Partiendo de una oposición de Marte, Kepler determinó, después de una revolución marciana (687 días) el valor del radio vector terrestre en función del radio vector marciano, tomado como unidad, por medio del triángulo plano formado por él Sol, la Tierra y Marte. Después de otros 687 días Marte volvía a colocarse donde estaba antes, pero la Tierra ocupaba otro lugar en su órbita, pudiéndose nuevamente determinar su radio vector en función del mismo radio vector marciano ya empleado anteriormente, y así sucesivamente, a intervalos de 687 días fué determinando todos los radios vectores posibles de la Tierra, y dedujo que la curva descrita era como una circunferencia. Invirtiendo ahora el procedimiento pudo Kepler determinar todos los radios vectores de la órbita de Marte que fueron posibles y entonces resultó claramente una curva elíptica, a causa de la mayor excentricidad. Y enunció su ley:

«Los planetas describen órbitas elípticas y el Sol ocupa uno de los focos».

La segunda ley o ley de las áreas está demostrada en su obra «Compendio de Astronomía Copernicana» y se basa en la constancia que resulta de multiplicar el radio vector por el arco descrito en la unidad de tiempo. Así deduce que «las áreas descritas por el radio vector en la unidad de tiempo son constantes». Estas dos primeras leyes publicadas en el libro «De Stellae Martis» remontan a 1609. La tercera ley vino sólo 9 años más tarde, y la enunció así: «La proporción entre las distancias medias de dos planetas es precisamente sesquiáltera de la proporción de los períodos de revolución», lo que se llama proporción sesquiáltera es aquella en que los términos tienen el exponente 3/2.

Contrariamente a sus hábitos, Kepler no da a conocer en este caso la historia de sus ideas. Sabemos solamente que después de múltiples tentativas llegó a sospechar la ley el 8 de marzo de 1618; pero renunció a proseguir por no concordar los resultados, ignorando haberse equivocado en un cálculo. El 15 de mayo, después de rectificar los cómputos se convenció de la verdad contenida en su tercera ley.

«Desde hace ocho meses, dice Kepler, yo he visto el primer rayo de luz; hace tres meses que he visto el día, y en fin, desde pocos días, he visto al Sol con la contemplación más admirable.

Señores:

Al mencionar a estos hombres yo quiero hacer ver que la Astronomía moderna está en marcha. El impulso genético aplicado al Universo Sideral por el genio de Copérnico no se detendrá ya en el futuro y seguirán los siglos rindiendo tributo al insigne sabio polaco e inmortal ciudadano del mundo, Nicolás Copérnico.

SOBRE ASTROFISICA Y EVOLUCION ESTELAR

Por Federico Rutllant

Miembro docente de la Facultad de Matemáticas, y Astrónomo del Observatorio Astronómico Nacional

Señor Decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Excmo. senor Nuncio Apostólico, Exmo. señor Ministro de Polonia, Señoras y Señores:

Los antropólogos y los geólogos están de acuerdo en estimar que la especie humana existe en la superficie de la tierra desde hace unos 300 mil años. Nosotros nos

podemos considerar, en consecuencia, como la generación de orden 10 mil. El límite remoto que nos separa de la prehistoria está representado por las culturas caldea y china, fenicia y egipcia. Los hombres que precedieron a estos pueblos, formaron parte de las 9,800 primeras generaciones del «homo sapiens» y, aún cuando sabemos muy poco de ellos nos será permitido suponer que las condiciones primitivas de su existencia, unidas a las luchas permanentes que debían sostener con los elementos naturales, les dejaban poco tiempo para reflexionar sobre el mundo exterior. Así se explica que ese individualismo desenfrenado los hiciera sentirse a cada uno de ellos el centro del universo, dando nacimiento a la doctrina egocéntrica.

De las 200 generaciones restantes, 190 creyeron que la tierra era el centro del universo, cuando no fueron decididamente antropocéntricas. Claro está que hubo algunos espíritus selectos, como Aristarco de Samos, de la escuela pitagórica, que vivió hacia el año 250 de nuestra era, que sostuvo que la tierra se movía en torno del sol. La verdad aparecía esporádicamente; pero pasaba inadvertida y se precipitaba, cual rauda estrella fugaz, en la profundidad de las tinieblas. Esas 190 generaciones geocéntricas no podían concebir que nuestro planeta, morada de la altiva criatura humana, desempeñara un papel menguado en el concierto de los astros. La ilusión del movimiento diurno contribuía a robustecer el error y forjaron complejas teorías de ciclos y epiciclos para explicar algunas anomalías que presentaban las trayectorias de los planetas a condición de no despojar a la tierrra de su sitial de honor entre los objetos del firmamento.

Tales eran las ideas que prevalecían entre los hombres de ciencia, hace 400 años. Al ilustre astrónomo polaco Nicolás Copérnico le estaba reservada la gloria de destruir definitivamente la doctrina geocéntrica. Como era de esperar, sus teorías tan brillantemente desarrolladas en su inmortal obra «De revolutionibus orbium coelestium» provocaron controversias apasionadas entre los que creían en el sistema de Ptolomeo y los sostenedores del heliocentrismo. Sólo 100 años más tarde, Galileo que fué el más entusiasta defensor de la nueva doctrina, pudo imponer al mundo científico la verdad copernicana.

