resultados podrán cambiar en los próximos años. Lo que conocemos por la observación directa son las condiciones físicas y químicas de la atmósfera estelar, la masa, el radio y la energía irradiada de la estrella. Además, los espectros estelares nos indican una gran semejanza en la composición química de la atmósfera de los diversos tipos estelares.

Para conocer el interior de la estrella se calcula desde fuera hacia dentro, suponiendo, que la estrella esté en equilibrio de radiación. Es decir, en cualquier profundidad la suma de la presión mecánica y de la radiación es igual al peso de la capa de encima. Además, debido al aumento de la temperatura hacia el interior se origina un flujo de radiación hacia fuera proporcional al gradiente térmico e inversamente proporcional al coeficiente de absorción. Este último depende de la composición química de la estrella. Para conocerla se supone una composición probable calculando con ésta los demás valores físicos de la estrella. Si el resultado obtenido no está de acuerdo con la observación, se repite el cálculo, variando la primera suposi-



ción, hasta llegar a resultados idénticos a los de la observación. De esta manera se ha formado un modelo estelar para los diversos tipos espectrales de los cuales podemos ver algunos ejemplos en la tabla 1. La segunda tabla muestra en forma más detallada los valores válidos para el interior del sol, según cálculos de Stromgren. Sea dicho aquí, que según otros autores la temperatura central del sol llega a 25.7 millones de grados y la densidad central a 110. Sin embargo, un trabajo de Sen y Burman, del año pasado comprueba casi con seguridad, que la temperatura central del sol es de 20.2 millones de grados y su densidad  $45.5 \text{ gr/cm}^3$ , lo que está mejor de acuerdo con los valores de Stromgren.

Considerando primero el caso del sol, vemos que en su interior la temperatura es tal, que todos los átomos están ionizados y que cada núcleo lleva según la teoría cinética de los gases, la energía de  $4 \times 10^{-9}$  ergs, lo que corresponde a 3000 electrón-volts. Esta energía es muy baja para la producción de reacciones nucleares, cuya probabilidad es, por consiguiente, pequeña considerando un solo átomo. Pero debido al inmenso número de átomos presentes, en cada momento se va a producir realmente gran número de reacciones. En la tabla 3 encontramos todas las reacciones entre protón y átomos livianos siendo la lista completa hasta el oxígeno. Al lado de cada reacción se indica la vida media de los núcleos hasta que se produzca la reacción. Los valores se refieren al centro solar.

Podemos ver, que la vida media de los núcleos más pesados que  $\text{N}^{15}$  es muy larga en relación a la edad del sol, que estimamos en 2 a 3 mil millones de años. De ahí, que estos núcleos prácticamente no van a transmutarse. La única excepción hace  $\text{F}^{19}$ . Pero debido a su corta vida debe haberse gastado ya todo el contenido de  $\text{F}^{19}$  en el sol y estamos también seguros, que no se renueva este núcleo por otras desintegraciones atómicas. Además, sabemos que bajo las condiciones reinantes en el centro solar prácticamente no pueden producirse

reacciones entre dos núcleos, ambos más pesados que protones. Entre las reacciones restantes hay que excluir también todas aquellas cuya vida es demasiado corta, como por ejemplo, la reacción entre un protón y un núcleo de deuterio, triplón, litio, etc. En estos casos todo el contenido en núcleos a disposición se transmutaría casi instantáneamente bajo el influjo de los protones, desarrollando una enorme energía en forma catastrófica. De ahí que tales núcleos no pueden existir en el sol sino en las cantidades en las cuales los producen continuamente otras reacciones nucleares. Este criterio podemos también aplicar al núcleo de  $\text{He}^3$ . Es cierto, que este núcleo no se integra reaccionando con un protón, porque la reacción conduciría a  $\text{Li}^4$  que es inestable. Pero  $\text{He}^3$  desaparece por la reacción:  $\text{He}^3 + \text{He}^4 \rightarrow \text{Be}^7$ , que a su vez se desintegra junto con la emisión de protones. En la misma forma, la integración de  $\text{He}^4$  mediante protones tampoco es posible debido a la inestabilidad de  $\text{Li}^5$ . De hecho no existe reacción alguna para transmutar el  $\text{He}^4$ . A base de todo lo dicho podemos suponer, que los átomos más livianos que el carbono sean escasos en el interior del sol, excepción hecha del hidrógeno  $\text{H}^1$  y el helio de peso atómico 4. Así se explica también la frecuencia relativa de los elementos, conocida ya desde hace tiempo. En general, disminuye esta frecuencia con el peso atómico, siendo así, que los 29 primeros elementos forman el 99.85% de la corteza terrestre, el 99.98% de los meteoros silicosos y el 100% de los meteoros metálicos. Pero existe un máximo de frecuencia para el grupo oxígeno, carbono y nitrógeno. Los elementos más livianos que este grupo son muy escasos, de tal modo que los átomos de boro, bencilio y litio existen sólo en cantidades iguales a un millonésimo de las cantidades existentes de oxígeno, carbono y nitrógeno. Pero como elementos más frecuentes observamos el helio y especialmente el hidrógeno. Como mayor detalle podemos añadir, que la frecuencia de átomos con un número par de neutrones o electrones nucleares es 4 veces mayor que la de los átomos

