

EL FENOMENO DE LA EMISION CONTINUA Y LAS  
FUENTES DE LA ENERGIA ESTELAR

V. AMBARTSUMIAN.

Sobretiro

Astronomía Popular

Nº 2 — 1955

MEXICO, D. F.

# EL FENÓMENO DE LA EMISIÓN CONTINUA Y LAS FUENTES DE LA ENERGÍA ESTELAR\*

V. Ambartsumian

HASTA hoy, nuestros conceptos acerca de la naturaleza de las fuentes de energía estelar han tenido un carácter puramente teórico. Se ha supuesto siempre, que estas fuentes funcionan sólo en capas bastante profundas de las estrellas y, por lo tanto, ocultas completamente a la observación directa. Por lo mismo, es natural que los investigadores adoptaran el método de construir diversos "modelos" estelares, basados en diferentes suposiciones respecto a la naturaleza de las fuentes de energía estelar.

Desgraciadamente no se puede decir que este método haya tenido éxito. La hipótesis de las reacciones termo-nucleares, aceptada hasta este momento como la fuente de energía estelar, no ha producido fructíferos resultados. Es suficiente señalar que, para la explicación de cada punto en el diagrama espectro-luminosidad, es necesario escoger los valores de dos parámetros —masa y contenido de hidrógeno— sin fundamentar la razón por la cual los pares de valores asignados a estas magnitudes se encuentran mucho más frecuentemente en la naturaleza que otros cualesquiera. Más aún, es necesario cambiar las conjeturas concernientes al estado mecánico de las capas internas de las estrellas. Si a ésto agregamos el hecho de que la teoría, basada en estas suposiciones, no ha predicho un solo hecho nuevo y, por lo tanto, no ha prestado ayuda a la observación, es claro, entonces, que la gigantesca labor realizada en el desarrollo y discusión de multitud de modelos posibles no ha rendido los resultados que se esperaban.

La situación en este dominio, puede ser comparable con la del estado en que se encontraba el problema del origen de las estrellas antes de que se comenzaran a investigar las asociaciones estelares —cuando se lanzaban diferentes hipótesis acerca de la condensación de estrellas a partir del material interestelar y sobre el mecanismo de acrecentamiento, por las estrellas, del propio material interestelar— hipótesis que no estaban basadas en los resultados observacionales. (1)

\* Publicado en "Trabajos del Observatorio de Burakan", Academia de Ciencias de la República de Armenia, Erevan, fascículo 13, 1954.

Traducción de Adolfo S. Vázquez, Observatorios de Tonantzintla y Tacubaya.

A nosotros nos parece que, así como en la esfera de los problemas concernientes al origen de las estrellas un análisis de los datos observacionales condujo a interesantes resultados, relativos al proceso de formación estelar, que aún continúa en la galaxia, así también, uno puede esperar que, en el problema de la naturaleza de las fuentes de energía estelar, muchas preguntas importantes puedan ser contestadas apoyándose en la observación.

Para este propósito sólo es necesario seleccionar correctamente, entre los innumerables datos de observación de la astrofísica contemporánea, aquéllos hechos en los cuales se manifiestan, en forma más directa, los procesos de surgimiento de energía estelar interna (energía intraestelar). Obviamente se necesita, antes que nada, dirigirse a las estrellas no estacionarias y, en particular, a aquéllas que son tan jóvenes que puedan ser consideradas dentro del número de las que aún están en proceso de formación (por ejemplo, estrellas del tipo T Tauri) y, también, a los procesos no estacionarios en aquellas estrellas que son, en general, consideradas como estacionarias (por ejemplo, el Sol).

El presente trabajo no pretende resolver el problema de las fuentes de energía estelar. Su mira consiste en llamar la atención sobre ciertos hechos que tienen una relación directa con los procesos de surgimiento de la energía intraestelar y cuyo análisis nos permite delinear un nuevo método para la solución de este problema.

## I.—EMISIÓN CONTINUA EN EL ESPECTRO DE CIERTAS ESTRELLAS VARIABLES DE BAJA LUMINOSIDAD.

Ciertas clases de estrellas variables de baja luminosidad, se caracterizan por el hecho de que un número considerable de representantes de estas clases muestran, de cuando en cuando, una fuerte emisión continua. Los ejemplos más obvios de este fenómeno son ofrecidos por los cambios observables en el espec-

tro de la estrella variable UV Ceti y estrellas parecidas a ella. Como han demostrado, por primera vez, *Joy y Humason*,<sup>(2)</sup> el espectro de esta estrella (el cual normalmente corresponde al tipo dM5e) fue completamente cubierto por la *emisión continua* brillante que apareció durante la ráfaga del 25 de Septiembre de 1948. Como resultado, las líneas de absorción habituales se volvieron casi invisibles como consecuencia de la pérdida de contraste. Junto con éste, aparecieron línea de emisión de He y HeII, fortaleciéndose las líneas brillantes del H. A juzgar por la distribución de la energía, la emisión continua, que apareció durante la ráfaga, difiere del espectro continuo normal de las enanas frías por su color más azul.

Una consideración sobre los datos relativos a las ráfagas de las estrellas del tipo UV Ceti, nos obliga a rechazar la hipótesis de que la emisión continua observada podría tener un origen térmico. De hecho, si la ráfaga estuviera conectada con el aumento de la temperatura de cualquier parte de la fotosfera de la estrella, como consecuencia de un flujo de calor proveniente desde el interior, entonces sería imposible explicar la sorprendentemente corta duración de estas ráfagas. Es suficiente señalar que la ráfaga de la estrella UV Ceti, en Octubre 25 de 1952, tuvo una duración total de dos minutos. Por otro lado, el brillo de la binaria estelar, de la cual UV Ceti forma parte, aumentó en 1.6 magnitudes estelares en un intervalo de sólo 7 segundos, por lo que podemos concluir que el brillo de la variable misma aumentó aún más durante estos 7 segundos. En otra ocasión, el 17 de Septiembre de 1952, el brillo de la binaria creció 3.4 magnitudes en 15 segundos y toda la ráfaga duró 4 minutos.<sup>(3)</sup> Es evidente que un calentamiento de la fotosfera en cualquier lugar, debido al flujo de calor desde el interior, debiera prolongarse mucho más y, además, no podría debilitar enseguida, tan poderosamente, todas las líneas de absorción. La única salida posible es suponer que la radiación continua se origina en una capa ópticamente delgada, en las capas más exteriores de la estrella, de modo que no puede hablarse de la formación de líneas de absorción sobre el fondo de esta emisión continua. Al mismo tiempo, la aparición de líneas de emisión durante la ráfaga, nos obliga a pensar que la fuente de emisión continua se halla más bien en las capas superiores de la cromósfera estelar.

La cantidad de energía emitida por las ráfagas de estrellas de tipo UV Ceti, en forma de emisión continua, es tan grande que el brillo de la estrella en la región fotográfica suele crecer decenas de veces y en ocasiones hasta centenas. Aún si consideramos que el máximo de radiación de las estrellas del tipo M5 se encuentra en la región infraroja del espectro, así como la posibilidad de que la emisión continua en el infrarojo sea débil resulta, sin embargo, que la radiación total (bolométrica) de la estrella crece, durante el tiempo de la ráfaga, varias veces por lo menos. Es evidente que tan grandes cantidades de energía no puedan surgir en las capas exteriores como consecuencia de una redistribución de energía dentro de la atmósfera. Debemos, por lo tanto, suponer que la energía de la emisión continua, que forma la parte básica

de la energía en la ráfaga, *es transmitida en alguna forma desconocida* (no por medio de transporte térmico o radiativo) *desde las capas internas de la estrella a las regiones más externas de la atmósfera*. Debe uno suponer que la energía puede ser transmitida de las capas interiores al exterior, por medio de una expulsión directa de la materia intraestelar, que es la portadora de la energía intraestelar.

La emisión continua que vela las líneas de absorción es también característica de muchas estrellas del tipo T Tauri, especialmente cerca del máximo de brillo de estas estrellas. En su último artículo, *Joy*.<sup>(4)</sup> resumiendo sus extensas investigaciones acerca de las variables del tipo T Tauri, señala que es generalmente durante el tiempo del máximo de brillo de estas estrellas que la aparición y fortalecimiento de las líneas de emisión "... está acompañada de un espectro continuo de intensidad considerable, superpuesto al espectro normal con líneas de absorción y velando, de esta manera, todo el espectro más o menos completamente".

Daremos algunos ejemplos que demuestren cómo se manifiesta la emisión continua en estrellas del tipo T Tauri.