A partir de esa época, las 10 últimas generaciones han hecho progresar incesantemente y con ritmo acelerado nuestros conocimientos astronómicos: Galileo con su anteojo, Kepler con sus tres famosas leyes, Newton con su ley de la gravitación universal, Fraunhofer con sus espectros estelares, Le Verrier con su espectacular descubrimiento de Neptuno, y en nuestros días, Einstein con su teoría de la relatividad, representan, entre otros, los jalones más conspicuos en las conquistas asombrosas de la astronomía moderna.

Pero, debemos reconocerlo, cada una de estas últimas conquistas ha significado un rudo golpe para la teoría heliocéntrica; no por cierto en el sentido de ser este astro el centro del sistema planetario, sino en cuanto se refiere a restarle valor al rol que el sol desempeña en relación con los demás astros de la bóveda celeste. Como trataremos de demostrarlo, el astro que con tanta generosidad nos inunda de luz y calor y al cual las generaciones sucesivas de seres humanos han rendido, cuando no adoración religiosa, un tributo entusiasta de admiración, este astro, decimos, no es sino una estrella que forma parte, junto con más de tres mil millones de estrellas, de esa gigantesca nebulosa espiral que nosotros llamamos Vía Láctea y que los astrónomos designan con el nombre de Galaxia. Comparado con sus miles de millones de herma-

nas, nuestro sol es una estrella pequeña, relativamente fría, que ha alcanzado ya los límites de la edad madura y que está próxima a iniciar el período decadente de la senectud. Ni siquiera su ubicación en el seno de la Galaxia goza de un lugar preferente. Está situado sobre uno de los brazos de esta espiral, a una distancia relativamente grande de su centro.

He aquí, en líneas generales, las características de nuestro sol, unidad solitaria sumergida con sus compañeras en la Vía Láctea, cuya forma y dimensiones nos son conocidas, principalmente, por la extrapolación que los astrónomos de nuestros días han realizado al estudiar e interpretar los millones de imágenes que noche a noche obtienen en sus placas fotográficas y que corresponden a otras tantas nebulosas espirales, comparables en todo a nuestra Galaxia.

* * *

Desde los tiempos de Hiparco, es decir, desde hace más de 2,000 años, las estrellas se clasifican por magnitudes según su brillo aparente. Las medidas fotométricas exactas que se han realizado en este campo de la astronomía estelar han permitido reemplazar la clasificacación empírica que subsistía hasta fines del siglo pasado por otra más científica que, conservando las líneas generales de la anterior, ha definido la estrella Aldebarán como la estrella tipo de primera magnitud. Por otra parte a la estrella que se encuentra en el límite de visibilidad del ojo desnudo normal se le ha atribuído la magnitud 6.ª Entre estos dos valores se han intercalado cuatro medios geométricos con una razón igual a 2,5 y así se ha obtenido una escala en la que la estrella de 1.ª magnitud tiene una intensidad luminosa 100 veces superior a la de 6.ª magnitud. A fin de ubicar en esta escala las estrellas más brillantes que Aldebarán, se la ha prolongado más allá de la magnitud 1.ª y así se ha obtenido para Capella el valor 0,2, para Canopus —0.9 y para Sirio, la estrella más brillante de la esfera celeste, —1.6. En esta escala la intensidad luminosa de la luna llena está representada por —13 y la del sol por —27. El uso de los anteojos astronómicos ha hecho necesario también la prolongación de la escala en el sentido opuesto hasta la magnitud 18.ª que representa el límite accesible al ojo humano con la ayuda de los mejores instrumentos modernos. Pero la fotografía que es uno de los auxiliares más poderosos de la Astrofísica, ha permitido fijar en la placa sensible, recurriendo a exposiciones que a veces se suceden en varias noches consecutivas, imágenes de estrellas cuya magnitud alcanza hasta la 22ª. Y entre una estrella de magnitud 22ª. y Sirio hay aproximadamente la misma diferencia de brillo que la que existe entre Sirio y el sol, en otras palabras, habría que concentrar en un solo haz el flujo luminoso de mil millones de estrellas de magnitud 22ª para que fuera comparable al brillo aparente de Sirio. Por lo demás,, la fotografía no sólo ha suplantado la visión directa porque ha sido capaz de captar estrellas cada vez más débiles sino porque con una exposición de algunos minutos se registran en la placa miles de estrellas cuyas posiciones y magnitudes se estudian a voluntad en algunos días de laboratorio, mejor que durante años de pacientes observaciones nocturnas.

