

Discurso de incorporación del Profesor Federico Rutllant Alsina

- a) Elogio del Profesor Doctor Ricardo Poenisch.
- b) Fuentes de energía del sol y de las estrellas.

Discurso de recepción del Profesor Carlos Mori Ganna

Discursos pronunciados por los señores profesores Federico Rutllant Alsina y Carlos Mori Ganna, el 12 de agosto de 1954, con motivo de la recepción, como Miembro Académico de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, del señor profesor Federico Rutllant A.

ELOGIO DEL PROFESOR DOCTOR RICARDO POENISCH *

Prof. FEDERICO RUTLLANT A.

Señor Rector, señor Decano de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, señores Miembros Académicos, señores Profesores, Señoras, Señores:

Era una tarde calurosa de la segunda mitad de noviembre de 1924. Hace casi treinta años. En la vieja casona de la Alameda con San Miguel, frente a la puerta de la sala de matemáticas del segundo piso, una veintena de alumnos del tercer año del Instituto Pedagógico, aguardábamos la llegada de nuestro profesor. Teníamos clase de Cálculo, de tres a cuatro, con don Ricardo Poenisch. Había ya sonado perezosamente el timbre y comenzamos a escuchar los crujidos de la desvencijada escalera posterior del edificio. Con paso lento, un tanto incierto, la grave humanidad de don Ricardo producía ruidos disonantes en cada peldaño. Acezando, con la respiración fatigosa visiblemente alterada por el esfuerzo, apretando nerviosamente varios libros y cuadernos con su mano izquierda y un puro casi consumido en los labios, abría con su llave la puerta de la sala. Ocupábamos nuestros asientos. Un alumno trataba en vano de refrescar el aula abriendo las ventanas. Don Ricardo, descargado ya de su sombrero, sus libros y su cigarro, enjugaba con el pañuelo el sudor copioso de su frente. A medida que sus músculos se distendían lentamente, comenzaban a aparecer en sus facciones rasgos inequívocos de equilibrio físico y en sus pequeños ojos expresivos brillaban todas sus innumerables inquietudes intelectuales.

En cualquier otro día, habría sacado del amplio bolsillo de su vestón la libreta de apuntes y, auxiliado con un cabo de lápiz minúsculo, nos habría pasado lista con los ojos miopes muy cerca del papel: Sr. Alvarez, Sr. Díaz, Srta. Sutter, . . . Después nos habría interrogado sobre la materia de la clase anterior.

Calificaba nuestros conocimientos en forma objetiva e imparcial, recorriendo toda la escala de notas; pero los "unos" menudeaban cuando, al surgir un escollo inesperado, ninguno de nosotros encontraba la

* Recibido para su publicación: Diciembre de 1955.

respuesta adecuada. Así ocurrió, cierta vez, en clase de Geometría Analítica, al discutir la ecuación general de segundo grado entre dos variables. Siete “unos” fueron colocados sucesivamente en aquella memorable ocasión.

Pero esa tarde de noviembre, lejana y aún viva en el recuerdo, don Ricardo no se movió de su asiento. No nos llamó para interrogarnos frente a la pizarra. Con voz pausada y triste, como desgranando las palabras y como tratando de penetrar con la mirada de sus ojillos vivaces hasta el fondo de nuestros espíritus —tal vez para grabar mejor la visión postrema— nos anunció que no sólo sería ésa la última clase del año, sino una de las últimas de su vida. Había llegado la hora de despedirnos...

Silencio cargado de emoción. Nos explicó que había solicitado del Supremo Gobierno le concediera su jubilación, después de 35 años de servicios, a los 65 de edad. Había dedicado toda su existencia a la enseñanza y los momentos más felices de ella los había pasado frente a sus alumnos.