Ejemplo N° 1.—En el espectro de la estrella UZ Tauri (que pertenece al tipo T Tauri) las líneas de absorción son generalmente débiles, como consecuencia de la superposición de la emisión continua. Sin embargo, a veces, como consecuencia de la intensificación de la emisión continua, desaparecen completamente. Por ejemplo, ésto ocurrió, de acuerdo con las observaciones de *Joy*, el 28 de Diciembre de 1942 y el 4 de Enero de 1944.<sup>(5)</sup> De acuerdo con el catálogo de estrellas variables de *Kukarkin-Parenago*,<sup>(6)</sup> el brillo de esta estrella varía entre los límites 11.7 y 14.9. Esta amplitud de 3.2 magnitudes es normal en estrellas del tipo T Tauri. Sin embargo, *Bolin* (en 1921) y *Esch* (en 1942) observaron máximos de brillo de esta estrella superiores a 9.5 magnitudes. De esta manera la estrella que, de acuerdo con *Hoffliet* normalmente experimenta un cambio irregular de brillo que varía desde 13.5 a 14.5, ocasionalmente experimenta ráfagas bastante intensas. Por lo tanto, en este caso tenemos la presencia simultánea de fuertes máximos de brillo y de intensa emisión continua.

Ejemplo N° 2.—En su investigación de la estrella RW Aurigæ (la variabilidad de la cual fue descubierta, como es bien sabido, por *L. P. Tserasakaia*,<sup>(10)</sup> en Moscú), *Herbig*<sup>(11)</sup> llegó a la conclusión de que su espectro se obtiene como resultado de la suma de dos componentes: un espectro normal de tipo dG5 y de un espectro continuo de emisión de "naturaleza desconocida".

Ejemplo N° 3.—En las Nubes Oscuras del Toro, en la pequeña nebulosa brillante B10, que tiene forma de cometa, se observa una estrella de magnitud 15 cuyo espectro, a juzgar por su luminosidad, debería corresponder a K5 e inclusive a una subdivisión espectral más tardía. Sin embargo, de acuerdo con *Struve y Swings*,<sup>(12)</sup> su espectro resultó completamente continuo, sin líneas de absorción perceptibles. Las últimas están completamente veladas por emisión

continua. La variabilidad de esta estrella, fue establecida por *Himpel. Kholopov* <sup>(2)</sup> que investigó esta estrella con placas tomadas en Moscú, confirmó su variabilidad incluyéndola en la clase T Tauri. La variable recibió la designación DD Tauri.

Struve y Swings subrayan, especialmente, la intensidad de la región de corta longitud de onda del espectro continuo de esta estrella, de donde se infiere que su color se acerca al azul. Este hecho es tan inaudito que surge involuntariamente la suposición de que esta estrella es una enana blanca. Sin embargo, la variabilidad de la estrella, así como la presencia de líneas de emisión intensas, características de las estrellas de tipo T Tauri, nos obliga, inmediatamente, a rechazar semejante suposición. Además de las 14 intensas líneas de emisión de H, se observan otras líneas de emisión en el espectro de la estrella que se investiga. Más aún; la estrella DD Tauri tiene una compañera que es también una estrella del tipo T Tauri, un fenómeno muy característico en las estrellas de tipo T Tauri, que excluye la posibilidad de suponer que los objetos investigados sean estrellas normales de la secuencia principal que se han introducido en la nebulosa difusa. Por lo tanto, la conclusión inevitable es que la estrella DD Tauri debe su color a la presencia de emisión continua, ésto es, la emisión continua tiene, en el ejemplo dado, un marcado color azul.

Ejemplo N° 4.—En 1935, *I. N. Balanovskaia*, <sup>(7)</sup> en Pulkova, descubrió en el Toro un objeto de brillo variable que más tarde resultó ser una estrella doble, <sup>(8)</sup> siendo ambas componentes variables del tipo T Tauri. Estas variables recibieron la denominación DH Tauri y DI Tauri. La estrella DH Tauri tiene casi la misma magnitud aparente que DD Tauri. La estrella DH Tauri es también muy parecida a DD Tauri en los siguientes aspectos:

a) Tiene una compañera —la estrella DI Tauri— que es también una variable T Tauri.

b) En el espectro de la estrella DH Tauri, la serie de Balmer es intensa y se extiende hasta H 14. Según testimonio de *Joy*, <sup>(9)</sup> el espectro de la estrella está fuertemente velado por una radiación intensa que se extiende hasta el ultravioleta lejano. Obviamente, en este caso también, el color azul de la emisión continua no deja lugar a dudas. Por otro lado, es interesante notar que las líneas de absorción en el espectro de la compañera no estuvieran veladas del todo en el momento de la observación de Joy. Además, las líneas de emisión del H eran extremadamente débiles en la compañera.

Ejemplo N° 5.—Las estrellas variables con líneas de emisión en la Nebulosa de Orión tienen, como regla, líneas de absorción veladas en sus espectros (*Herbig*, <sup>(13)</sup>) Sin embargo, el problema de si los cambios observados en el brillo de estas estrellas se debe exclusivamente a la emisión continua, no está claro todavía. Como ha demostrado *Parénago*, <sup>(14)</sup> un incremento en el brillo de la estrella T Orionis está acompañado de la disminución del índice de color. Esto concuerda con la hipótesis de que la emisión con-

tinua juega un papel fundamental en el crecimiento del brillo. Por otro lado, una elevación en temperatura debe producir un efecto cualitativo idéntico. Así pues, el problema requiere un estudio posterior.

Si, en el caso de estrellas del tipo UV Ceti, el incremento en brillo puede ser atribuido básicamente, a la emisión continua, en el caso de las estrellas del tipo T Tauri el cuadro no aparece tan claro y simple. Un incremento en el brillo no está acompañado por un incremento paralelo en la radiación continua en todas las estrellas del tipo T Tauri. En algunas de ellas no se observa del todo el velo en las líneas de absorción, lo cual obviamente indica la debilidad de la emisión continua. Esto significa que un cambio de brillo está en algunos casos condicionado, parcialmente, por un cambio en la temperatura de la estrella y, en otros, casi condicionado completamente por el cambio en la temperatura. Exactamente de la misma manera no hay un paralelismo completo entre los cambios de intensidad de las líneas de emisión y de la emisión continua. Así, por ejemplo, una de las estrellas más sobresalientes (a juzgar por la intensidad de las líneas de emisión del espectro) XZ Tauri (cuya variabilidad fue establecida por *P. F. Shajn* <sup>(15)</sup> en 1928, en Simeis) no se distingue por una gran intensidad de la emisión continua. Es interesante notar que aun durante el mínimo de brillo, esta estrella tiene un espectro excepcionalmente rico en líneas de emisión. <sup>(5)</sup> De cualquiera forma, son visibles en el espectro, de cuando en cuando, líneas de absorción y aún bandas de TiO en absorción.

Todo lo anterior nos obliga a sacar la siguiente conclusión: Las variaciones en el brillo de las estrellas de tipo T Tauri están conectadas con la descarga de energía radiante complementaria en tres formas diferentes: a) radiación térmica, conectada con una elevación en temperatura, b) energía de líneas de emisión y c) emisión continua. Estos procesos, en gran medida, van acompañados unos de otros.

Es completamente natural que estas tres formas de descarga de energía sean consideradas como efecto de una misma causa que se manifiesta, sin embargo, con diferentes variantes.

Así pues, si nos adherimos a la hipótesis propuesta en relación con las estrellas de tipo UV Ceti, esto es, si nos adherimos a la conjetura de que *la expulsión, desde las capas internas de la estrella, de alguna parte de la materia intraestelar, que es la fuente de energía intraestelar, juega un papel en estos fenómenos*, entonces podemos suponer que las tres variantes arriba mencionadas pueden ser explicadas por el hecho de que la liberación de energía, por la masa expelida, puede ocurrir a diferentes niveles de la atmósfera de la estrella.

En los casos en que la liberación de la energía se produce en las capas exteriores de la cromósfera o sobre estas capas, tenemos la radiación de emisión continua, que vela las líneas de absorción y cuyo mecanismo de formación es el mismo que en las estrellas de tipo UV Ceti.

En aquellos casos en que la liberación de energía ocurre en las capas inferiores de la cromósfera o en la capa inversora, una parte de la energía es liberada en

forma de radiación continua (la cual puede estar superpuesta a las líneas de absorción) y otra parte se emplea en la producción de líneas de emisión del H y de otros átomos.