Pero la magnitud aparente de una estrella es una función de dos variables: su luminosidad intrínseca y su distancia; y ésta influye de acuerdo con la ley de la inversa de los cuadrados . De aquí que para poder comparar las potencias luminosas de

dos estrellas sea necesario corregir este efecto de perspectiva, colocándolas a igual distancia, que, por razones teóricas, se ha fijado en 33 años luz. La magnitud bajo la cual se vería el astro situado a esa distancia es lo que en lenguaje técnico se llama su magnitud absoluta. El conocimiento de esta cantidad es esencial en Astrofísica y se deduce fácilmente cuando se conoce la distancia de la estrella. Así, por ej., el sol que tiene una magnitud aparente— 27, para nosotros que gravitamos a sólo 8 minutos de luz de él, se nos presentaría como una débil estrella de 5.ª magnitud, próxima al límite de nuestra visión, si la colocáramos a una distancia de 33 años luz. Por el contrario, la mayor parte de las estrellas están a más de 33 años luz de manera que sus brillos absolutos son superiores a los aparentes. Una estrella telescópica de magnitud 16.ª, situada hacia el centro de la Vía Láctea o sea a 33,000 años luz de la tierra se convertiría en una estrella de 1.ª magnitud si la colocáramos a esa distancia tipo y así podemos decir que esta estrella posee una luminosidad intrínseca 40 veces superior a nuestro sol desde que ambos tienen una diferencia de cuatro magnitudes absolutas. Como se ve, el conocimiento de la magnitud absoluta estaba supeditado a la determinación previa de la distancia del astro y la medición directa de éstas estaba limitada a un restringido grupo de estrellas vecinas inmediatas nuestras. Pero la astrofísica moderna que ha realizado progresos tan considerables en un lapso brevísimo, ha encontrado la manera de determinar las magnitudes absolutas de las estrellas sin conocer sus distancias, las que desde entonces, intervienen en las ecuaciones no como datos, sino como incógnitas susceptibles de determinarse. Antes se medían directamente, con grandes dificultades, distancias que alcanzaban a unos pocos cientos de años luz; ahora conociendo las magnitudes aparente y absoluta dadas por la observación, deducimos la distancia, y, la característica esencial del procedimiento es la de tener un alcance prácticamente ilimitado: constituye una sonda ideal que penetra hasta los confines más profundos del universo explorado. Cuando ello es posible, la comparación de los resultados obtenidos por ambos métodos, da valores concordantes, si se consideran los errores inherentes a estos tipos de observaciones.

En los últimos 20 años se han reunido informaciones abundantes sobre las magnitudes absolutas de multitud de estrellas. Los valores encontrados se distribuyen en una escala que comienza con la magnitud absoluta—5 para las estrellas de mayor potencia luminosa hasta la +15 para las más débiles; el caudal de energía luminosa que derrochan las primeras es 100 millones de veces superior al de éstas. El sol con su magnitud absoluta +5 se coloca en el medio de la escala, irradiando 10,000 veces menos que la estrella S del Dorado y otras tantas veces más que Wolf 359, que son los astros que están en los extremos superior e inferior de la escala.

La determinación directa de las magnitudes absolutas de las estrellas, independientemente del conocimiento de su distancia, ha podido realizarse gracias al estudio de los espectros. Si se coloca la ranura de un espectrógrafo adecuado en el plano focal del objetivo de un anteojo astronómico que está dirigido a una estrella, se obtiene en la placa sensible un registro fotográfico del espectro de la luz del astro. Esta pequeña placa estriada de líneas oscuras paralelas representa en manos del astrofísico experto un documento que revelará sinnúmero de informaciones relativas al astro estudiado. Alguien la ha comparado a la ficha dactiloscópica, de la que el técnico deduce con el auxilio de sus archivos, las características de sexo, edad, religión, etc. de la persona a la cual pertenece. Así mismo, los astrónomos han clasificado los es-

pectros estelares en seis tipos fundamentales que se designan con las letras B, A, F, G, K y M, entre los cuales han intercalado subdivisiones decimales que permiten ubicar el 99% de las estrellas.

El análisis espectral aplicado a los astros nos suministra datos exactos respecto a su composición química, color, temperatura, estado de ionización de los átomos, condiciones físicas que imperan en su superficie, velocidad con que se aleja o se acerca a nosotros, intensidad del campo gravitacional, etc. La física nuclear ha realizado progresos considerables desde que se conoce el mecanismo que regula la emisión de la luz por las estrellas. Con razón se ha dicho que ellas son sucursales a alta temperatura de nuestros laboratorios terrestres.

Analicemos someramente algunas de estas características. Desde luego, el color es después de la magnitud, uno de los caracteres más aparentes de una estrella. Todos nosotros reconocemos a simple vista un tinte rojizo en la luz que nos llega de Antares y Betelgeuse, el predominio del color amarillo en la luz del sol y de tonalidades azules en Sirio y Vega. Estos diferentes matices corresponden a distintas longitudes de onda. Nuestra retina es sólo sensible a las radiaciones que están comprendidas entre los 4 décimos y 8 décimos de micrón. Fuera de este intervalo estrecho, el ojo no percibe nada en la inmensa gama de ondas electromagnéticas que van desde los sutiles rayos cósmicos hasta las ondas más largas de la telegrafía sin hilos. El espectroscopio descompone la luz que nos llega de las estrellas en sus diferentes colores y en seguida mediante métodos precisos se determina la proporción de éstos para obtener el matiz predominante. Pero, como se sabe, el color de un cuerpo incandescente es función únicamente de su temperatura. De aquí que el astrónomo pueda deducir del espectrograma de una estrella su temperatura superficial. Las estrellas que observamos tienen una temperatura efectiva mínima de 3,000 grados porque las estrellas más frías irradian demasiado poco para que sean visibles desde la tierra. Sabemos, en efecto, que la temperatura de las estrellas no sólo dosifica los colores sino que regula su gasto luminoso, el que es proporcional a la 4.ª potencia de la temperatura absoluta. En igualdad de condiciones de superficie una estrella a 3,000° suministra 16 veces menos luz que otra a 6,000°. Así las estrellas que llamamos rojas y que se clasifican en los tipos espectrales M y K tienen una temperatura que oscila entre los 3 y 5 mil grados. Las estrellas amarillas como el sol que corresponden a las letras G y F tienen temperaturas que varían de los 6 a los 8 mil grados. A temperaturas más elevadas, hasta los 25 ó 30 mil grados, se encuentran las estrellas blancas y azules cuyas radiaciones son ricas en tonalidades violeta y ultravioleta, y que se identifican con los tipos A y B.