—Veo en vosotros, nos dijo, a todos aquellos que han ocupado estos bancos, que al pasar por esta sala se han llevado algo de mí y que ahora, diseminados a lo largo de la República, están dedicados a enseñar a sus alumnos de los liceos. Noble misión la de enseñar... Hay que tener algo de asceta y mucho de sacerdote, bastante de erudito y un poco de redentor... Y luego vinieron los consejos, los consejos inolvidables. —No hagáis jamás una clase sin prepararla meticulosamente... Sed siempre justos con vuestros alumnos... Ayudadlos. Hacedles sentir vuestro fervor. Basta que algunos lo sepan agradecer para que sea una inversión remunerativa... y a la larga os dignificará. Sed ordenados y metódicos en vuestra vida pública y privada... y sobre todo —no lo olvidéis— trabajad, trabajad siempre con perseverancia, con abnegación, con amor...

Esta anécdota nos muestra un aspecto de la recia y vigorosa personalidad del doctor Poenisch. Con su salud ya quebrantada, sus inquietudes paternas excedían a los deberes puramente académicos y, en el otoño de su existencia, quería vaciar en nuestras almas juveniles la rica experiencia acumulada en largos años de trabajo sistemático, profundo, en esta eterna tarea del maestro de prodigarse tanto para recibir tan poco...

* * *

Clemente Ricardo Poenisch nació el 21 de diciembre de 1859 en Miera, Sajonia. Hizo sus estudios primarios y secundarios en la vecina ciudad de Doebeln. Después de recibirse de bachiller en 1879 y hasta 1884 estudió matemáticas y astronomía en la Universidad de Leipzig la que, dos años más tarde, le otorgó el título de Doctor en Filosofía y Bellas Artes, magna cum laude, desarrollando como tema de su disertación inaugural “Orbita definitiva del cometa 1877 III” que calculó tomando en cuenta las perturbaciones de Venus, la Tierra y Júpiter.

En 1889, durante el gobierno de Balmaceda —el visionario estadista que la perspectiva del tiempo ha agigantado— fué, como otros muchos maestros alemanes, contratado por nuestra Legación en Berlín para servir los ramos de Matemáticas, Física y Cosmografía en “el liceo nacional que el Gobierno tenga a bien designarle”. Llegado al país a fines del mismo año se le destinó al Liceo de Rancagua donde prestó sus servicios en 1890 y 91 como profesor de Algebra, Geometría, Cosmografía, Física, Francés y aún en la preparatoria del mismo liceo.

En 1892 el Supremo Gobierno lo nombra profesor en el Instituto Nacional donde en compañía del doctor Augusto Tafelmacher redactan los programas de Matemáticas, Cosmografía y Contabilidad del nuevo plan concéntrico que debía desplazar al llamado plan antiguo de estudios secundarios. Allí, entre una pléyade de sabios maestros, enseñó hasta 1910, fecha en que la Universidad comenzó a absorber sus energías por completo. En cierta ocasión, don Luis Galdames, expresó: “Si el mérito más positivo de un maestro consiste precisamente en hacerse comprender y amar de sus discípulos, al doctor Poenisch pertenece en toda su amplitud ese mérito; y es justo que lo proclamemos en alta voz, porque tal vez sea el homenaje de la gratitud y del recuerdo el más alto que pueda tributarse a la memoria del hombre que consagró la vida entera a cultivar su espíritu, para poner un poco de luz propia en el espíritu de los demás”.

Su cultura superior tuvo por base la clásica formación de los reales gimnasios alemanes. Dotado de una capacidad extraordinaria, trabajaba siempre con devoción y con modestia. En el Instituto Nacional, en las postrimerías del siglo pasado, se hizo cargo, una vez, de un grupo de muchachitos de nueve años y a través de tres cursos preparatorios y seis de humanidades, transformó a ese puñado de infantes en otros tantos adolescentes con conocimientos sólidamente adquiridos, hábitos de trabajo responsable e intensivo y una esmerada educación. No hizo valer su título de doctor de una universidad europea para rechazar la humildad de tan grande tarea. Por el contrario, vió en ellos a muchos hijos que se le entregaban para transformarlos en hombres integrales.

Su cariño por Chile fué creciendo y robusteciéndose con el tiempo. A poco de llegar contrajo matrimonio, en Rancagua, con una dama chilena. Chileno fué el hogar que con ella compartió y chilenos fueron también sus hijos, sus amigos, sus sentimientos. Arraigado con sinceridad en esta tierra, más de una vez, juzgó halagadoramente el presente y el porvenir cultural y material de nuestra República. En 1922 el Gobierno le otorgó la condecoración al mérito en el grado de Oficial y poco después le concedió la carta de naturalización que le daba ciudadanía chilena.