Cuando la energía considerada se desprende en las capas exteriores de la fotosfera, tenemos entonces una mezcla de radiación térmica y no térmica; ésta última puede provocar también la aparición de líneas de emisión.

Por último, cuando la energía considerada se libera en las capas profundas de la fotosfera debemos observar, en lo fundamental, sólo la elevación de la radiación térmica, en tanto que los cambios espectrales no deben tener un carácter tan violento como en los casos precedentes.

Sabemos que en todas las estrellas que muestran cambios de brillo del tipo T Tauri (o RW Auriga) tienen líneas de emisión en el espectro. Así pues, según *Herbig*,<sup>(16)</sup> sólo la mitad de las estrellas variables de la Nebulosa de Orión tienen, en el espectro, la línea de emisión H, en tanto que en la asociación T, cerca de S Monóceros, el 70% de las variables muestran H en emisión. Aunque estos datos requieren una mayor precisión (necesaria tanto a causa de la imperfección de los datos espectrales en las estrellas débiles, como a consecuencia de la desaparición temporal de la línea H), podemos afirmar, fundándonos en la idea desarrollada antes, que, en muchas estrellas de las dos asociaciones arriba mencionadas, la liberación de energía ocurre, principalmente, en las capas fotosféricas profundas, a consecuencia de lo cual no aparecen líneas visibles de emisión.

Hagamos notar que si en el caso de las estrellas del tipo UV Ceti, la materia expelida desde las profundidades de la estrella, y que emite energía, se consume en un período de tiempo muy corto y es incapaz de mantener el brillo acrecentado por un intervalo mayor de media hora; en el caso de las estrellas de tipo T Tauri debemos suponer un mucho mayor período de consunción, esto es, debemos suponer la posibilidad de una radiación prolongada como consecuencia de la energía suplementaria emitida. Gracias a esto, las ondas en la curva de luz, que corresponden a diferentes expulsiones, muy frecuentemente se superponen una a la otra y así tenemos el cambio irregular de brillo característico de las estrellas de tipo T Tauri. Por lo tanto, podemos imaginar que en estrellas individuales del tipo T Tauri (por ejemplo DD Tauri), las expulsiones anteriormente indicadas ocurren tan frecuentemente, acompañadas por emisión continua, que las líneas de absorción en sus espectros están casi siempre veladas.

## II.—NEBULOSAS COMETARIAS Y LAS CAUSAS DE LOS CAMBIOS EN ELLAS.

Si bien las nebulosas planetarias han sido estudiadas detalladamente (cientos de trabajos han sido dedicados a su teoría física), en cambio han sido muy poco estudiados otros tipos de objetos pequeños, —las nebulosas cometarias—. Si no se toman en cuenta las envolturas delgadas expelidas por las novas, las ne-

bulosas cometarias constituirían el único tipo de nebulosas cuyos representantes, en muchos casos, son objetos variables.

Lo que salta a la vista es que la mayoría de las nebulosas variables conocidas, si no todas, están conectadas con estrellas de tipo T Tauri, o con objetos afines a ellas. El ejemplo clásico de esto, es la nebulosa Hind (NGC 1555 cerca de la estrella T Tauri). Esta nebulosa, descubierta en 1852, era en ese tiempo un objeto visible; hacia 1861 se había debilitado tanto que sólo podía ser distinguida con potentes telescopios. En 1868 había desaparecido por completo. Desde 1890 fue observada de nuevo, al principio como un objeto débil, pero alcanzando más tarde un brillo notable. La nebulosa tiene un espectro continuo y parece natural suponer que se trata de una nebulosa de reflexión. Esta hipótesis, sin embargo, no puede ser aceptada puesto que los cambios de brillo de la nebulosa, particularmente en el período de su desaparición, no concuerdan con los cambios en brillo de la propia estrella T Tauri (de la cual se halla, en proyección, a una distancia de 40" aproximadamente). Si la distancia espacial no supera en mucho a la distancia en proyección, entonces la luz de la estrella deberá tardar en llegar a la nebulosa varios meses y, por lo tanto, la nebulosa debería repetir —con una diferencia de fase del orden de varios meses (lo que dependería de la orientación)— los cambios en brillo de la estrella. Este fenómeno no se advierte con seguridad. Es también obvio que esta situación tampoco se puede explicar mediante cambios reales en la nebulosa misma. En realidad, para que esto sucediera sería necesario suponer el desplazamiento de las masas que la componen a una velocidad de decenas de miles de kilómetros por segundo, o más. Más difícil aún de comprender es el restablecimiento de la nebulosa en el lugar anterior, aunque en forma un tanto modificada. Es evidente que el fenómeno tampoco se puede explicar por radiación térmica y que es necesario imaginar algún nuevo mecanismo de excitación de la radiación continua. Como es bien sabido, el Prof. Kuiper ha demostrado que el espectro continuo de las nebulosas planetarias se explica satisfactoriamente por la radiación de dos cuantos del átomo de H, el cual ocurre durante la transición desde el estado metaestable 2s al estado normal 1s. Sin embargo, en el caso presente no hay condiciones para la realización de este mecanismo. Así pues, la radiación luminosa de la nebulosa Hind debe ser atribuida a algún mecanismo todavía desconocido.

Citemos otro ejemplo de la dificultad de explicar la radiación luminosa de las nebulosas cometarias. La nebulosa cometaria B10, está asociada con la estrella variable DD Tauri. Ya hemos descrito antes sus sorprendentes peculiaridades y, en particular, la presencia en ella de una intensa emisión continua azul. El carácter físico de la relación entre la estrella DD Tauri y la nebulosa B10 no puede provocar ninguna duda, ya que las estrellas que se encuentran detrás de B10 son casi invisibles a causa de la absorción de la luz en la Nube Oscura del Toro, y la probabilidad de una proyección accidental sobre B10, de alguna de las estrellas del fondo, es menor que 0.1. La probabi-

lidad de una proyección accidental de una estrella, tan excepcional, sobre una nebulosa tan pequeña dimensionalmente como B10, es aún menor. Según *Struve y Swings*,<sup>(12)</sup> la nebulosa tiene un espectro continuo. Sin embargo, al tratar de comprobar si se cumple la relación de Hubble, los autores determinaron que, para iluminar la nebulosa B10 en toda la extensión en que brilla, el brillo aparente de la estrella DD Tauri debería ser 7 magnitudes mayor que el observado en realidad. El color azul de la estrella excluye la posibilidad de suponer una absorción muy fuerte de su luz. Por ello es necesario renunciar a la hipótesis de la reflexión de la luz de la estrella por la nebulosa y admitir que, en el presente caso, nos encontramos ante un mecanismo desconocido de emisión continua. Sin embargo, el hecho de que las dos nebulosas cometarias que hemos descrito, estén asociadas precisamente con estrellas del tipo T Tauri demuestra que en último análisis la causa de iluminación en cada caso es, a pesar de todo, la estrella. Así pues, llegamos a la conclusión de que muchas de las estrellas de tipo T Tauri son capaces de crear condiciones para la aparición de radiación continua, tanto en las capas superiores de sus atmósferas, como también a una distancia considerable de ellas (a algunas decenas de parsecs). A esto hay que agregar que la intensidad del factor que provoca la radiación continua de la nebulosa varía irregularmente en forma distinta a las variaciones de brillo de la estrella misma.

Veamos algunos ejemplos más que confirman la idea, antes expuesta, sobre la luminosidad de nebulosas cometarias.

La nebulosa cometaria NGC 6729 está directamente relacionada con la estrella R Coronæ Australis. Ha quedado establecido que tampoco en este caso hay correlación definitiva entre las fluctuaciones en el brillo de la estrella y de la nebulosa, aunque la disposición y forma de la nebulosa hablan directamente de la influencia de la estrella R Coronæ Australis y, tal vez en parte, de la estrella vecina T Coronæ Australis, la cual se encuentra a una distancia aproximada de un minuto de arco de R Coronæ Australis. Según Hubble el espectro de la nebulosa NGC 6729 es continuo. Tratando de verificar la hipótesis de la reflexión de la luz de la estrella, *Whitney y Weston*, en 1946, tomaron placas de la nebulosa NGC 6729 a través de un polaroide.<sup>(17)</sup> Aunque los resultados de sus métodos no son suficientemente exactos y fueron hechos con sólo dos orientaciones del polaroide, sin embargo, sus análisis hablan más bien en contra de la polarización radial (que se infiere de la hipótesis de la reflexión de la luz) que en favor de ella.