donde este número es impar, Núcleos con un número impar de neutrones y, al mismo tiempo, con un número impar de cuantos eléctricos, como por ejemplo el triplón, el  $\text{Li}^5$  y el  $\text{Li}^7$ , casi no existen. Resumiendo, entre la gran multitud de reacciones nucleares posibles sirven para el mantenimiento de la energía solar exclusivamente las reacciones del hidrógeno y del grupo carbono, nitrógeno y oxígeno.

Basándose en las ideas expuestas aquí, von Weizsacker, Gamow y Bethe, discutieron las reacciones intrasolares posibles, pudiendo Bethe publicar en 1939 las dos series de reacciones que hasta hoy día están en la mejor forma de acuerdo con nuestro modelo solar actual. Según Bethe la reacción entre dos protones conduce a la formación de deuterio más la emisión de un positrón. El deuterio reacciona en seguida con otro protón conduciendo al hesitopo de helio de peso atómico 3. Para las transmutaciones del  $\text{He}^3$  existen después varias posibilidades, a saber: 1)  $\text{He}^3$  más un protón de  $\text{Li}^4$  que se desintegra en  $\text{He}^4$  más un positrón; 2) el  $\text{He}^3$  reacciona con  $\text{He}^4$  formando  $\text{Be}^7$ , éste a su vez se desintegra en  $\text{Li}^7$  más un positrón y al final el  $\text{Li}^7$  se apodera de otro protón dejando como reacción dos núcleos de  $\text{He}^4$ ; 3) el  $\text{He}^3$  reaccionando con un electrón conduce a un triplón, que a su vez reacciona con un protón llegando de esta manera a la formación de un núcleo de  $\text{He}^4$ . En todas estas reacciones el producto final es  $\text{He}^4$ , el cual debido a su gran estabilidad queda intransmutable. Es decir, en el interior del sol se forma sencillamente helio a base de hidrógeno. Núcleos más pesados se pueden formar a lo sumo en cantidades insignificantes. Así, por ejemplo, debido a la inestabilidad del  $\text{Li}^4$  se puede formar un átomo de  $\text{C}^{12}$  por cada cuatrillón de átomos de  $\text{He}^4$  formados y suponiendo el  $\text{Li}^4$  como estable llegaríamos a la producción de 1  $\text{C}^{12}$  por cada 10,000 quintillones de helio. Las razones para la falta de formación de carbón y otros elementos más pesados son sencillas. En primer lugar, muchas reacciones nucleares conducen a la formación de



$\text{Be}^8$ , que es inestable, y es difícil sobrepasar este hueco de inestabilidad. En segundo lugar, muchos núcleos al intentar integrarlos, pierden fácilmente helio, es decir, conducen a una desintegración, pero no a una integración.

La segunda posibilidad para la integración de la materia nos da un proceso en cadena basado en reacciones del grupo carbono, nitrógeno y oxígeno. Empieza este proceso con la reacción entre el núcleo de carbono de peso atómico 12 y un protón, formándose un núcleo de  $\text{N}^{13}$ , que inmediatamente desintegra en un  $\text{C}^{13}$ , más un positrón. El  $\text{C}^{13}$  reacciona con un segundo protón produciendo  $\text{N}^{14}$ .  $\text{N}^{14}$  aprovecha un tercer protón para llegar a la formación de oxígeno de peso atómico 15.  $\text{O}^{15}$  se desintegra en  $\text{N}^{15}$  más un positrón. Por fin, el  $\text{N}^{15}$  reacciona con un cuarto protón conduciendo esta reacción a dos núcleos, uno de  $\text{C}^{12}$  y otro de  $\text{He}^4$ . El balance final muestra, que el  $\text{C}^{12}$  regenera completamente y que se forma helio de cuatro protones. Es decir, el carbono sirve exclusivamente de catalizador para la formación de helio a base de hidrógeno.

