

Dr. Erich P. Heilmaier K.

## El estado de la materia en el Cosmos



**M**AS de alguna vez se nos habrá ocurrido hacernos la pregunta sobre las condiciones en que se encuentra la materia en el cosmos, nos habremos detenido a considerar el estado físico de las estrellas, si serán sólidas, líquidas o gaseosas, cuál la presión, temperatura y densidad de éstas y de las nebulosas. Colocados frente a estos problemas, nuestra situación es muy distinta a la del hombre del laboratorio, que para satisfacer su novedad tiene a su alcance un gran número de aparatos de medición directa.

Frente al sol, de nada nos sirve el manómetro, el termómetro es instrumento inútil tratándose de las estrellas, asimismo resulta imposible extraer de ellas porciones de materias para investigar su densidad, ni los reactivos pueden en este caso ayudarnos a determinar sus componentes químicos. De aquí que nuestras conclusiones sobre estas materias no puedan ser siempre deducidas directamente, sino que exijan la aplicación de leyes y reglas ganadas de las experiencias hechas

en la tierra, las cuales muy a menudo nos revelan dimensiones y relaciones muy diversas a las del cosmos.

No por esto se crea, sin embargo, que las afirmaciones que el astrónomo hace sobre el estado de la materia en el cosmos, sean sólo el producto de especulaciones sentimentales, carentes del grado de certeza atribuída a las afirmaciones que el físico hace, sobre el estado de la materia terrestre a base de sus experimentaciones. No, de ninguna manera; pues los fenómenos astronómicos observados podemos reducirlos a las leyes universales más elementales que rigen los fenómenos atómicos. Pero al hacer extensivo el experimento modelo del laboratorio a los fenómenos de la naturaleza hay que tener cuidado; pues los experimentos modelos son sólo una simplificación de la realidad y en las ecuaciones están contempladas también condiciones idealizadas. De aquí que mientras menos uso hagamos en la extrapolación de hipótesis no comprobadas tanto mayor confianza nos merecerán los resultados de las conclusiones a que arribemos.

Para formarnos una idea sobre el estado físico de la materia en el cosmos, tenemos que conocer ciertos valores que caracterizan este estado, los llamados valores de estado.

Para una estrella, que es la forma más importante bajo la cual encontramos la materia cósmica, podemos elegir como valores de estado: su masa  $M$ , su luminosidad  $L$  y su temperatura efectiva  $T$ . Además tenemos que hacer uso de algunas relaciones que cono-

mos desde el laboratorio. Para la determinación de la cantidad de materia que la estrella reúne en sí, es decir, para la determinación de su masa, tenemos que suponer que la atracción mutua de dos masas no sólo tiene valor dentro del sistema solar, sino también en todo el universo. Asimismo tenemos que suponer que la constante de gravitación es una constante natural que en todas partes tiene un mismo valor. Como para calcular la masa del sol y de los planetas basta conocer los movimientos del sistema solar, de igual manera se pueden deducir entonces las masas de las componentes de estrellas dobles midiendo los ejes de sus órbitas y el tiempo que estas necesitan para dar una vuelta completa.

Para la determinación de la luminosidad de una estrella, es decir, para determinar la energía irradiada en un segundo, necesitamos la ley física que dice la intensidad de radiación disminuye con el cuadrado de la distancia. La luminosidad resulta entonces del brillo aparente de la estrella y de su distancia de nosotros. Como unidades se usa en la astronomía la masa solar y la luminosidad solar.

Max Planck, el famoso físico alemán, encontró una relación entre la temperatura del cuerpo negro y la distribución de la energía en el espectro que emite este mismo cuerpo. Esta ley, llamada «ley de radiación», es la que se usa hoy en día en la industria para la medición de la temperatura de ampollitas, llamas, altos hornos, etc., mediante pirómetros. Aunque las estrellas

no son exactamente cuerpos negros, podemos usar la ley de radiación de Planck para la medición de temperaturas estelares a base de la medición de sus espectros. Las temperaturas resultantes se llaman «temperaturas efectivas».

Estas condiciones físicas supuestas, junto con las observaciones mencionadas bastan para la determinación de los valores de estado de una estrella, los cuales a su vez dan las condiciones en que se encuentra la materia de una estrella. Las únicas estrellas cuyas masas podemos determinar así mediante la tercera ley de Kepler, son las componentes de sistemas de estrellas dobles. Por esto, el número de estrellas con masas bien conocidas es relativamente reducido. Pero las observaciones han encontrado una relación rigurosa entre la luminosidad y la masa de una estrella. Esta relación se podría también deducir de la teoría sobre la constitución interna de las estrellas. Pero aquí quisiera tomar esta relación como resultado de la experiencia, como encontrado empíricamente.