La pequeña nebulosa cometaria descubierta por *Haro*,<sup>(18)</sup> e incluida por él en la lista (bajo el N° 13-a) de objetos peculiares, situados en la Nebulosa de Orión, presenta un considerable interés. En la cabeza de esta nebulosa se encuentra una estrella infrarroja muy débil. La nebulosa es visible en placas azules, rojas e infrarrojas, pero la estrella conectada con ella no es visible en absoluto en la placa azul, casi invisible en la roja, y se advierte sólo en la infrarroja, siendo sin embargo, más débil que la nebulosa. La

hipótesis de la reflexión, en este caso, conduce también al supuesto de que la luz de la estrella sufre un enrojecimiento tan grande, en la cabeza de la nebulosa, que la estrella se vuelve infrarroja. Sin embargo, en la región de la nebulosa de Orión tenemos un cierto número de otros objetos infrarrojos de brillo tan débil. Por eso es más natural suponer que la causa de la iluminación azul de la nebulosa es su propia radiación continua provocada por un factor desconocido que parte de la estrella. Es particularmente interesante que, en opinión de *Haro*, la parte de la nebulosa alejada de la estrella (la cola) tiene un espectro de emisión y es invisible a la luz infrarroja. Esta es una indicación directa del hecho de que la luminosidad de la nebulosa no puede ser explicada por simple reflexión. Obviamente aquí nos encontramos de nuevo con el fenómeno ya conocido por nosotros, o sea la excitación simultánea, en grados diferentes, de emisión continua y en líneas de emisión.

Así pues, podemos llegar a la conclusión de que la luminosidad de las nebulosas cometarias es explicable, por lo menos en gran parte, como el resultado de la liberación directa de la energía intraestelar (dentro de la extensión de la nebulosa), energía transferida, por medio de alguna clase de expulsión, desde las capas internas de la estrellas hacia el área de la nebulosa.

Debe señalarse que no se puede rechazar el mecanismo de reflexión en todos los ejemplos. Cuando una estrella tiene una luminosidad bastante grande, entonces la nebulosa cometaria, asociada con ella, puede estar lo suficientemente iluminada para que la reflexión de la luz estelar juegue un papel importante en su luminosidad. Aparentemente tenemos un ejemplo de esto en la nebulosa NGC 2261, asociada con R Monocerotis. Por otro lado, los cambios de brillo de la nebulosa no siguen a los cambios de brillo de la estrella. En todo caso, la amplitud del cambio de brillo de la estrella supera, con mucho, la amplitud del cambio de brillo de la nebulosa. Como ha demostrado *Greenstein*,<sup>(19)</sup> el color de la nebulosa no sigue los cambios de color de la estrella. Junto con esto, la presencia en el espectro de la nebulosa de líneas brillantes, que existen en el espectro de la estrella, hablan del importante papel jugado por la reflexión. Es de suponer que el papel jugado por la luz reflejada crece durante la elevación del brillo absoluto de la estrella.

En favor de la explicación propuesta habla también el hecho de que la misma estrella provoque, en tiempos diferentes, la luminosidad de diferentes objetos situados en diversos lugares. Tenemos presente el descubrimiento (hecho en 1868, en Pulkova, por Otto Struve) de la nebulosa NGC 1554 situada a tres minutos de arco de T Tauri. Dicha nebulosa fue observada hasta 1877, es decir, precisamente en el período en que la nebulosa de Hind no era visible. Desde entonces no ha vuelto a ser observada y ni siquiera es visible en las mejores fotografías de nuestro tiempo. La aparición y desaparición de la nebulosa de Struve no puede ser explicada, en modo alguno, partiendo de la hipótesis de la reflexión.

En todos los casos de variabilidad de las nebulosas cometarias, conectadas con estrellas del tipo T

Tauri, se observa la peculiaridad de que las fluctuaciones en la nebulosa requieren intervalos de tiempo mucho más prolongados (en la mayoría de los casos se requieren años) que los períodos durante los cuales cambia el brillo de las propias estrellas T Tauri. Esto demuestra que, en el caso de nebulosas cometarias, la porción de energía liberada es disipada en forma de radiación, en un intervalo de tiempo mucho más largo que en las atmósferas estelares.

Tanto el hecho antes mencionado, de la excitación sucesiva de luminosidad en las dos nebulosas situadas de diferente manera respecto a T Tauri, así como la forma misma de una gran parte de las nebulosas cometarias, nos dicen que el factor que provoca la luminosidad puede ejercer, en el presente caso, una acción en determinada dirección. La tendencia en este caso es explicable, por una parte, por la dirección del lanzamiento de la materia intraestelar y, por el otro, por la distribución de la materia alrededor de la estrella.

Al finalizar esta sección citaremos algunas estrellas más del tipo T Tauri asociadas con nebulosas cometarias. Estas son: BM Andrómeda, RY Tauri, DG Tauri y NK Orionis. Esta última, por el carácter del espectro de la estrella y por los cambios de brillo, puede ser incluida en el tipo XX Ophiuchi. Sin embargo, como señala justamente *Kholopov*,<sup>(8)</sup> entre las estrellas de tipo T Tauri y XX Ophiuchi no hay gran diferencia por lo que pueden ser agrupadas en una misma clase.

Un número considerable de estrellas del tipo T Tauri se encuentra en diferentes nebulosas brillantes y difusas (Orión, NGC 2264, NGC 7023 y otras), formando en ellas ricas asociaciones T. Realmente, las variables situadas en el Toro, incluyendo variables como DD Tauri, T Tauri, DG Tauri y RY Tauri, que están asociadas con nebulosas cometarias, forman parte de la gran nebulosa oscura del Toro, constituyendo una gran asociación compuesta de varios grupos, investigados en detalle por *Kholopov*. Surge la pregunta de que si en las nebulosas brillantes difusas que contienen grandes grupos de estrellas del tipo T Tauri habrá algunas que, junto con las últimas, contengan también pequeñas nebulosas cometarias. Es completamente natural que el descubrimiento de tales nebulosas cometarias sea mucho más difícil en el caso de nebulosas brillantes que en el caso de nebulosas oscuras. Sin embargo, el examen de los datos observacionales que tenemos demuestra que la tarea no es completamente infructuosa.

### III.—INCLUSIONES COMETARIAS EN NEBULOSAS DIFUSAS BRILLANTES.

1.—*Nebulosa IC 405*.—A primera vista esta parece ser una nebulosa gaseosa normal. El hecho de que contenga a la estrella AE Aurigæ, que tiene un espectro de tipo O, permite suponer que la luminosidad de la nebulosa es explicable por el mecanismo ordinario de la fluorescencia. La presencia de líneas brillantes en el espectro de la nebulosa confirma esta conclusión. Sin embargo, ya *Greenstein y Henyey*<sup>(20)</sup>

confirmaron la presencia de un notable espectro continuo. Esta última circunstancia ha sido confirmada por *Gursadian*, basándose en placas tomadas con el espectrógrafo nebuloso del Observatorio de Burakan. Las fotografías de la nebulosa IC 405 se pueden encontrar en los Atlas de los Observatorios de Crimea<sup>(21)</sup> y Alma Ata.<sup>(22)</sup> Como ha demostrado *V. F. Gase*<sup>(23)</sup> el aspecto y la estructura de la nebulosa sobre placas en H $\alpha$  se distingue en forma extremadamente manifiesta de su aspecto y estructura sobre placas azules. Ciertamente, la diferencia entre las placas en H $\alpha$  y las placas azules se observa también, muy frecuentemente, en las nebulosas difusas. Sin embargo, esto se debe a que generalmente las partes más débiles en la periferia de una nebulosa gaseosa aparecen en placas en H $\alpha$ . En algunos casos por el contrario (por ejemplo en el caso de la nebulosa Trífida), la nebulosa gaseosa tiene una prolongación en forma de una nebulosa de polvo la cual da un espectro continuo, siendo visible solamente a los rayos fotográficos; pero, en el presente caso, la diferencia consiste en que, en las placas azules se ve que desde la estrella AE Aurigæ se prolonga un hilo brillante y delimitado en forma bastante acusada, curvado en arco, en tanto que este destacado detalle no es visible, en absoluto, en las placas en H $\alpha$ . Carece de fundamento suponer que la luminosidad del hilo puede ser provocada, en lo fundamental, por la radiación de otras líneas brillantes, que se encuentran también, al parecer, en los espectros de las nebulosas difusas. En realidad, puede tratarse aquí sólo del doblete  $\lambda 3727$  (O II). Pero una iluminación particularmente fuerte de esta línea, en aquella parte del hilo más cercano a la estrella AE Aurigæ, es difícil de suponer puesto que, en esa parte, el O debe estar completamente ionizado por segunda vez. Por eso, es más natural suponer que el espectro del hilo es en gran medida continuo, semejante al espectro de la nebulosa cometaria. La similitud del hilo examinado con las nebulosas cometarias radica además, no sólo en que el hilo se desprende de la estrella, sino también en que la estrella misma es variable.