Pero la comparación de los colores es demasiado vaga y la medida de las temperatura algo incierta para que se pueda establecer una clasificación de las estrellas sobre estas bases. Son las rayas del espectro que constituyen detalles mucho más precisos los que han permitido una clasificación racional dando a la física estelar un desarrollo prodigioso. Veamos cuál es el mecanismo de la formación de estas rayas.

Si una fuente sólida o líquida incandescente, ilumina una hendidura, la imagen de ella proyectada en una pantalla consiste en un simple trazo luminoso blanco. Si se coloca un prisma detrás de la hendidura, este descompone la luz blanca en sus colores elementales, los desvía desigualmente y se proyecta entonces en la pantalla en vez de un solo trazo blanco una multitud de trazos coloreados desde el violeta

hasta el rojo, los que, yuxtapuestos, forman una banda continua que es el espectro de la fuente luminosa. Pero si ésta es un gas incandescente, un tubo de Geissler por ej., el fenómeno observado es diferente: el espectro del gas ya no se compone de una banda continua sino de algunas rayas brillantes, paralelas a la ranura, irregularmente espaciadas y cuya posición e intensidad son características del gas considerado. En lugar de emitir como un sólido todas las radiaciones posibles, un gas emite sólo algunas longitudes de onda, las únicas compatibles con la estructura de sus átomos. El prisma separa estos rayos y proyecta en la pantalla una imagen de la ranura en el lugar correspondiente a su color. Sin embargo un mismo gas puede emitir diferentes espectros según cuales sean las condiciones físicas a que esté sometido. De estas últimas las que más influye es la temperatura. Los físicos con sus incesantes investigaciones han logrado penetrar profundamente en el conocimiento de ese edificio tan minúsculo como maravilloso que es el átomo. Han descubierto que cuando un átomo se excita porque ha absorbido una determinada cantidad de energía liberada a raíz de un choque con una partícula alfa por ej., uno de sus electrones periféricos salta de la órbita en que circula normalmente a otra exterior que posee un nivel de energía más elevado; pero en esta nueva posición del electrón, que resulta inestable, éste no puede estacionarse más allá de unas cien millonésimas de segundo, cae a una órbita interior, el átomo cede cierta cantidad de energía radiante equivalente a la que había absorbido y emite un fotón de frecuencia bien determinada que pasa a través de la ranura y del prisma para ubicarse en forma de raya brillante en la faja espectral de acuerdo con su longitud de onda. Naturalmente si se somete una masa gaseosa a una excitación exterior habrá, en cada instante, muchos millones de átomos que tendrán sus electrones distribuídos en un mismo estado de desequilibrio; cada uno de ellos emitirá fotones de igual frecuencia que convergerán al mismo punto del espectro dando origen a una línea cuya intensidad será proporcional al número de átomos que se encuentren en ese estado. En la misma forma se puede explicar la formación de la multitud de rayas que estrían la faja multicolor del espectro. Pero hay algo más: en la relación anterior hemos supuesto que la excitación sólo lograba alejar momentáneamente al electrón de su órbita. Si el impacto es más central o la energía cedida en el choque es más considerable, el átomo puede perder definitivamente uno o dos electrones y entonces su equilibrio interno se modifica profundamente; los electrones restantes saltan a órbitas desusadas o el átomo mutilado capta algún electrón errante dando origen a nuevas líneas que no aparecían en el espectro normal del mismo gas. En su laboratorio, el físico se vale de la temperatura para aumentar la excitación. A unos 2,000° el gas da su espectro normal: sus átomos se hallan en estado neutro. A medida que la temperatura sube, el gas da el espectro de arco a unos 4,000° y el de chispa a unos 5,000 caracterizados por la presencia de átomos ionizados una o dos veces. Los tres espectros se superponen, y el número de átomos neutros, simplemente ionizados o doblemente ionizados, se manifiesta a través de la intensidad de las rayas espectrales correspondientes.