En los Anales de la Universidad de Chile del año 1893 se publicaron dos trabajos matemáticos que lo dieron a conocer en los círculos científicos universitarios. En el primero “Ecuaciones diferenciales parciales de segundo orden y primer grado” establece las condiciones bajo las cuales una ecuación diferencial de segundo orden y primer grado, con “n” variables independientes, puede ser equivalente a un sistema de dos

ecuaciones de primer orden y primer grado. En el segundo "Estudios sobre la teoría geométrica de las funciones" divulga cuestiones fundamentales que preocupaban en aquella época a los centros matemáticos del viejo mundo: ampliación del campo de los números naturales hasta llegar a los complejos. Interpretaciones geométricas de operaciones con estos números le dan ocasión para mostrar ejemplos del cálculo de equipolencias de Bellavitis, y después, a propósito de la imposibilidad de un sistema de hipercomplejos en que se conserven todas las leyes fundamentales, caracteriza el sistema de los cuaterniones de Hamilton y el de los números alternos de Grassmann.

En 1894 se somete con éxito a las pruebas que le fija la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile para ser designado profesor extraordinario en la asignatura de Álgebra Superior. Con una breve interrupción sirvió estas clases hasta 1906. Durante los años 1895 y 96 tuvo a su cargo, en calidad de suplente, la cátedra de Trigonometría Esférica Geodesia y Astronomía de la Escuela de Ingeniería. En 1904 la H. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas lo elige su miembro académico y en 1907 es nombrado profesor de Matemáticas en el Instituto Pedagógico y, en calidad de interino, profesor de Geometría Analítica de dos y tres dimensiones en la Escuela de Ingeniería. En 1909, veinte años después de su llegada a Chile, fué nombrado, en propiedad, profesor de Geometría Analítica y de Álgebra Superior en la misma Escuela. También en 1907 y 1908 desempeñó las clases de Cálculo Diferencial e Integral de la Academia de Guerra, de reciente fundación.

Sus lecciones universitarias, de método impecable, eran dirigidas a todos sus alumnos. Buenos y malos debían tomar parte activa en la clase. Exigía atención concentrada y era intransigente en materia de disciplina. Aprovechaba cada oportunidad para inculcar a sus alumnos del Instituto Pedagógico la metodología que su criterio y experiencia le señalaban como deseable en el futuro profesor. Sus clases, preparadas escrupulosamente, eran un modelo, en la forma y en el fondo. Guiaba con tenacidad el trabajo del alumno, cultivando los hábitos adecuados, combatiendo los que no lo eran, teniendo siempre como norte y guía la función de educar y de instruir. Su sentido de la responsabilidad era tal que si en su enseñanza universitaria notaba la necesidad de nuevas horas de clases, las hacía sin esperar nombramiento ni remuneración.

En el cementerio, al inhumarse sus restos, don Pedro Godoy, dijo: "El doctor Poenisch era un sabio y un profesor de verdad que siempre se mantuvo al nivel de las delicadas responsabilidades de su carrera. Con finos sentidos de observación y análisis y muy bien adaptados al ambiente donde fundara su familia y desarrollara sus actividades, supo sin embargo, poner de relieve y exaltar en sus alumnos las cualidades ideales propias de su origen y educación germánicos. Realizaba en la medida de las posibilidades esa transfusión de virtudes que es por esencia la misión universal del educador."

En aquella misma oportunidad, don Enrique Froemel, expresó: "Este maestro tuvo tantos discípulos que su escuela y su nombre se conocen de norte a sur del país y fuera de él también. Junto con llorar la pér-

“dida de quien fué ejemplo de nosotros, nuestra frente se levanta se-
“rena. No en balde actúa el recuerdo; la tradición que se forma nos
“infunde confianza. Se agiganta la figura del maestro, se pierden los
“detalles, sólo queda lo grande de sus actos; se divisa un emblema, se
“sabe de una reliquia y, con todas estas cosas, que sin corazón deberían
“juzgarse como nimias, hay muchos que adquieren nuevas formas para
“actuar.”