Por otro lado, no conocemos casos en que estrellas del tipo O9 iluminen una nube de polvo en sus inmediatas vecindades. Nos resta sólo suponer que aquí nos encontramos de nuevo, con emisión continua.

2.—*Nebulosa IC 410*.—Esta nebulosa contiene al cúmulo NGC 1893, constituido por estrellas O. En este cúmulo se encuentran, según *Sharpless*,<sup>(24)</sup> cinco estrellas de tipo O, algunas estrellas de tipo BO y otras estrellas más débiles. De este cúmulo forma parte especialmente el sistema del tipo Trapecio BD+33° 1026 y otros sistemas múltiples. La nebulosa IC 410 tiene un diámetro superior a  $\frac{1}{2}$ °. La gran densidad de la imagen en las placas en H (véase el Atlas de los Observatorios de Crimea y Alma Ata) indica la posibilidad de que una gran parte de la luminosidad esté conectada con la excitación de los gases por las estrellas calientes antes mencionadas. Sin embargo, forman parte de la nebulosa dos llamativas formaciones que parecen nebulosas cometarias. En la lista de *Shajn y Gase*,<sup>(25)</sup> han sido designadas con los números S 129 y S 130. La nebulosa S 129 tiene una lon-

gitud de cinco minutos y S 130 de siete minutos. Estas nebulosas son visibles particularmente bien en la placa 13d de la segunda parte del Atlas de Fesenkov y Rozhkovsky. En la región de la cabeza de la nebulosa S 129 se hallan cinco estrellas débiles. La más brillantes de ellas, de acuerdo con la determinación de *Kuffey*,<sup>(26)</sup> tiene una magnitud fotográfica de 4.8 magnitudes, y en la región de la cabeza de la nebulosa S 130 hay cuatro estrellas, la más brillante de las cuales alcanza la magnitud fotográfica 13.4. No se puede decir que las estrellas antes mencionadas sean capaces de iluminar a las nebulosas cometarias asociadas a ella. En ambos casos, la relación de Hubble sería violada casi en el mismo grado que en el caso de la estrella DD Tauri, asociada con la nebulosa cometaria B10. Por lo tanto, es posible que aquí también opere el mecanismo de emisión continua del que se ha hablado antes.

3.—*Nebulosa de Orión*.—Además del objeto 13a descubierto por *Haro*, que hemos discutido en la sección anterior y que, indudablemente, forma parte de la asociación de Orión aunque está bastante lejos del Trapecio, se tienen datos acerca de cuatro objetos que se encuentran relativamente cerca del Trapecio. Se trata de pequeñas nebulosas descubiertas por *Haro*<sup>(18)</sup> en placas infrarojas, y designadas por él como 5a, 6a, 7a y 8a. De estos objetos, la 7a y 8a contienen estrellas infrarojas extremadamente débiles, las cuales son incapaces de iluminarlas en virtud de su baja luminosidad. En los otros dos objetos, 5a y 6a no se han descubierto estrellas.

A pesar de esto, y no obstante la cercanía del Trapecio, estos objetos radian un espectro continuo. Si su radiación continua fuese provocada por una iluminación directa desde el Trapecio, o por las otras estrellas calientes que forman parte de la asociación de Orión, no se podría comprender el hecho de que estas nebulosas se distinguieran, sobre todo, a la luz infraroja. Por lo tanto, es natural que se considere su luminosidad, en el presente caso, como efecto de la emisión continua tomando en cuenta que, tratándose de los objetos 5a y 6a las estrellas, que determinarían la aparición de la emisión continua, son tan débiles que no se registran en las placas.

4.—*Nebulosa NGC 7023*.—Como *Weston*<sup>(27)</sup> ha señalado, esta nebulosa contiene una gran cantidad de estrellas del tipo T Tauri. Por otro lado, se admite que esta nebulosa está iluminada por la estrella de tipo B5, que se halla en el centro de la nebulosa. Como *Shajn y Gase*<sup>(25)</sup> señalan, “la nebulosa... es parcialmente de H”. Esto significa que, juntamente con el espectro continuo, una parte de la energía es radiada en las líneas del H y, probablemente, de otros elementos. Si el espectro continuo fuera debido completamente a la reflexión de la luz de la estrella central, deberíamos observar polarización radial. Sin embargo, como *Weston*<sup>(28)</sup> ha señalado, el cuadro de polarización en la nebulosa estudiada es extremadamente complejo y los resultados de sus observaciones no pueden ser explicados simplemente por la reflexión de la luz.

Según *Glise y Walter*,<sup>(29)</sup> en la nebulosa se observa, en primera aproximación, una polarización radial, tal y como lo requiere la hipótesis de la reflexión de la luz de la estrella central. El cuadro real de distribución de la polarización es mucho más complejo.

Así pues, también en este caso, se puede sospechar la existencia de algunas inclusiones que dan lugar a una luminosidad continua de otra naturaleza.

De todo lo dicho se infiere que la estructura de muchas nebulosas difusas, particularmente aquellas conectadas con asociaciones T y O, es más compleja de lo que parecía hasta ahora, y junto con las investigaciones en H $\alpha$  se debe poner una atención seria en las investigaciones de sus estructuras en el espectro continuo.

#### IV.—OBJETOS HERBIG-HARO.

Como es sabido, además de que la estrella T Tauri está cerca de la nebulosa cometaria Hind, está rodeada directamente por una envoltura nebulosa de pequeño volumen, que tiene un espectro de líneas brillantes.<sup>(30)</sup> Es interesante notar que este espectro muestra el débil grado de ionización en la nebulosa. Así pues, en lugar de las líneas [O III], que no se observan en absoluto, encontramos aquí el doblete muy intenso  $\lambda 3727$  [O II]. Las líneas del [S II] tienen también una intensidad considerable. Semejante comportamiento del espectro nos parece comprensible. La radiación de la estrella e incluso la emisión continua unida a ella, no pueden provocar una alta ionización en la nebulosa. Por lo tanto, son preferentemente excitadas las líneas de los átomos neutros y, en ocasiones, las de los átomos ionizados. Sin embargo, el hecho mismo de la existencia de la envoltura nebulosa reviste gran interés, estando ésta ligada estrechamente, al parecer, a la juventud de la estrella T Tauri. Si esto es así, resulta natural esperar que las formaciones más jóvenes en las asociaciones T puedan estar asociadas con semejantes envolturas nebulosas. Es interesante que *Herbig*<sup>(31)</sup> haya descubierto y estudiado, no lejos de la nebulosa difusa NGC 1999, tres objetos nebulosos muy débiles, situados aproximadamente en una misma línea recta. Estos objetos fueron estudiados posteriormente por *Haro*,<sup>(32)</sup> resultando que cada uno de ellos es una estrella de magnitud 18 aproximadamente, rodeada por una nebulosa pequeña. Además, la nebulosa se presenta bastante brillante en comparación con la estrella y el espectro de la nebulosa recuerda mucho al espectro de la envoltura gaseosa alrededor de T Tauri. Como ha establecido *Haro*, las estrellas en estos objetos tienen un color azul, semejante a la estrella variable DD Tauri, que es una de las estrellas más débiles en la asociación del Toro y que también muestra, acusadamente, propiedades que pueden considerarse conectadas con la juventud de estrellas de esta clase. Es interesante notar que, por lo que respecta a su magnitud absoluta, estos objetos están muy cercanos a la estrella DD Tauri.

La extrema rareza de los objetos Herbig-Haro (incluso en la asociación de Orión, donde hay muchas

estrellas de tipo T Tauri), la distribución de los tres objetos en forma de cadena, con una longitud total de casi cinco minutos de arco, es decir, cerca de  $\frac{1}{2}$  parsec, el bajo brillo absoluto, así como otras propiedades absolutamente peculiares, nos obligan a considerar estos objetos (y también otros en la asociación de Orión, similares a ellos), como fases extremadamente tempranas en el desarrollo de estrellas que están surgiendo: los objetos de tipo T Tauri.