Ahora bien, la temperatura efectiva  $T$  nos da la energía  $E$  que sale de  $1 \text{ cm}^2$  de la superficie estelar, mientras la luminosidad  $L$  mide el total de energía irradiada. Por consiguiente, el coeficiente  $\frac{L}{E}$  nos da la superficie y con ello también el radio  $R$  de la estrella. Unidad de los radios estelares sea el radio solar que tiene 700,000 kms.

Con el radio podemos calcular el volumen estelar;

del volumen y de la masa resulta al fin la densidad media  $\rho$  de una estrella. (He aquí una tabla con los valores de estado de algunas estrellas). Aunque se trata de pocas estrellas, podemos ver claramente que se distinguen tres grupos. Las del primer grupo disminuyen con la masa también la luminosidad, la temperatura y el radio, mientras al mismo tiempo crecen las densidades. Estas estrellas forman la llamada serie principal, a la cual pertenece también nuestro sol. En las estrellas del segundo grupo disminuye la temperatura, si se aumenta la masa, la luminosidad y el radio. Lo que en estas estrellas llama la atención, son los enormes radios que alcanzan valores iguales a los radios de la órbita de Júpiter. Por consiguiente, tienen estas es-

T A B L A

Nr.	Estrella	M	L	T	R	$\rho$
1	V Puppis A.....	19.2	11 000	28 000	4.8	0.24
2	$\beta$ Aurigae A.....	2.4	69	11 200	2.4	0.25
3	$\alpha$ Canis min A...	1.1	5.2	7 000	1.7	0.33
4	Sol.....	1.0	1.0	6 000	1.0	1.42
5	$\alpha$ Centauri B....	1.0	0.44	4 400	1.2	0.76
6	Krueger 60 A....	0.26	0.01	3 200	0.39	6.2
7	$\alpha$ Aurigae A.....	4.2	90	5 650	10.7	0.0049
8	$\alpha$ Bootis.....	8	175	4 200	27	0.0006
9	$\alpha$ Orionis.....	15	5 750	3 100	284	0.0000009
10	$\alpha$ Scorpii.....	30	14.500	3 100	450	0.0000005
11	$\circ$ 2 Eridani B....	0.44	0.0040	11 200	0.019	105 000
12	$\alpha$ Can maj. B....	0.85	0.0028	8 000	0.030	46 000
13	Heilmaier 6.....	0.6	0.0004	18 000	0.03	30 000

trellas densidades muy pequeñas, mucho más pequeñas que la densidad del aire a la presión de una atmósfera. Estas estrellas se llaman gigantes y supergigantes, debido a sus luminosidades, no a sus masas.

Contrastando con las gigantes están las estrellas del último grupo. Estas tienen luminosidades muy pequeñas, pero temperaturas muy altas. Según sus radios tienen estos cuerpos las dimensiones de los planetas, mientras que sus masas son del orden de la masa solar. De aquí que estas estrellas llamadas enanas blancas tengan densidades tan altas, de tal manera que en un dedal pueden caber algunos cientos de kilogramos.

Aun antes de considerar estas deducciones era posible determinar las densidades de las enanas blancas lo mismo que los radios de los gigantes. Los resultados vinieron a comprobar nuevamente nuestras conclusiones. De aquí que podamos asegurar la existencia de tres clases de estrellas:

1) La mayoría de las estrellas visibles pertenecen a la serie principal. Las densidades medias de estos cuerpos varían entre 10 y un décimo más o menos.

2) Mucho menor es el número de las gigantes y supergigantes con densidades medias bajo un centésimo hasta densidades que sólo se hallan realizadas en la estratósfera terrestre.

3) Además existen enanas blancas con densidades del orden 100,000. Hasta hoy en día se conocen sólo 5 ó 6 enanas blancas, una de ellas fué descubierta por el autor en el Observatorio de Leipzig. Según los tra-

bajos de Bottlinger, Hopmann y del que suscribe es probable que un 2% del total de las estrellas pertenece a este grupo.