Perseguía implacable el error, estuviere éste en una ecuación, en un concepto o en una simple falta de sintaxis, ortografía o concordancia. Aún cuando nunca perdió su leve acento teutón tenía una redacción castellana perfecta. Un distinguido ex alumno del Instituto Nacional solía decir que donde más castellano había aprendido era en las clases de matemáticas del doctor Poenisch y de francés de don Antonio Díez.

Entre las comisiones que desempeñó el doctor Poenisch, cabe citar que fué miembro de la Junta de Vigilancia del Observatorio Astronómico durante cuatro periodos, de dos años, a contar de 1901. Visitador accidental de liceos. Examinador de matemáticas en las comisiones universitarias y examinador de grados en la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Redactó los programas de la asignatura de matemáticas del año 1912 para los liceos de toda la República. Trabajó ad-honorem en la confección de los cálculos previos a la organización de la Caja Nacional de Empleados Públicos y Periodistas. Fué miembro de la comisión que estudió los fenómenos sísmicos del terremoto de 1906. También integró la comisión que informó sobre los trabajos del levantamiento de la Carta, a cargo del Estado Mayor del Ejército. Colaboró, además, en la fundación de la Academia Técnica Militar de la que fué profesor ad-honorem de Cálculo Diferencial e Integral, durante el primer año de su funcionamiento.

El Instituto de Ingenieros de Chile lo contó entre sus miembros honorarios. Fué también miembro de la Sociedad Astronómica de Berlín, miembro de la Sociedad Matemática Española y miembro del Consejo de Patronato de la Revista Hispano-Americana de Matemáticas, con sede en Madrid. En 1904 colaboró en una Revista de Matemáticas, seguramente la primera de su género en Sudamérica, que dirigía un entusiasta profesor chileno.

Las publicaciones del doctor Poenisch fueron nutridas y de alta jerarquía científica. Las de carácter didáctico fueron y continúan siendo ampliamente usadas en los liceos de la República. En colaboración con el doctor Augusto Tafelmacher publicó los seis tomos de “Elementos de Matemáticas” para la enseñanza secundaria que contienen las bases del álgebra, geometría, trigonometría y estereometría. El “Curso de Matemáticas Elementales” consta de los dos primeros tomos de geometría, el tomo III de álgebra escrito en colaboración con don Francisco Pröschle y el tomo IV de trigonometría en colaboración con don Enrique Froemel y don Manuel Pérez Román. También en colaboración con el primero de éstos tradujo los dos tomos de la obra de Hoffman “Construcciones Planimétricas” para el uso de los estudiantes universitarios,

La serie de "Introducción a las matemáticas Superiores" tan conocida por los que fueron sus alumnos de la Escuela de Ingeniería y del Instituto Pedagógico, consta del tomo I, Análisis; tomo II, Geometría Analítica, y el tomo III, Geometría Analítica de tres dimensiones. Tanto este último como los "Apuntes de Cálculo Infinitesimal" que contenían sus lecciones dictadas en la Escuela de Ingeniería circularon sólo poligrafiados para uso de sus alumnos.

En numerosas ocasiones dictó conferencias de enjundioso contenido, entre las cuales cabe destacar "El Universo" y "Nuestro Problema Educacional".

En 1928, la Universidad de Chile publicó sus apuntes de las lecciones del doctor Neuman sobre la "Teoría de Riemann de las integrales Abelianas" que contienen el estudio de la inversión de una integral de Abel, los elementos más importantes de la teoría de funciones de variable compleja, el teorema de la integral de Cauchy, el desarrollo en serie de Taylor, la representación con superficie de Riemann, etc.

En 1922, fué llamado a desempeñar la cátedra de Cálculo Diferencial e Integral de la Escuela de Ingeniería en reemplazo del profesor titular, don Alberto Obrecht, que hubo de retirarse por enfermedad. En aquel mismo año, a su iniciativa, se constituye un Círculo de Matemáticas en el que profesores e ingenieros forman un núcleo de estudios que publica por algunos años un Boletín.