En 1814 Fraunhofer descubría las rayas del espectro del sol. Algunos años más tarde, adaptando su espectroscopio a un anteojo astronómico precisaba los caracteres generales de los espectros estelares. Estos presentan un fondo continuo, multicolor estríado de rayas negras. El sol por ej., adorna su banda espectral con más de 20,000 líneas oscuras. El carácter sombrío de estas rayas fué explicado por Kirchhoff

en 1859. Si se interpone un gas frío entre una fuente luminosa y la ranura de un espectroscopio, aparecen en sombra, en el espectro continuo de la fuente, las rayas que el gas interpuesto habría emitido brillantes si hubiera estado incandescente; es decir el gas puede absorber las radiaciones, y solamente las radiaciones, que es capaz de emitir. La presencia de un fondo continuo que caracteriza a un sólido o líquido incandescentes, permaneció indescifrada hasta estos últimos años, ya que se suponía que ese espectro era incompatible con el estado gaseoso en que debía encontrarse la materia en la superficie de la estrella, dada la alta temperatura a que se encuentra. En particular la capa periférica llamada fotósfera, de la que emana el flujo luminoso que viene del interior, debe presentar los caracteres de un gas poco denso y en consecuencia inepto para emitir un espectro continuo. Investigaciones recientes han demostrado que las rayas brillantes emitidas por un gas incandescente, que son finas y nítidas si está enrarecido, se ensanchan a medida que la presión aumenta y terminan por unirse. En el caso de la fotósfera solar, que es la capa de la que emana el 90% de su luz, tiene un espesor de algunas decenas de kilómetros, su temperatura es de 6,000° y una presión media de un décimo de atmósfera.

Otra revelación importante del análisis espectral fué la confirmación de la unidad de la materia en el universo. Hasta ahora no se ha encontrado en los espectros estelares ninguna línea que no pueda ser atribuída a alguno de los 92 cuerpos simples de la química terrestre o a sus múltiples compuestos. Es más, el helio fué localizado primero en el sol y después en la tierra, y el nebulium, ese gas hipotético cuyas rayas misteriosas aparecían en los espectros de las nebulosas irregulares, no es otra cosa, como se ha demostrado hace algunos años, que una mezcla de oxígeno y nitrógeno en condiciones especiales de ionización y enrarecimiento.

Los progresos más notables de la astrofísica moderna datan de las investigaciones de Lockyer, Adams y Russell. Estos astrónomos estudiando los materiales acumulados tras largos años de investigación, encontraron que ciertas estrellas de temperatura análoga, poseían espectros completamente diferentes. Analizando las causas de esta aparente contradicción descubrieron que el factor perturbador era la presión. Así las estrellas rojas del tipo M que dan un espectro de arco están formadas por una substancia muy condensada, en tanto que las estrellas del mismo tipo que originan un espectro de chispa están constituídas por un gas extremadamente enrarecido. En esa misma época—hace unos 25 años—Eddington demostraba que las masas de casi todas las estrellas estaban comprendidas entre 10^{32} y 10^{35} gramos. Era pues necesario aceptar que dentro del mismo tipo espectral existían estrellas con volúmenes totalmente diversos. Así nació la clasificación revolucionaria de estrellas enanas y estrellas gigantes. No hubo que esperar mucho tiempo para que los resultados se vieran brillantemente confirmados por medidas directas. El ilustre físico norteamericano Michelson ideaba un dispositivo ingeniosísimo llamado interferómetro, basado en ciertos fenómenos de difracción de la luz que permite medir distancias angulares menores que el décimo de segundo que representa el límite del poder separador de los mejores telescopios modernos. Dirigido el interferómetro a estrellas que la teoría anterior prevéía como astros de volumen considerable, se encontraba que el diámetro de Antares, por ej., es del orden de 450 diámetros solares, alfa Hércules 400, Mira Ceti 300 y Betelgeuse 250. Para que nuestra imaginación pueda captar la magnitud de estos diámetros gigantescos, bastará recordar que el

diámetro de la órbita anual de la tierra es igual a 215 diámetros solares, de modo que si el sol tuviera las dimensiones de Antares o alfa Hércules, la órbita de la tierra y aún la de Marte quedarían en su interior.

Hoy día las investigaciones de Russell han sido considerablemente ampliadas. El no poseía sino una lista de unas 300 estrellas de tipo espectral y magnitud absoluta bien determinados. Las ordenó en el diagrama famoso que lleva su nombre, refiriéndo sus posiciones a un sistema de ejes: en el de las abcisas colocó los tipos espectrales B, A, F, G, H, M. ordenados según temperaturas decrecientes y en el de las ordenadas las magnitudes absolutas. Los puntos representativos se repartieron en las ramas de una V acostada y, a pesar del número insuficiente de estrellas los resultados esenciales se manifestaron claramente. Posteriormente el diagrama de Russell se ha enriquecido con unas 6,000 estrellas cuyas distancias han sido calculadas directamente. Estas han corroborado plenamente las hipótesis anteriores de modo que la división de las estrellas en enanas y gigantes está hoy sólidamente establecida.

Como lo indica el cuadro, las clases F, G, K, M, de estrellas amarillas y rojas se subdividen en dos categorías de astros perfectamente separadas. La rama superior de la V contiene únicamente estrellas cuyo brillo excede de 1.ª magnitud absoluta y que tienen una potencia luminosa de 100 a 10,000 veces superior a la de nuestro sol. Allí quedan representadas las excepcionales estrellas supergigantes como Antares, Betelgeuse, delta Cefeo, la estrella de Plaskett, etc. y las estrellas gigantes tales como Arturo y Capella A y B.

Las clases B y A de estrellas blancas se ubican donde las ramas de la V se unen y contienen sólo estrellas de la misma naturaleza, todas ellas muy brillantes.