## V.—VARIABLES IRREGULARES RELACIONADAS CON TIPO T TAURI.

Entre las estrellas variables irregulares de otros tipos, las que muestran mayor parecido con las estrellas del tipo T Tauri son las estrellas del tipo XX Ophiuchi. Como ha sido señalado antes, *Kholopov* considera que ambos tipos pueden agruparse en una misma clase. En favor de esta unificación hablan los siguientes hechos:

1.—Las curvas de luz de las estrellas de tipo XX Ophiuchi son muy parecidas a las curvas de luz de las estrellas del tipo T Tauri.

2.—La estrella NK Orionis, que por su espectro (A4ep) fue incluida, con anterioridad, entre las estrellas de tipo XX Ophiuchi, ha resultado ser miembro del grupo señalado antes; cerca de ella hay una nebulosa cometaria brillante. Todo esto ha servido de fundamento para incluirla entre las estrellas de tipo T Tauri.

3.—Una de las estrellas del tipo XX Ophiuchi que tiene poca amplitud de brillo, la X Persei, forma parte (<sup>33</sup>) de la asociación Perseo II y, por eso, se considera afin a las estrellas del tipo T Tauri, de las cuales según *Herbig* (<sup>34</sup>) se observa un gran número en esta asociación.

4.—La estrella XY Persei, incluida habitualmente en el tipo XX Ophiuchi, se halla en el extremo de una gran nube oscura, y posiblemente está conectada con la asociación de Perseo II. Su curva de luz recuerda también las curvas de luz de las estrellas del tipo T Tauri.

La relación observada entre algunas estrellas del tipo estudiado con las nebulosas cometarias y oscuras nos obliga a pensar que los procesos físicos, en estas estrellas, deben parecerse a los procesos que ocurren en las estrellas del tipo T Tauri. La diferencia se reduce a que éstas son estrellas de tipos B y A y tienen mayor luminosidad. Puede decirse que estas estrellas constituyen una continuación de la clase de variables del tipo T Tauri, una continuación en la dirección de tipos espectrales tempranos. En realidad, la continuación posterior de esta serie es la estrella AE Aurigae, asociada con la nebulosa IC 405 que tiene espectro O9, y de la cual ya se ha hablado antes.

Conviene advertir, al mismo tiempo, que hay semejanzas entre las estrellas del tipo XX Ophiuchi y las estrellas del tipo R Coronæ Borealis.

Ante todo, la curva de luz de la propia XX Ophiuchi, se caracteriza por una estabilidad relativa en su máximo y, de esta manera, hay una semejanza entre

las curvas de luz de las estrellas del tipo XX Ophiuchi y las curvas de luz de las estrellas del tipo R Coronæ Borealis.

Si tomamos después una estrella del tipo R Coronæ Borealis, como BM Orionis, esta estrella se distingue muy poco, por su curva de luz, de la XY Persei. Por lo tanto, no cabe duda de que los procesos físicos en las estrellas del tipo R Coronæ Borealis deben tener muchos rasgos comunes con los procesos físicos de las estrellas del tipo XX Ophiuchi y T Tauri. La diferencia consiste en las variaciones más prolongadas de cambio de brillo en el máximo, por una parte, y en que las estrellas del tipo R Coronæ Borealis son, por lo menos a veces, supergigantes.

La misma R Coronæ Borealis pertenece al tipo cF y en su máximo tiene, efectivamente, una luminosidad muy alta.

Una circunstancia en extremo importante que caracteriza a las estrellas del tipo R Coronæ Borealis es que, durante el mínimo y con una disminución de su brillo de varias magnitudes, su color, de acuerdo con los datos en mano, permanece constante. Si se excluye la hipótesis acerca de la absorción no selectiva de la luz de la estrella por la materia oscura, entonces este fenómeno nos obliga, sin querer, a llegar a la conclusión de que la parte fundamental de la radiación de la estrella no tiene carácter térmico. Por desgracia, el fenómeno está demasiado poco estudiado para sacar más conclusiones. Sin embargo, está claro que el problema de las leyes que rigen la radiación del espectro continuo en las estrellas del tipo R Coronæ Borealis y de la existencia de emisión continua en sus espectros, merece seria atención.

Al hablar de las estrellas que son parecidas a las estrellas del tipo T Tauri, por lo que respecta al fenómeno de la emisión continua, no podemos dejar de detenernos en la estrella FU Orionis, la cual ocupa una posición muy especial entre todas las estrellas variables. Debido a que esta estrella, hasta 1937, no era más brillante que la magnitud 16 y que en 1937, al explotar, alcanzó el máximo de 9 magnitudes, es incluida, con frecuencia, entre las estrellas novas. Sin embargo, a la elevación de su brillo no sucedió ningún fuerte descenso del mismo. En lugar de eso, nos encontramos con que el máximo de brillo se prolongó durante muchos años. La estrella, en su máximo pertenece al tipo cF5, por lo que puede ser considerada, con el mismo derecho, como estrella del tipo R Coronæ Borealis con un mínimo muy prolongado que duró hasta 1937. Si se mantiene este punto de vista, resulta interesante el hecho de que después de la explosión se observó, cerca de la estrella, una nebulosa cometaria. Por esto es de esperar que también pueda darse en esta estrella, en cierto grado, el fenómeno que ocurre en las atmósferas de las estrellas del tipo T Tauri.

## VI.—LA HIPOTESIS DE LOS ELECTRONES RELATIVISTAS.

Como es sabido, la nebulosa del Cangrejo tiene en la región óptica del espectro una emisión continua. Para explicar el espectro continuo de esta nebulosa

*Shklovsky* (<sup>35</sup>) supuso que en la nebulosa hay campos magnéticos irregulares, en los cuales los electrones relativistas se mueven con energías que llegan a  $10^{11}$  electrón-volts y más. Se supone, además, que los electrones han recibido tan gran energía como resultado de múltiples dispersiones en los campos magnéticos durante el período de la explosión, que condujo a la formación de la nebulosa del Cangrejo. Aunque es difícil todavía afirmar que la radiación continua de la nebulosa tiene la misma naturaleza que la emisión continua estudiada en el presente artículo, es evidente, sin embargo, que a los astrofísicos se les plantea la vasta tarea de explicar la emisión continua que surge en las condiciones más diversas. Por esto, se plantean las siguientes cuestiones:

1.—¿Puede la radiación de los electrones relativistas en los campos magnéticos (es decir, el fenómeno de los "electrones luminosos"), ser la causa general de la emisión continua en todos los casos examinados en el presente trabajo? \*

2.—¿Reciben los electrones relativistas su energía sobre la base del funcionamiento del mecanismo de Fermi, es decir, como resultado de la dispersión en los campos magnéticos irregulares?

Por lo que se refiere al segundo problema nos parece que puede recibir inmediatamente una respuesta negativa. En verdad, en algunos casos (estrellas del tipo UV Ceti) la aparición de emisión continua tiene un carácter explosivo; sin embargo, con el mecanismo de Fermi, la aparición de electrones de alta energía debe producirse gradualmente, y con el carácter lento de las variaciones de las características estadísticas del campo magnético irregular, puede establecerse incluso el equilibrio entre la adquisición y liberación de energía por los electrones.

Por lo que se refiere a la primera cuestión, en la actualidad es difícil responder a ella afirmativamente, ya que sólo pueden establecerse hipótesis sin fundamento acerca de la existencia de campos magnéticos en las atmósferas de las estrellas no estacionarias, particularmente sobre los valores de la intensidad de estos campos y acerca de su estructura. \*\*

Por esto, en el presente trabajo renunciamos a introducir la hipótesis sobre los electrones relativistas para los tipos de estrellas no estacionarias examinados.

Lo más esencial en los fenómenos estudiados es el hecho de que tratamos con tan grandes cantidades de energía, que es poco probable que puedan liberarse durante los procesos de intercambio de energía limi-

\* Durante la conferencia sobre estrellas variables, celebrada en Leningrado en Mayo de 1954, y en la que presenté como informe el presente trabajo, que I. M. Gordon había publicado un trabajo en el que se suponía que los electrones relativistas son los responsables de la emisión continua en las estrellas del tipo T Tauri.

\*\* La elaboración de la hipótesis sobre los electrones relativistas debe conducir a la adaptación de los valores de los campos magnéticos, de los valores de la energía media de los electrones y de la densidad del medio para satisfacer los intervalos de consunción y la frecuencia de la radiación. Sin embargo, a la altura de nuestros conocimientos tiene una importancia fundamental el análisis y generalización de los datos referentes a los hechos relativos a la emisión continua.

tados a la atmósfera misma. En consecuencia, no se puede evitar la conclusión de que, en estos procesos, tenga lugar un transporte de energía intraestelar a las capas exteriores mediante algún portador de esta energía. Por la interacción con la materia de las capas exteriores o espontáneamente, tiene lugar el desprendimiento de esta energía en las capas exteriores, junto con la cual, y mediante algún mecanismo, esta energía se convierte o bien en radiación térmica de las capas fotosféricas, o bien en energía de excitación y ionización de los átomos o, por último, en energía de emisión continua.