A comienzos de 1925, el Supremo Gobierno le otorga los beneficios de la jubilación. Pero sigue aún por algún tiempo haciendo las clases de Cálculo de la Escuela de Ingeniería y después, desde su retiro, continúa preocupado de los problemas educacionales y de sus estudios matemáticos. Pero una afección cardíaca ha restado ya energías a su naturaleza y su vigor físico comienza a decaer visiblemente.

Era un domingo radiante y luminoso de sol, del invierno de 1936. Una docena de sus ex alumnos tomábamos, en la mañana, temprano, el tren que nos conduciría a Quillota. Iba entre nosotros don Carlos Videla. Escuchemos cómo relató él, emocionado, hace 17 años, aquella visita: "En junio del año pasado, fuimos, un grupo de profesores, ex alumnos suyos, a visitarlo a su residencia de Quillota, donde en quietud de nuevo hogar, descansaba de su peregrinaje por costas y climas suaves a que lo había tenido obligado su precaria salud."

"Deseábamos verlo y oír nuevamente su palabra, sin saber que iba a ser por última vez. Su memoria, casi intacta, le permitió reconocer nos a todos y pudimos gozar con su charla amena, salpicada de anécdotas y recuerdos."

"A los 76 años, vivía sus últimos meses, como siempre, entre sus libros; sobre su mesa de trabajo estaban las cuartillas con ecuaciones y con integrales que sus manos, temblorosas ya, habían escrito el día anterior."

Tres meses más tarde, a la hora del crepúsculo vespertino del 28 de septiembre, cuando las primeras estrellas asomaban tímidamente en la bóveda celeste, se extinguió apacible la vida de este gran maestro.

Señor Rector, señor Decano: La honrosa designación con que me ha distinguido la H. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas al elegirme miembro académico, compromete mi gratitud. Convencido como estoy de la exigüidad de mis recursos y de mis méritos para integrarme en el seno de tan esclarecida y docta corporación, siento que deberé multiplicar mis esfuerzos para elevarme a esta nueva jerarquía.

Pero hay algo más. La H. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas quiso que fuera uno de sus alumnos, más exactamente, uno de sus discípulos, quien ocupara el sillón que dejó vacante el venerado maestro. Por este motivo, hubiera querido que hoy, mi palabra habitualmente débil e inexpresiva, resonara elocuente en esta sala que ostenta las efigies de tan ilustres y preclaros personajes, honra y brillo de esta centenaria Casa de Estudios.

Frente a la vigorosa efigie moral del doctor Poenisch, en su escuela de maestro de verdad, aprendí a fortalecer mi voluntad, a templar mi espíritu, a cultivar mis facultades intelectuales con sostenido y renovado entusiasmo, a trabajar con disciplina y honradez y a poner amor en la tarea, sin desmayos ni vacilaciones. . . Y así, con estas armas, ocuparé el sillón académico de mi antecesor, plenamente consciente de la responsabilidad que con ello asumo.

FUENTES DE ENERGIA DEL SOL Y DE LAS ESTRELLAS *

Prof. FEDERICO RUTLLANT A.

Séanos permitido, antes de entrar en el nervio mismo de esta disertación, trazar, a grandes pinceladas, un bosquejo esquemático del universo astronómico actualmente explorado.

Viajemos para ello a la velocidad de un rayo de luz, vale decir, a 300.000 kilómetros por segundo. Si partimos de la Tierra, poco después de un segundo llegaríamos a nuestro satélite, la Luna. Mas si nuestra estación inicial fuera el Sol, encontraríamos los planetas de acuerdo al siguiente itinerario: Mercurio, poco después de 3 minutos de iniciado el viaje, Venus a los 6 minutos, la Tierra 8 minutos 20 segundos y en rápida sucesión los demás miembros de la familia solar, Marte, los pequeños planetas, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón. A este último llegaríamos 5 ½ horas después de nuestra partida del Sol.

Pasarían, en seguida, días, semanas, meses, muchos meses, sin que encontrásemos ningún objeto celeste. Deberían transcurrir 4.3 años para llegar a la estrella más cercana al Sol, la hermosa Alfa Centauro: una sola estrella a ojo desnudo, doble en el telescopio, pero en realidad triple con su componente Próxima Centauro. Después pasaríamos muchas estrellas: la brillante Sirio a 8.6 años, Achernar a 70 años-luz, Beta Centauro a 190, la gigante Rigel a 540. Y así podríamos contar miles, millones de estrellas. Todas estas estrellas pertenecen a un solo gran sistema llamado Galaxia. El Sol es una de ellas y se le puede considerar como un ejemplar sin características sobresalientes.