La rama descendente de la V contiene las estrellas enanas que se suceden cada vez más numerosas desde Sirio, pasando por el sol hasta la roja enana extrema Wolf 359 que quedaría representada en el ángulo inferior derecho y cuyo brillo sólo equivale a la 10,000ª parte del brillo solar.

Todavía dentro de la jerarquía estelar deben considerarse las estrellas enanas blancas que quedan ubicadas en el ángulo inferior izquierdo y cuyos ejemplares más conspicuos son las estrellas de van Maanen y de Kuiper.

Para darnos cuenta de la abundancia relativa de estos diferentes tipos de estrellas en las vecindades del sol imaginemos una esfera con su centro en este astro y cuyo radio fuera de 100 años luz. Esta esfera contendría unas 10,000 estrellas de las cuales 2 serían supergigantes, 63 gigantes de las clases G, K, M, 263 grandes estrellas blancas, 800 enanas amarillas del tipo solar, no más de 3 ó 4 enanas blancas y las 8,800 restantes estrellas enanas y ultraenanas rojas del tipo K y M.

* * *

Reunidos estos elementos de juicio tratemos de bosquejar el mecanismo que según los astrónomos modernos puede haber originado la formación de las estrellas y su probable proceso evolutivo. Partiremos, como lo hacen la mayor parte de las teorías cosmogónicas, de una materia hipotética repartida uniformemente a través de un espacio ilimitado. Hubble, el ilustre astrónomo de Monte Wilson, ha calculado que si toda la materia que forma parte del universo explorado se distribuyera uniformemente en el espacio, el gas resultante tendría una densidad del orden de 10^{31}

con respecto al agua. Para comprender mejor la pequeñez extrema de este valor numérico consideremos que el aire ordinario cuya densidad es 1/800 de la del agua, el intervalo medio entre las moléculas contiguas es inferior a la tercera parte de la millonésima de milímetro; en este gas de la nebulosa hipotética primitiva, este intervalo sería de 2 a 3 metros.

Admitamos todavía que esta masa gaseosa inicial, uniformemente repartida, se encontrara en un estado de equilibrio inestable, de tal manera que cualquiera perturbación, por pequeña que fuera, modificara su configuración. Ello daría origen, por efecto gravitacional, a gigantescas condensaciones de materia que explicarían el nacimiento de las grandes nebulosas extra- alácticas. Hay dos de ellas cuya masa se conoce con bastante exactitud: la gran nebulosa de Andrómeda que contiene material suficiente para formar 3,500 millones de soles y la gran nebulosa de la Virgen que pesa 2,000 millones de veces la misma unidad.

La temperatura de estas nebulosas nacientes debe haber estado muy próxima del cero absoluto; pero luego comenzó a subir a expensas del trabajo gravitacional. Por otra parte esta contracción del material que forma la nebulosa debe haber generado, como se demuestra en dinámica, un momento de rotación. Los instrumentos modernos permiten medir la velocidad de este movimiento. Si se dirige sucesivamente un espectrógrafo a dos regiones diametralmente opuestas de la gran nebulosa de Andrómeda, es posible medir el corrimiento de las líneas espectrales debido al efecto Doppler-Fizeau y deducir de allí su velocidad de rotación. Se ha encontrado que esa nebulosa da una vuelta completa en 19 millones de años. Este valor puede parecer extremadamente débil; pero si se toman en cuenta sus dimensiones colosales, se encuentra que un punto periférico debe poseer una velocidad lineal de varios centenares de kilómetros por segundo. Por lo demás, tenemos en el cielo ejemplares de nebulosas que de acuerdo con lo previsto por la teoría, presentan todas las configuraciones posibles, desde las de forma esférica que no revelan ningún movimiento de rotación, hasta las que tienen forma de disco que acusan una velocidad elevada y que se conocen con el nombre de nebulosas espirales. Típicos de éstas son los brazos de materia gaseosa eyectados por la rotación en los cuales se forman núcleos que darán nacimiento a una estrella o a un cúmulo de estrellas. Así pues las estrellas parecen formarse de la misma manera que sus progenitoras, las nebulosas, se formaron de la materia gaseosa primitiva, bajo la acción de lo que se llama la «instabilidad gravitacional». Este agente obliga a toda masa caótica gaseosa a fragmentarse en condensaciones separadas cuyo peso es tanto más elevado cuanto más tenue es el gas inicial.

Pero en el nacimiento de las estrellas concurren otros factores importantes. Desde luego, la nebulosa madre debe haber dotado a sus hijas de un movimiento de rotación de acuerdo con el principio de la conservación del momento angular. Por otra parte, como lo ha demostrado brillantemente Eddington el material que debe reunirse para formar una estrella no puede pesar menos de 10^{32} gramos ni más de 10^{35}.