El siguiente aspecto de este problema es importante: después del transporte de energía intraestelar hacia el exterior, su liberación ocurre de pronto, en forma explosiva, sin aumentar gradualmente. Sin embargo, el proceso mismo de radiación en la parte óptica del espectro puede prolongarse largo tiempo, a veces muchos días. Por lo tanto, el siguiente cuadro parece probable: la energía de naturaleza intraestelar es desprendida por su portador durante un intervalo de tiempo muy breve, pero se transforma en otra forma de energía intermedia; a partir de ésta, entonces, se transforma en radiación visible en el curso de un período de tiempo prolongado (que fluctúa entre algunos minutos y muchos días). Si la energía intraestelar no fuera liberada instantáneamente por su portador tendríamos, entonces, un aumento gradual de las ráfagas, puesto que se requeriría tiempo para acumular energía en el estado intermedio.

Esta rápida transformación de la energía intraestelar en otros tipos de energía, llevada a las capas exteriores, nos obliga a suponer que aquí nos encontramos con *procesos del tipo de fisión nuclear* y, además, de vida no muy larga.

Algunos hechos que vamos a citar en la sección siguiente hablan en favor de que semejantes procesos tienen lugar además, no sólo en las estrellas no estacionarias, sino también en estrellas como nuestro Sol.

## VII.—ACERCA DE LOS PROCESOS DE FISIÓN DE LAS CAPAS EXTERIORES DE LAS ESTRELLAS.

En la actualidad hay pruebas directas de que en las capas exteriores de muchas estrellas tienen lugar procesos de fisión, que influyen sobre la composición química e isotópica de las atmósferas estelares. A este respecto, tiene gran importancia el descubrimiento de *Merrill* (<sup>36</sup>) de líneas intensas de Tecnecio (Tc) en los espectros de la mayoría de las estrellas de tipo S, observadas por él. Como consecuencia de la inestabilidad de sus núcleos, el Tc debiera haber desaparecido de la atmósfera en un intervalo de tiempo del orden de varios cientos de miles de años. Por consiguiente, debe continuarse originando en las atmósferas de las estrellas del tipo S. Como demuestra el estudio de este problema, para que se forme Tc a partir de otros elementos, por ejemplo de elementos del grupo del Fe o del Mo, se requieren condiciones extraordinarias, que no las hay en las capas exteriores de la estrella. Estas condiciones tampoco se presen-

tan en las regiones centrales de la estrella. Aún más, la convección desde las regiones centrales a las exteriores puede exigir mucho más tiempo que la duración de toda la vida del Tc. Es natural, por esto, suponer que el Tc surge directamente en las atmósferas de las estrellas o en las capas que se hallan inmediatamente debajo de la atmósfera, como resultado de los procesos de fisión de la materia intraestelar de los que ya se habló antes. También habla en favor de ésto, el hecho de que la abundancia de Tc en las estrellas de tipo S, según *Merrill*, esté correlacionado con la abundancia del Zr. Puesto que la abundancia del Zr debe considerarse como una característica fundamental de las estrellas del tipo S, también relacionada con el proceso de formación de los elementos en esa estrella. Es natural, entonces, pensar que la aparición del Tc solamente acompaña el proceso de formación de los átomos de Zr. Hagamos notar que, según *Nassau* (informe en la inauguración de Pulkova en 1954), las estrellas gigantes del tipo S forman, en la galaxia, grupos semejantes a las asociaciones. Por lo tanto, deben ser estrellas jóvenes. Si la formación de las estrellas a partir de las proto-estrellas fuese acompañada de una transformación gradual de la materia pre-estelar en materia ordinaria, como resultado de los procesos de fisión, la existencia del Tc y la enorme abundancia del Zr en las estrellas del tipo S deberían servir de indicación del camino que sigue la formación de los elementos. Datos muy importantes, obtenidos por *H. Hubenet, C. de Jager y C. Zwaan*,<sup>(37)</sup> demuestran la existencia de una pequeña cantidad de Tc también en el Sol. Por lo tanto, surge la suposición de que en el Sol también es posible la formación de elementos como resultado de la desintegración de la materia original. Una serie de hechos testimonian convincentemente en favor de esta suposición. Entre ellos, se cuentan los siguientes:

- 1.—La existencia de Li en la atmósfera solar;
- 2.—Los datos, citados por *De Jager*,<sup>(38)</sup> que hablan en favor de la existencia de deuterio en la atmósfera estelar;
- 3.—La gran abundancia de Be en el Sol.

Recientemente, *Severny*,<sup>(39)</sup> en el Observatorio de Crimea, ha hallado nuevas pruebas de la existencia de deuterio en el Sol.

Como es sabido, hasta ahora se consideraba que estos hechos podían ser explicados introduciendo la hipótesis artificial de la ausencia de mezcla entre las capas exteriores e interiores del Sol. Sin embargo, la hipótesis acerca de procesos continuos del tipo de desintegración atómica —lo cual hace que la existencia de estos elementos en la atmósfera solar sea absolutamente natural— puede explicar la presencia de Tc también, lo que es inexplicable desde el punto de vista de la ausencia de mezcla.

Conviene hacer notar que también en el Sol, ciertamente en pequeña escala en comparación con las estrellas no estacionarias antes examinadas, se produce el fenómeno de la liberación extraordinariamente rápida de cantidades considerables de energía, lo que es difícil de explicar por los procesos de intercambio de energía dentro de los límites de la atmósfera mis-

ma. Tenemos presentes las ráfagas cromosféricas, que van acompañadas ordinariamente de emisiones intensas en frecuencias de radio. La muy breve duración del intervalo, entre el principio de la erupción cromosférica y el máximo de su intensidad, lo mismo que el hecho análogo, observado respecto a las emisiones de radio, hablan en favor del carácter explosivo del desarrollo de este proceso.

La intensidad extraordinariamente alta de las radiaciones en frecuencias de radio durante estas explosiones conduce, si se admite la naturaleza térmica de la radiación de radio durante estos procesos, a temperaturas fantásticamente elevadas. Por lo tanto, la suposición de un mecanismo no térmico, para el origen de esas radiaciones, se presenta de un modo natural.

Los hechos antes mencionados han dado base a *Guseinov*<sup>(40)</sup> y *Gordon*<sup>(41)</sup> para lanzar la hipótesis de los electrones relativistas en los campos magnéticos solares locales, que producen radiaciones de radio y explosiones cromosféricas. Por otra parte la radiación es liberada tanto por medio de la formación de líneas de emisión, como también en el espectro continuo de frecuencias de radio, y a veces de frecuencias ópticas. Por eso el cuadro es parecido, en cierta medida, al fenómeno que tiene lugar en las estrellas del tipo UV Ceti y T Tauri. La pequeña escala de estos fenómenos en el Sol demuestra que, en las estrellas de edad avanzada, los procesos de transporte de la energía intraestelar hasta las capas exteriores, transcurre con no mucha intensidad, y que una gran parte de la energía intraestelar liberada en tal estrella, proviene de las capas internas.

#### VIII.—CARACTER DISCRETO DE LOS PROCESOS DE TRANSPORTE HACIA EL EXTERIOR Y LIBERACION DE LA ENERGIA INTRAESTELAR.

Hemos tratado de demostrar que, en muchas estrellas no estacionarias nos encontramos con el fenómeno de la liberación inmediata de la energía intraestelar en las capas exteriores de la estrella, lo que al parecer es consecuencia del transporte, a las capas exteriores, de la materia que es portadora de esta energía.

En relación con esto, se plantea el problema de cuáles son las características de estos procesos. Es absolutamente evidente que este problema exige un estudio prolongado y especial. Sin embargo, en forma provisional y todavía muy general, podemos sacar de todo lo expuesto y basándonos en una serie de datos observacionales, algunas conclusiones aproximadas y muy generales acerca de estas características:

- 1.—La liberación de la energía intraestelar en las capas exteriores tiene un carácter discreto (discontinuo) y se produce en grandes cantidades.