Estos resultados de la observación astronómica hay que combinarlos con los resultados obtenidos por la física y la química en sus investigaciones sobre la materia bajo distintas condiciones. El estado de la materia se caracteriza por los siguientes valores de estado: presión  $P$ , temperatura  $T$  y densidad  $\rho$ . Entre éstos existe como relación universal la ecuación de estado de Van der Waal, que nos da las variaciones de uno de los valores de estado, si se varían los otros dos. Pero la ecuación de estado es distinta para distintos intervalos de presiones y temperaturas.

Hasta temperaturas de un millón de grados y hasta presiones de 100 millones de atmósferas encontramos la materia en su estado conocido en la tierra, es decir, en forma sólida, líquida o en forma de un gas atómico. Los componentes de la materia son, en este caso, los átomos y las combinaciones químicas.

Aumentando la temperatura y la presión llega un momento en que comienza una destrucción del átomo, fenómeno que llamamos ionización. El resultado de la ionización completa es la división de cada átomo en un núcleo que, prácticamente, reúne la masa total, y en un número de electrones, prácticamente sin masa, el cual depende de la naturaleza del elemento en cuestión. El número de electrones, como sabemos es, por ejemplo, para un hidrógeno igual a 1, para fierro igual a 26 y

para uranio igual a 92. Por consiguiente, hay en todos los gases ionizados un excedente de electrones. En tal caso hablamos de un gas electrónico. Para estos gases conocemos también la ecuación de estado.

Si se aumenta aun más la temperatura o la presión sobre los límites que caracterizan un gas electrónico, se destruyen los núcleos mismos del átomo. Los átomos se destruyen en sus protones y neutrones, ambos con la masa uno, el protón además con carga eléctrica positiva, el neutrón sin carga eléctrica. Aplastando completamente los núcleos atómicos obtenemos el gas electrónico-protónico. El estado extremo en el que se tocan mutuamente todas las partículas, es llamado «embalaje denso».

Estos son nuestros conocimientos sobre los posibles estados de la materia. Si los aplicamos a las estrellas podemos constatar lo siguiente:

1) Para cada uno de los estados mencionados conocemos la ecuación de estado, mediante la teoría física basada en los experimentos. Estas ecuaciones de estado nos dan las relaciones entre presión, temperatura y densidad.

2) Por consiguiente, podemos deducir matemáticamente las relaciones que existen en el interior de una estrella, si nos es dado observar entre cuales intervalos se mueven los valores de estado de la estrella.

Importante es el hecho de que podamos calcular un límite inferior de presión en el interior de una estrella, sólo usando el conocimiento de diámetro y de masa

estelar. Porque la presión igual al peso de las capas situadas sobre el punto en estudio. Así se encuentra para la presión en el centro del sol el valor de 450 millones de atmósferas y para la presión solar media un valor de 300 millones de atmósferas.

Si se aumenta la densidad estelar hacia el interior de una estrella, se aumentan también las presiones. Por eso nuestros resultados representan valores mínimos. Para las estrellas de la serie principal obtenemos presiones medias entre 50 millones y mil millones de atmósferas, para las gigantes valores de una a mil atmósferas y para las enanas blancas presiones medias del orden de cien billones de atmósferas.

Combinando estos valores con nuestro concepto sobre los estados de la materia, resulta: Las estrellas de la serie principal se encuentran en estado de gas electrónico. Las gigantes se encuentran en la transición entre gas atómico y gas electrónico y las enanas blancas entre el estado de gas electrónico y el de gas electrónico-protónico.

Con esto tenemos los fundamentos más importantes para una teoría sobre la constitución interna de las estrellas. Estos fundamentos son fundamentos seguros, porque son el producto de observaciones sólidas y de conocimientos seguros sobre el átomo. De aquí que nuestras afirmaciones sobre los posibles estados de la materia en el interior de una estrella tengan un alto grado de certeza.

Es en las estrellas donde encontramos realizados los

valores máximos de presión, temperatura y densidad en el cosmos. Pero existen además en el universo valores mínimos que no podemos representar en los laboratorios terrestres. Estas formas de materias las encontramos en las nebulosas gaseosas. Mientras los espectros estelares son espectros continuos con algunas rayas de absorción, los espectros de estas nebulosas planetarias están formadas sólo por algunas líneas de emisión. Esto nos demuestra que aquí no se trata de una simple luminosidad producida por la temperatura, sino de algo muy distinto. Las causas de estos espectros nebulosos quedaron desconocidas por mucho tiempo, porque no se lograba identificar estas rayas de emisión con elementos terrestres. Más todavía se recurrió a un nuevo elemento «nebulio». La teoría de los átomos vino a darnos la solución del nebulio, y con ella también la comprensión del estado físico de la materia en tales nebulosas. La solución se basa en los 2 siguientes conocimientos:

1) La luminosidad de las estrellas viene de una estrella vecina, la cual «estimula» a la nebulosa, si la radiación de la estrella tiene bastante intensidad en el ultravioleta.