Imaginemos una pompa de jabón, rodeada de un espacio vacío, que encierra un gramo de aire; si la pompa se rompe, las moléculas que constituyen el aire se dispersan inmediatamente en virtud de sus velocidades permanentes. Lo propio ocurriría para una masa de 10, 100, 1,000, etc. gramos de gas. Pero cuando la masa reunida alcanza un valor considerable, precisamente un uno seguido de 32 ceros, la fuerza

gravitacional impide la huída de las moléculas, comprime el gas con presiones crecientes hacia su centro y esto trae como consecuencia un aumento enorme de temperatura. Entonces la esfera de gas comienza a emitir luz propia y a merecer el nombre de estrella. Si las masas acumuladas son más grandes, la presión y temperatura centrales siguen creciendo y el astro produce un torrente de radiación que avanza a través de su espesor hacia la superficie de donde emerge en incontenible flujo luminoso. La presión que estas radiaciones ejercen hacia el exterior se llama presión de radiación y ayuda al gas a resistir la gravitación. Pero esta presión crece rápidamente y si una estrella reuniera más de 10^{35} gramos de materia llegaría un momento en que la presión de radiación no sólo neutralizaría el efecto de la gravedad sino que el excedente haría estallar la estrella fraccionándola en diversas componentes. Tal es el mecanismo que regula el peso de las estrellas y que explicaría la formación de las estrellas múltiples.

Los cálculos de Eddington han aportado a los hechos constatados una excelente interpretación al mostrar cómo la masa condiciona el gasto luminoso: una estrella pequeña irradia poco; una estrella más pesada es necesariamente más pródiga. La famosa relación masa-luminosidad de Eddington establece la dependencia funcional de estas dos cantidades y la curva que la traduce es el recurso más fecundo que poseen los astrofísicos para obtener las masas estelares. Basta determinar con el espectroscopio la magnitud absoluta de una estrella para conocer su masa con una buena precisión muchas veces controlada. Los valores obtenidos hasta ahora han puesto en evidencia un hecho singular que verifica una vez más las conclusiones del sabio astrónomo inglés: todas las masas estelares son análogas a la del sol, para el cual, la presencia de los planetas ha hecho posible el cálculo directo, encontrándose $2 \cdot 10^{33}$ gramos con un error probable del 6%. Las estrellas B veces más pesadas que el sol son muy escasas y no se conoce ninguna que sea 10 veces más liviana.

Pero no nos alejemos del cauce normal de la evolución estelar. Decíamos que una estrella merece el nombre de tal cuando comienza, tímida e indecisa, a emitir luz propia. Sus 10^{34} gramos de materia se reparten, como en la supergigante Antares en un volumen 90 millones de veces superior que el del sol, dan origen a densidades medias insignificantes del orden de los 3 diez millonésimos de la del agua. Ello no impide, sin embargo, que las presiones centrales sean considerables y es allí donde la energía de la gravitación se transforma en energía radiante que produce un aumento de la temperatura. Al acercarse ésta a los 3,000° la luz rojiza que la estrella emite llega a los espectroscopios terrestres y los astrónomos la clasifican entre las gigantes del tipo M o K. Transcurre el tiempo, mejor dicho transcurren millones de años, y la estrella irradiando sin cesar luz y calor, pierde energía, su luminosidad decrece; pero la estrella es joven y compensa fácilmente este gasto contrayendo su volumen. Le sobra todavía vigor y la temperatura sigue creciendo pasando sucesivamente de las clases G y F, gigantes amarillas como Capella, a las blancas y azules como nu del escorpión de los tipos A y B. En este estado de su evolución se puede decir que la estrella ha llegado a la plenitud de su existencia. Su temperatura de alrededor de 25,000° le permite derrochar energía radiante a manos llenas, como lo hacen Sirio y Altair en cuya luz predominan las tonalidades índigo y violeta. Aún cuando su masa debe haber disminuído, la reducción incesante del volumen determina densidades del orden de un décimo de la del agua y a partir de este punto de su evolución el cau-

dal de energía que gasta no se repone por el trabajo de la gravitación. Este déficit va en aumento y la temperatura del astro comienza a declinar. La contracción de la estrella se hace cada vez más lenta y penosa debido a que su densidad es ya superior a la del agua y así llegamos al estado de la evolución en que se encuentra nuestro sol, que los astrónomos clasifican entre las enanas amarillas.

Detengámonos brevemente en este astro. Los físicos han medido cuidadosamente con la ayuda del pirheliómetro el valor de la constante solar. Han encontrado que, aquí en la tierra, cada cm^2 de una superficie expuesta normalmente a la dirección de los rayos solares recibe 1.9 calorías por minuto. Con este dato es fácil calcular la cantidad total de energía que irradia el sol. Reduciendo el resultado a unidades prácticas se encuentra que cada cm^2 de la superficie solar emite sin interrupción energía suficiente para alimentar un motor de 8 caballos. Contemplando las fotografías directas que se han obtenido en condiciones favorables de las protuberancias solares, que emergen de la fotósfera cual fantásticas lenguas de fuego, se comprende que el sol pueda lanzar incesantemente al espacio raudales tan enormes de energía. Los astrónomos han tratado de explicar el origen de esta energía solar. Una vez que reconocieron que ella no podía ser debida a la contracción gravitacional forjaron diversas teorías, desde la que admitía una lluvia de bólidos en la superficie del sol, hasta la que suponía que su materia estaba constituída por elementos radioactivos que se desintegraban espontáneamente liberando su energía intra-atómica. Todas ellas fueron rechazadas sucesivamente porque el caudal de energía que suministraban era insuficiente para responder, con el gasto actual, de un sol cuya edad, calculada por diferentes métodos que dan cifras concordantes, debe ser del orden de los 10 mil millones de siglos. Una sola ha podido afrontar hasta hoy día exigencias tan severas: la que supone que en las profundidades de la masa solar por razones que nos son desconocidas la materia se aniquila. Si un electrón se precipita contra un protón, desaparece una determinada cantidad de materia, generándose, en cambio, un fotón de energía radiante. La teoría de la relatividad generalizada ha demostrado que la energía posee una masa. Según ella, la masa de un cuerpo en reposo representa una medida de la energía interna de este cuerpo. Einstein ha establecido que el producto de la masa que se aniquila por el cuadrado de la velocidad de la luz, da, en unidades absolutas, el valor de la energía liberada.