- 2.—El proceso de liberación de la energía estelar interna tiene, en la práctica, un carácter instantáneo. En favor de esto habla el rápido desarrollo de las ráfagas en los casos en que las observamos en su

forma más pura (estrellas del tipo UV Ceti). El hecho de que la radiación de energía en la parte visible del espectro no ocurra instantáneamente, sino que dure algún tiempo (minutos en las estrellas del tipo UV Ceti, días en las atmósferas de las estrellas de tipo T Tauri, y años tratándose de las nebulosas cometarias), no está en contradicción con esto. En realidad, antes de convertirse en energía radiante, radiada al espacio interestelar la energía intraestelar que es liberada debe pasar por algunos estados intermedios o de transición. La existencia de estos estados de transición puede, en ocasiones, alargar el proceso de radiación.

3.—La liberación de la energía intraestelar va acompañada de los procesos de formación de nuevos núcleos atómicos, incluyendo entre ellos los que son inestables, ya sea por sí mismos, o por las condiciones estelares.

4.—La magnitud de la porción discreta de la energía liberada varía de estrella a estrella, y en determinada estrella varía de una liberación a la siguiente. Así, por ejemplo, en las estrellas del tipo UV Ceti, la cantidad de energía liberada cada vez, es del orden de  $10^{33}$  a  $10^{34}$  ergios, en tanto que en las estrellas tipo T Tauri es de  $10^{39}$  ergios. Hay que agregar que en las explosiones cromosféricas del Sol se libera una mucho menor cantidad de energía.

Surge el problema de si las peculiaridades señaladas sólo son características de los procesos de liberación de energía que ocurren en las capas más exteriores de las estrellas. El hecho de que observemos las consecuencias de los procesos discretos y casi instantáneos de liberación de energía en las capas internas de la estrella, en la forma de explosiones de novae y supernovas, habla en favor del hecho de que la naturaleza discreta de los procesos de liberación de energía se extienden, por lo menos a veces, a los casos donde esta liberación ocurre en las capas internas. Se sobrentiende que no se puede rechazar la posibilidad de procesos continuos de liberación de energía, a la par que los procesos discretos, tanto en las capas exteriores como en las interiores de las estrellas. Sin embargo, no disponemos todavía de hechos que confirmen esto.

Sin ahondar en el mecanismo de liberación de la energía y considerando que nos encontramos en el presente caso, con procesos del tipo de desintegración, podemos plantearnos, sin embargo, el problema de cómo se desarrolla el proceso de transporte, hacia el exterior, de la materia que originalmente contiene en su seno la energía. A este respecto presentan gran interés los datos acerca del retraso de las frecuencias de radio de onda larga comparadas con las de onda corta. Estos datos vendrían a demostrar que el fac-

tor que provoca la anómala radiación de radio, no térmica, se desplaza en la atmósfera del Sol, hacia la superficie, a una velocidad de varios centenares de kilómetros por segundo. Sin embargo, en realidad, no está excluida la posibilidad de que el factor original, que provoca las ondas de radio, se extiende con más rapidez, pero el tiempo necesario para la transformación de la energía liberada en radiación de radio dependerá de la densidad del medio teniendo una mayor duración con menor densidad. Por esto, nos parece que sería razonable admitir que la velocidad dada anteriormente es sólo un límite inferior para la velocidad de transporte de la materia de la cual la energía es liberada.

## IX.—CONCLUSION.

Se puede considerar establecido que en las atmósferas de las estrellas del tipo UV Ceti y T Tauri, se observa la liberación, en enorme escala, de energía llevada por desconocidos portadores desde las capas internas de las estrellas. Por otra parte, la energía liberada en porciones discretas se radia después al espacio circundante bajo la forma de radiación térmica complementaria, como emisión continua y de líneas de emisión. En las estrellas viejas, como el Sol, estos mismos procesos tienen lugar en escala mucho menor en las capas exteriores.

El hecho de que estos procesos sean especialmente intensos en las estrellas del tipo T Tauri, (que son las estrellas más jóvenes, que aún no han salido del seno de las asociaciones estelares y las cuales, por lo tanto, se han originado recientemente de proto-estrellas, las que, según los datos en mano (<sup>42</sup>) deben estar constituidas por una materia pre-estelar muy densa), habla en favor de la hipótesis de la liberación de energía en los procesos de desintegración de la materia pre-estelar, que recuerdan los fenómenos de desintegración radioactiva. Si llevamos esta idea hasta el fin, hay que pensar que la fuente de energía estelar es la materia pre-estelar, que continúa conservándose en el interior de las estrellas durante largo tiempo. Partiendo del deseo de llegar a una explicación única del origen de la energía estelar, conviene renunciar a la hipótesis de las reacciones termonucleares, como fuente básica de la energía estelar.

Nos parece que la presencia del Li, en gran abundancia en ciertas estrellas del tipo N, habla directamente de la falta de fundamento de la idea acerca de las reacciones termonucleares como fuentes de la energía intraestelar; por otra parte, la abundancia del Te en las estrellas del tipo S señala francamente la dirección en que conviene buscar la solución del problema de la naturaleza de esas fuentes.

## R E F E R E N C I A S

- 1.—*Ambartsumian*, Informe inaugural en el simposium sobre la evolución de las estrellas, Moscú, 1952.
- 2.—*Joy y Humason*, PASP. 61, 133, 1949.
- 3.—*Rok*, PASP, 65, 19, 1953.
- 4.—*Joy*, PASP, 66, 5, 1954.
- 5.—*Joy*, Ap. J. 102, 168, 1945.
- 6.—*Kukarkin y Parenago*, Catálogo general de estrellas variables. Edición de la Academia de Ciencias de la U.R.S.S., Moscú-Leningrado, 1948.
- 7.—*Balanovskaia*, P. 3.5, 9, 1935.
- 8.—*Kholopov*, P. 3. 8, 83, 1951.
- 9.—*Joy*, Ap. J. 110, 424, 1949.
- 10.—*Tserasskaia*, A. N. 170, 339, 1906.
- 11.—*Herbig*, PASP, 60, 256, 1948.
- 12.—*Struve y Swings*, PASP, 60, 61, 1948. Véase también, *Struve*, Stellar Evolution, pág. 109, 1950.
- 13.—*Herbig*, Ap. J. 111, 15, 1950.
- 14.—*Parenago*, P. 3, 7, 169, 1950.
- 15.—*Shajn*, AN 234, 41, 1928.
- 16.—*Herbig*, J. RAS of Canada 46, 222, 1952.
- 17.—*Whitney y Weston*, Ap. J. 107, 371, 1948.
- 18.—*Haro*, Ap. J. 117, 73, 1953.
- 19.—*Greenstein*, Ap. J. 107, 375, 1948.
- 20.—*Greenstein y Heney*, Ap. J. 89, 653, 1939.
- 21.—*Shajn y Gase*, Atlas de nebulosas gaseosas difusas, Moscú, 1952.
- 22.—*Fesenkov y Rozhkovski*, Atlas de nebulosas gaseosas y en polvo, 1953.
- 23.—*Gase*, Boletín del Observatorio Astronómico de Crimea, 10, 213, 1953.
- 24.—*Sharpless*, Ap. J. 119, 334, 1954.
- 25.—*Gase y Shajn*, Boletín del Observatorio Astronómico de Crimea, 9, 52, 1952.
- 26.—*Kuffey*, N. A. 105, 403, 1937.
- 27.—*Weston*, A. J. 58, 48, 1953.
- 28.—*Weston*, A. J. 57, 28, 1952.
- 29.—*Glise y Walter*, Zsf. Ap. 29, 94, 1951.
- 30.—*Herbig*, Ap. J. 111, 11, 1950.
- 31.—*Herbig*, Ap. J., 113, 697, 1951.
- 32.—*Haro*, Ap. J. 115, 572, 1952.
- 33.—*Blaauw V.*, A. N., 11, 405, 1952.
- 34.—*Herbig*, PASP, 66, 19, 1954.
- 35.—*Shklovsky*, A. C. de la U.R.S.S., 90, 983, 1953.
- 36.—*Merril*, Ap. J. 116, 21, 1952.
- 37.—*Jouvenne, de Jager y Zwaan*, en la recopilación "Les processus nucleaires dans les Astres", pág. 471, Lovaina, 1954.
- 38.—*De Jager*, Op. cit., pág. 460.
- 39.—*Severny*, de la Academia de Ciencias de la U.R.S.S. (en prensa).
- 40.—*Guseinov*, Tesis de candidato a Doctor, Erevan, 1953.
- 41.—*Gordon*, de la Academia de Ciencias de la U.R.S.S., 94, 813, 1954.
- 42.—*Ambartsumian*, Recopilación "Les processus nucleaires dans les Astres", pág. 293.