2) Si un gas está enrarecido de tal manera, que el tiempo entre los choques mutuos de los átomos es largo en comparación con la duración de vida de los átomos en ciertos estados producidos, los átomos tienen la posibilidad de emitir líneas espectrales que en circunstancias ordinarias son imposibles. En la estadísti-

ca de Fermi se llama a estas líneas: «líneas prohibidas».

Para la identificación de las líneas nebulosas es importante saber que, a base de las líneas conocidas de un átomo se pueden deducir también las líneas prohibidas. Gracias a esto fué posible comprobar, que las líneas características de las nebulosas corresponden a ciertos estados del oxígeno y nitrógeno ionizado. El nebulio, elemento tan raro como desconocido, no es otra cosa que aire ordinario.

Establecidos estos conceptos nos es posible entonces determinar la temperatura de la estrella estimulante y la densidad de la materia en la nebulosa. Los resultados obtenidos en esta determinación presentan las siguientes características para una nebulosa planetaria. La densidad media es del orden  $3 \cdot 10^{-29}$  g/cm.<sup>3</sup>, es decir en término medio se encuentran 1,500 átomos en 1 cm.<sup>3</sup> El largo medio de camino libre es de 20 millones de kms. o sea 1/7 del radio de la órbita terrestre. Esto quiere decir, que 2 átomos de la nebulosa chocan sólo cada 29 días, aunque sus velocidades son de 8 kms, por segundo, lo que corresponde a una temperatura de 10,000 grados. Sea recalcado aquí, que este largo de camino libre es de una millonésima parte de 1 mm. para el aire de 0° de temperatura y presión de una atmósfera, de tal manera que las moléculas del aire chocan entre sí 5,000 millones de veces por segundo. El máximo de vacío que podemos alcan-

zar en nuestros laboratorios deja una materia 100,000 veces más densa que la de estas nebulosas.

Posiblemente muchos dudarán y con razón, de que una materia tan enrarecida pueda ser vista por nosotros. Pero tenemos que considerar, que una nebulosa como las aquí tratadas por sus enormes dimensiones vendría a corresponder a un tubo de Geissler de laboratorio de unos 10 billones de kms. de largo, es decir de un largo 100,000 veces mayor que la distancia que separa al sol de nosotros. En una capa de semejante grueso existen todavía los átomos suficientes que permitan observar una luminosidad suficientemente intensa; aunque la densidad de la materia sea tan reducida.

Se hace necesario ahora recordar lo siguiente: el espectro típico de una nebulosa lo tenemos sólo cuando la estrella estimulante tiene una temperatura de más de 30,000°. Esta temperatura se halla evidentemente realizada en las estrellas centrales de las nebulosas planetarias; pero conocemos además otras nebulosas en cuyas cercanías sólo se encuentran estrellas de menor temperatura. En el último caso las nebulosas brillan sólo con luz reflejada y dan el mismo espectro de las estrellas vecinas. En este caso podemos decir muy poco acerca de la constitución interna de la nebulosa; porque la pura reflexión imprime al espectro escasamente las cualidades específicas de la materia reflectora.

Las estrellas centrales, que estimulan a las nebulosas planetarias constituyen todavía un enigma para la

ciencia astronómica. Mientras no tengamos observaciones más detalladas y especialmente mientras no conozcamos las masas de estas estrellas no sabremos a qué grupo habrá que agruparlas. Parece que tienen luminosidades relativamente pequeñas a pesar de sus altas temperaturas. Esto exigiría que considerásemos a las estrellas centrales como pertenecientes a las enanas blancas.