Reduciendo la energía que irradia el sol a unidades de masa a través de dicha relación, se encuentra que este astro debe perder 4 millones de toneladas de su materia por segundo. Aparentemente esta cifra es totalmente inverosímil. Sin embargo, si aceptamos que el sol ha irradiado siempre como hoy, una pérdida de masa igual a su masa actual, le asegura una vida pasada de 100 mil millones de siglos y si nos proyectamos en su vida futura, un cálculo elemental nos mostraría que perdiendo a razón de 4 millones de toneladas por segundo, el sol habrá gastado el uno por ciento de su peso actual que como sabemos es de 10^{33} gramos, después de haber transcurrido el mismo tiempo que le hemos asignado en su existencia pasada.

Podemos, pues, aceptar que la contracción gravitacional que constituía la fuente primordial de energía en la primera etapa de la vida de una estrella, es reemplazada en su segunda mitad, principalmente por el aniquilamiento de la materia. La estrella avanza lentamente en su camino descendente; reponiendo cada vez con más dificultad la energía irradiada su temperatura baja y con ello envejece. Vuelve a pasar por

los mismos tipos espectrales que recorrió en su juventud, pero ahora en sentido inverso; su luminosidad también sigue su curso descendente y cuando su temperatura alcanza los 3,000°, la estrella se ha reducido a una enana roja que está próxima a extinguirse.

Tal es, en líneas generales, el proceso que los astrónomos modernos admiten para explicar las evoluciones estelares. La inmensa mayoría de las estrellas que se han estudiado se encuentran en uno u otro estado de esta evolución. Sin embargo, hay un pequeño grupo cuyas características singulares han llamado la atención de los hombres de ciencia en estos últimos años. Nos referimos a las enanas blancas ya mencionadas. Sus características principales son las de tener un diámetro en algunos casos menor que 1/100 del diámetro solar, es decir, tienen dimensiones iguales o inferiores a nuestra tierra, lo que no les impide tener temperaturas elevadísimas. Pero la anomalía más interesante reside en que a pesar del volumen exiguo que poseen, en determinados casos menor que el millonésimo del volumen solar, tienen una masa que no es inferior a la de cualquiera otra estrella, de donde resultan densidades fantásticas que los astrónomos tratan de explicar admitiendo que la materia en estos astros se encuentra en un estado de degeneración—como dicen ellos—que consistiría en la ausencia total o casi total de los electrones planetarios de sus átomos. En la materia sólida o líquida que nosotros conocemos, los átomos están en contacto por su ambiente electrónico que le asegura a cada núcleo un vasto dominio. Si el átomo, pierde algunos electrones cede terreno y si se le somete a tratamientos cada vez más violentos puede llegar a perderlos todos y reducirse a su núcleo. El extraño material formado por núcleos desnudos que se tocarían entre sí alcanzaría las densidades prodigiosas que se han encontrado en las enanas blancas. Hoy día no se conocen más de 4 ó 5 ejemplares de estas estrellas entre las cuales figuran, como hemos dicho, el compañero de Sirio, cuya densidad es de 50 mil veces la del agua, la estrella de van Maanen que alcanza a 400 mil y la estrella de Kuiper a la que se le atribuye una densidad del orden de los 35 millones. Esta última pesa tres veces más que el sol y su diámetro es sólo la mitad del de la tierra; su temperatura efectiva es 28 mil grados y su magnitud aparente la 13ª. Una cajita de fósforos llena del extraño material de esta estrella pesaría 620 toneladas. Si se considera que la densidad del platino es 21, nuestra imaginación es totalmente incapaz de concebir estas cifras. Sin embargo, el fenómeno ha sido comprobado mediante la teoría de la relatividad. Estos astros ultra-compactos forman un campo de gravitación extraordinariamente intenso y Einstein había predicho que estos campos intensos debían desplazar las rayas espectrales hacia el rojo. Después de vencer grandes dificultades técnicas los astrónomos lograron obtener el espectro del compañero de Sirio y comprobaron que el desplazamiento de las rayas existía y era del orden de la magnitud prevista por la teoría.

Algunos astrónomos creen que cada estrella posee una masa central en este estado de degeneración, la que constituiría un sólido soporte de todo el edificio. Milne y Fowles, que han hecho en estos últimos años estudios especiales sobre la materia degenerada, sostienen que las enanas blancas serían el residuo de las estrellas normales que se han transformado en novas.