Esta Galaxia tiene una forma lenticular, más familiarmente, la forma del objeto que arrojan los atletas en el lanzamiento del disco. Su diámetro mayor es de unos 100.000, y el menor 15.000 años-luz. El Sol, con su cortejo de planetas, ocupa una posición casual, próxima al plano galáctico, pero casi más cerca del borde del disco que del centro.

Las estrellas no están distribuidas al azar en el interior de la Galaxia. Diríamos que están más bien organizadas en una jerarquía de sistemas dentro del singular gran sistema. Desde luego, alrededor de la mitad de ellas poseen compañeras con las que forman sistemas binarios,

* Recibido para su publicación: Diciembre de 1955.

como ocurre en Sirio. Con menor frecuencia se presentan casos de varias estrellas, dinámicamente asociadas, y que están próximas si se las compara con la separación media de las estrellas de la Galaxia, tal Alfa Centauro. Tenemos después los cúmulos de estrellas, algunos irregulares, dispersos, abiertos, como el de las Pléyades, que contienen de algunos cientos a unos pocos miles de estrellas; otros regulares y compactos, llamados cúmulos globulares, con decenas de miles de estrellas, como el enjambre formado por Omega Centauro.

Desde otro punto de vista, mirando a la Galaxia como una unidad, existen regiones en las cuales las estrellas y los sistemas de estrellas tienden a concentrarse y otras que están casi vacías, de tal manera que el conjunto posee una estructura caracterizada por un núcleo central de material relativamente homogéneo del que irradian brazos gigantescos en forma de espiral. De aquí el nombre de nebulosas espirales que se ha dado a estas gigantescas aglomeraciones similares a nuestra Galaxia.

El espacio que separa a las estrellas está mucho más enrarecido que el mejor vacío que se puede producir en un laboratorio de física terrestre. Sin embargo, contiene materia, la llamada materia interestelar, parte de la cual está en forma de gas y parte como polvo de partículas finísimas. Este material interestelar, a su vez, no está repartido uniformemente. Tiende a concentrarse en el plano galáctico y a agruparse formando nubes. Si éstas son suficientemente densas y están iluminadas por estrellas brillantes vecinas, como ocurre con la Nebulosa de Orión, pueden ser vistas directamente en forma de nubes difusas. Si, por el contrario, la densidad es favorable, mas no así la iluminación, su presencia se manifiesta por un oscurecimiento del fondo estelar, como ocurre en el Saco de Carbón, próximo a la Cruz del Sur. Pero, en general, la existencia de este material interestelar se reconoce por los leves rastros que deja en la luz de las estrellas que lo atraviesa. A pesar de su sutileza, el material interestelar constituye una parte substancial de la Galaxia y su cantidad total es igual, por no decir mayor, que la cantidad de materia contenida en todas las estrellas juntas.

Valga lo anterior como una instantánea posicional estática de la Galaxia.

Si analizamos ahora los movimientos de los elementos que la constituyen, encontraremos también una gran pluralidad. Ambos componentes de un sistema doble giran en torno al centro de gravedad común. En general, en cualquier sistema de estrellas, cada estrella está en movimiento relativo con respecto al sistema, y éste, a su vez, como un todo, está en movimiento relativo con respecto a porciones galácticas vecinas. También las nubes interestelares participan de este movimiento relativo, sea entre ellas mismas, o con los sistemas estelares. Mas aún, toda la Galaxia entera rota en su propio plano; pero no como un cuerpo rígido, porque las partes interiores giran más rápido que las exteriores. Esta comunidad de movimientos de todas las regiones galácticas es quizás la prueba más concluyente de que toda la Galaxia forma una sola y gran unidad.