Las dos series de reacciones, la de la integración de 2 protones y la del ciclo carbono-nitrógeno libera energía que son función de la temperatura. Suponiendo para el centro solar una densidad en número redondo de  $100 \text{ gr/cm}^3$ , un contenido de hidrógeno de un 35% y un contenido de nitrógeno de un 10%, la producción de energía debido al proceso iniciado por la transmutación del carbono aumenta con la décima-octava potencia de la temperatura. Bajo las mismas condiciones, la integración de dos protones produce energías proporcionales sólo a la temperatura  $T$  elevada a 3.5. De ahí, que las fuentes de la energía solar se encuentran principalmente concentradas en el centro solar. La producción media de energía es mucho menor que la producción central. Podemos suponer, sin equivocarnos mucho, que la producción media es igual a la quinta parte de la producción central para la reacción de 2 protones, y sólo un décimo de la producción central para el ciclo carbo-

no-nitrógeno. Basándonos en una temperatura de 20 millones de grados para el centro solar vemos, que casi la totalidad de la producción energética proviene de este último ciclo, alcanzando un valor de más o menos 3 ergs/gr. seg., valor satisfactoriamente de acuerdo con la observación. Desde una distancia del centro solar de 0.15 rayos solares hacia fuera predomina la energía proveniente de la reacción entre dos protones. Pero ya no contribuye mayormente a la energía total del sol.

No queremos callar aquí, que a pesar de los éxitos que alcanzó Bethe justamente con la suposición del ciclo carbono-nitrógeno, que esta suposición origina también serias dificultades. Es necesario poner de acuerdo la producción de energía con la relación conocida entre masa y luminosidad. Tal concordancia es posible únicamente con la suposición sumamente hipotética y hasta dudosa, que en todas las estrellas la abundancia relativa de nitrógeno y carbono sea la misma.

Por supuesto, que en estrellas de temperatura más baja la importancia relativa de ambas series de reacciones varía. Así, por ejemplo, propone Critchfield para estrellas de la secuencia principal y de tipo espectral M la intervención casi exclusiva de la reacción de dos protones. Respecto a las estrellas no pertenecientes a la secuencia principal estamos aún bastante lejos de indicar las reacciones nucleares necesarias para la explicación de las luminosidades observadas. De ahí también, que la teoría de Bethe no nos da ninguna teoría sobre la evolución de las estrellas. Ni siquiera nos proporciona una teoría sobre la evolución del sol. Solamente explica la actual producción de energía dentro del sol sin contestar a la pregunta, cómo se originó la constitución del sol y su composición química.

Sin embargo, no quisiera terminar, sin añadir en qué forma tal vez ocurre la evolución estelar, aunque tales conceptos son todavía sumamente hipotéticos. Podemos suponer, que la estrella empieza como aglomeración individual de masa en forma esférica, de grandes dimensiones y pequeñísima densidad.



Bajo el influjo de la gravedad se contrae paulatinamente sin la intervención de reacciones nucleares debido a la baja temperatura. Pero la misma contracción eleva la temperatura, empiezan las primeras transmutaciones nucleares que contribuyen por su parte igualmente a un aumento de la temperatura estelar y, por consiguiente, aumenta la presión hasta impedir la contracción. Ya a una temperatura de apenas medio millón de grados pudiera reaccionar el deuterio con el protón formando  $\text{He}^3$ . La liberación de energía debido a este proceso termina al gastarse totalmente el deuterio. Sobreviene una nueva contracción hasta que a la temperatura de dos millones de grados el  $\text{Li}^7$  junto con un protón se transforma en dos átomos de helio y el  $\text{Li}^6$  aprovecha el protón para dar origen simultáneamente a un núcleo de  $\text{He}^4$  y de  $\text{He}^3$ . A la temperatura comprendida entre 3 y 9 millones de grados se pueden producir las reacciones  $\text{Be}^9 + \text{protón} \rightarrow \text{Li}^6 + \text{He}^4$  y  $\text{B}^{11} + \text{protón} \rightarrow 3\text{He}^4$ . Por fin, una última contracción conduce a los procesos que hemos conocido como principales en el interior del sol y que probablemente intervienen en el interior de todas las estrellas de la secuencia principal. Al haberse terminado todo el hidrógeno, fallan naturalmente las transmutaciones nucleares. Entonces la estrella llega al final de su carrera. Las últimas energías que irradia, deben ser consecuencia de contracciones extraordinarias, elevando la densidad media a 100,000 veces la del agua, la densidad central, según Marshak, a 30 millones, es decir, a 30 toneladas por  $\text{cm}^3$ . Pero entonces, la temperatura central ya está bajando a unos 10 millones de grados. Conocemos realmente unas 70 estrellas en tal estado, las llamadas enanas blancas. Si nuestra suposición sobre la evolución estelar fuese acertada, tendríamos entonces al mismo tiempo una explicación de estos objetos interesantes. Pero todavía estamos lejos de conocimientos completos sobre la evolución de las estrellas.