Para concluir quisiera hablar sobre la materia en el espacio interestelar. En los últimos años, esta materia ha adquirido en la Astronomía una gran importancia debido a que su presencia en el espacio vendrá a rectificar probablemente nuestro concepto sobre la extensión del universo. Tanta importancia se le ha dado que dió motivo para que el año pasado se celebrara en París un *colloquium* en cuya tabla se hallaba anotado como tema único: «la materia interestelar». Sabemos además que el espacio está en todas partes lleno de materia oscura. El conocimiento de la existencia de una materia que se presenta sin luminosidad alguna lo hemos ganado de la experiencia hecha en la luz estelar que acusa cualidades adquiridas cuando ha sido atravesada por esta materia. Así en los espectros de muchas estrellas se observan rayas de asociación que no pueden tener su origen en la atmósfera estelar misma, sino que le tienen que haber sido estampadas al espectro en su camino de la estrella hacia nosotros. Conocemos 2 rayas del calcio ionizado, las rayas D del sodio y desde hace poco tiempo conocemos una serie de

rayas metálicas en el ultravioleta, las cuales pertenecen a la materia interestelar. En esto, se puede apreciar, hasta dónde ha llegado la ciencia. Ya comienza hoy día, a hacer el análisis espectral de materia que no podemos ver.

Ahora bien, podemos entrar a calcular, cuál será la densidad media de la materia entre las estrellas. Para no entrar en contradicciones con los movimientos estelares observados, la masa total de la materia interestelar invisible no debe ser mucho mayor que la de las estrellas luminosas. Esta consideración nos conduce a una densidad maximal de  $10^{-24}$ , gr./cm.<sup>3</sup>, lo que corresponde más o menos a 1 átomo de hidrógeno por cm.<sup>3</sup> De la intensidad de las rayas del calcio, intensidad que aumenta con la distancia de nosotros, se ha deducido una densidad media de los átomos ionizados del calcio de  $10^{-32}$  gr/cm.<sup>3</sup> Pero estos átomos ionizados del calcio forman sólo una parte fraccionaria de la materia la cual se compone de átomos neutrales y átomos ionizados de distintas clases.

Varias consideraciones sobre la mezcla de los átomos nos inducen a aceptar valores de densidad media de la materia interestelar del orden  $10^{-26}$  gr/cm.<sup>3</sup>, es decir, que en 3,000 cm.<sup>3</sup> se encuentra un átomo. El largo medio de camino libre es entonces del orden de las mutuas distancias estelares, es decir del orden de unos 10 años luz. El tiempo ocurrido entre dos choques atómicos sube con esto a un millón de años.

Estos números nos representan el enorme vacío del

espacio. Para los que consideren fantásticas estas deducciones, me permito llamar la atención en:

1) La sensibilidad inmensa del análisis espectral, usado también en nuestros laboratorios para determinar una billonésima parte de mgr. de una substancia.

2) El largo camino que tiene que atravesar la luz estelar hasta llegar a la tierra. Según las densidades citadas una columna con un corte transversal de  $1 \text{ cm.}^2$  y de un largo de 1,000 años luz, contiene cerca de un medio billón de átomos de calcio. Este número corresponde a  $3$  por  $10^{-8}$  mgr. de calcio, cantidad que es mil veces más que la que necesitamos para comprobarla.

Debido sólo a este vacío existente llega hasta nuestra tierra la luz desde distancias de millones de años luz sin apagarse totalmente, esta luz que nos cuenta del estado físico de las estrellas, de los cúmulos y de las nebulosas.

La definición de temperatura pierde su sentido, tratándose de la materia interestelar. Si tomamos la temperatura a base de la radiación de esta materia oscura, resultan sólo unos  $3^{\circ}$  absolutos. Pero si definimos la temperatura por su cualidad que ioniza a los átomos, podemos decir, que el espacio está lleno de una radiación, cuya temperatura es igual a la temperatura efectiva media de las estrellas, lo cual no da una temperatura de  $10,000^{\circ}$ . Esta es la temperatura que debemos considerar si queremos saber lo que pasa en la materia.

Las ideas expuestas aquí constituyen sólo lo indispensable para la comprensión del concepto que hoy se tiene del estado de la materia en el cosmos. Quisiera sin embargo repetir que para llegar a las conclusiones aquí citadas, el astrónomo moderno sólo se apoya en los resultados comprobados por los físicos y químicos. De aquí que querer reemplazar estos conceptos significa abandonar los límites de ciencia exacta.

Los resultados expuestos son a la simple vista fantásticos. Pero la astronomía no los trata para dar juego a la fantasía. El hombre y especialmente el hombre de ciencia siente una necesidad irresistible de penetrar en los secretos de la naturaleza. Estudia, investiga, busca, cuántas veces inútilmente. Sólo de vez en cuando logra satisfacer en parte su insaciable sed de verdad con el descubrimiento de un secreto mínimo que significa para él toda la recompensa de sus esfuerzos.