TABLA I

ESTRELLA	ESPECTRO	RADIO	MASA	LUMINOSIDAD	CONTENIDO HIDRÓGENO	DENSIDAD	TEMPERA- TURA CENTRAL
Krüger 60 B.	M6	0.40	0.14	0.007	22%	2,24	$8 \times 10^8$
YY Gemin.	M1e	0,76	0.63	0.069	33	1.45	16
$\alpha$ Cent. B.	K1	0.87	0.87	0.37	28	1.32	22
Sol	G	1	1	1	35	1	20
$\alpha$ Cent. A.	G4	1.23	1.10	1.26	37	0.60	17
Proción.	F3	1.7	1.48	5.75	22	0.31	21
Sirio	A0	1.78	2.35	39	40	0,59	23
B Auríg. A.	A0p	2.81	2.40	68	21	0.11	20
U Ohpimilu A.	B5	3.23	5.36	500	49	0.18	26
V Puppis.	B2.	6.75	18.5	7200	80	0.06	32
Y Cigni.	O9.	5.86	17.1	32000	80	0.085	35

TABLA 2

DISTANCIA DEL CENTRO EN r	0.00	0.14	0.29	0.43	0.58	0.72	0.87	1.00
M <sub>r</sub> /M	0.00	0.13	0.52	0.82	0.95	1.00	1.00	1.00
Temperat	19	16	11	7	4	2	1	—
Densidad	76	48	15	4	0.7	0.1	0.007	—
Presión	1 × 10 <sup>11</sup>	5 × 10 <sup>10</sup>	1 × 10 <sup>10</sup>	2 × 10 <sup>9</sup>	2 × 10 <sup>8</sup>	2 × 10 <sup>7</sup>	4 × 10 <sup>5</sup>	—

TABLA 3

REACCIÓN	VIDA MEDIA	REACCIÓN	VIDA MEDIA	REACCIÓN	VIDA MEDIA
H <sup>1</sup> +H <sup>1</sup> →H <sup>2</sup> +E <sup>+</sup>	1.2 × 10 <sup>11</sup> a	Be <sup>9</sup> +H <sup>1</sup> →Li <sup>6</sup> +He <sup>4</sup>	15 min.	N <sup>15</sup> +H <sup>1</sup> →C <sup>12</sup> +He <sup>4</sup>	2000 a
H <sup>2</sup> +H <sup>1</sup> →He <sup>3</sup>	2 seg	B <sup>9</sup> +H <sup>1</sup> →C <sup>10</sup>	5000 a	O <sup>16</sup> +H <sup>1</sup> →F <sup>17</sup>	10 <sup>12</sup> a
H <sup>3</sup> +H <sup>1</sup> →He <sup>4</sup>	0.2 seg	B <sup>10</sup> +H <sup>1</sup> →C <sup>11</sup>	1000 a	F <sup>19</sup> +H <sup>1</sup> →O <sup>18</sup> +He <sup>4</sup>	3 × 10 <sup>7</sup> a
He <sup>3</sup> +H <sup>1</sup> →Li <sup>4</sup>	1 d	B <sup>11</sup> +H <sup>1</sup> →3He <sup>4</sup>	3 d	Ne <sup>22</sup> +H <sup>1</sup> →Na <sup>23</sup>	2 × 10 <sup>18</sup> a
He <sup>4</sup> +H <sup>1</sup> →Li <sup>5</sup>	6 d	C <sup>11</sup> +H <sup>1</sup> →N <sup>12</sup>	10 <sup>8</sup> a	Mg <sup>26</sup> +H <sup>1</sup> →Al <sup>27</sup>	10 <sup>17</sup> a
Li <sup>6</sup> +H <sup>1</sup> →He <sup>4</sup> +He <sup>3</sup>	5 seg	C <sup>12</sup> +H <sup>1</sup> →N <sup>13</sup>	2.5 × 10 <sup>6</sup> a	Si <sup>30</sup> +H <sup>1</sup> →P <sup>31</sup>	3 × 10 <sup>36</sup> a
Li <sup>7</sup> +H <sup>1</sup> →2He <sup>4</sup>	1 min.	C <sup>13</sup> +H <sup>1</sup> →N <sup>14</sup>	5 × 10 <sup>4</sup> a	Cl <sup>37</sup> +H <sup>1</sup> →A <sup>38</sup>	2 × 10 <sup>25</sup> a
Be <sup>7</sup> +H <sup>1</sup> →B <sup>8</sup>	2000 a	N <sup>14</sup> +H <sup>1</sup> →O <sup>15</sup>	5 × 10 <sup>7</sup> a		