Las nebulosas espirales son estructuras similares en tamaño, masa y composición a la Galaxia. Por esto se las suele llamar galaxias externas. A simple vista no se ven más de dos o tres, entre ellas, la Nebulosa de Andrómeda, la más próxima a nosotros, a un millón y medio de años-luz. Pero los grandes telescopios de Monte Wilson y Monte Palomar registran tantas nebulosas espirales en las placas fotográficas que se acepta que existen miles de millones de ellas repartidas en todo el Universo explorado. Se presentan en grupos y en cúmulos, pero su distribución general en el espacio aparece uniforme, siendo la distancia media de dos vecinas cualquiera del orden de cien veces el diámetro medio de una sola galaxia. En la época actual, todas ellas se alejan unas de otras, siendo su velocidad de receso proporcional a la distancia. Este es el fenómeno conocido con el nombre de "expansión del Universo" y del cual la teoría de la relatividad ha dado una explicación adecuada.

Puntualizadas estas generalidades, entremos en materia.

* * *

Para medir las cantidades gigantescas de energía que, en flujo constante, abandonan la superficie del Sol, vertiéndose en raudales de luz y de calor en los espacios interplanetarios, nos valemos de un instrumento de medición térmica llamado el pirheliómetro. Se trata de un calorímetro inventado por Peuillet y uno de los Herschel, hace ya más de cien años, que permite medir la radiación solar. Los pirheliómetros antiguos estaban basados en el aumento de temperatura, controlado por un termómetro de precisión de una masa dada de agua contenida en un recipiente de paredes opacas y ennegrecidas y que se exponía a la acción de los rayos solares durante un tiempo determinado.

La versión moderna de los pirheliómetros está constituida por un aparato standard que utilizan los observadores de la Smithsonian Institution, diseminados en diferentes puntos de la superficie de nuestro planeta. En Chile, a unos 15 km al sureste de Calama, en las inmediaciones del mineral de Chuquicamata, existe, desde hace años, una de estas estaciones de la Smithsonian, en condiciones geográficas y meteorológicas excepcionalmente favorables, ya que a sus 2.900 m de altura sobre el nivel del mar y los correspondientes cielos de extraordinaria transparencia, una ausencia casi total de nubes que determinan un promedio de 350 días astronómicamente hábiles en cada año.

El calorímetro que allí se usa, consta de un disco de plata de unos 38 mm de diámetro y de 13 mm de espesor, el cual, después de absorber la radiación solar durante una exposición de 100 seg, aumenta su temperatura en unos 2.5° C. Efectuadas las correcciones por factores externos en la vecindad del pirheliómetro, por constantes instrumentales, por distancia cenital del Sol y por absorción atmosférica, los cálculos arrojan para la constante solar un promedio de 1.95 cal por cm² y por min. Por más que se han estudiado en forma acuciosa las posibles variaciones del valor de esta constante, se ha encontrado que, si ellas existen, son menores que la suma de los varios errores a que está expuesta su

determinación. Estos errores se deben principalmente a la inevitable interferencia de la atmósfera terrestre que influye a través de la absorción gaseosa y de la dispersión por las moléculas y partículas de tamaño mayor. En todo caso, el valor hoy día aceptado, de 1.95 cal por cm^2 y por min no adolece de un error mayor que un uno o un dos por ciento.

Otra forma de materializar la enorme magnitud de la energía solar consiste en estudiar la presión que la radiación del Sol ejerce sobre la Tierra. El hemisferio terrestre que está dirigido hacia el Sol se encuentra expuesto a su radiación y ésta genera una presión cuyo valor depende de la superficie sobre la cual actúa, de la cantidad de energía radiante, del poder reflector de la superficie y del ángulo de incidencia. Para resistir a una tracción igual a esta presión, en el caso de nuestro planeta, se necesitaría un cable de acero cuyo diámetro fuera de 112 cm.

En las inmediaciones de la superficie solar, la intensidad de la radiación es 46.000 veces mayor que a la distancia de la Tierra, mientras que allí la atracción newtoniana es sólo 27.5 veces mayor que la pesantez terrestre. Resulta así que, partículas materiales de dimensiones convenientes, pueden quedar en suspensión en la atmósfera solar o aún ser arrojadas lejos de la superficie. Para ello basta que la presión de radiación sea igual o superior a la gravitación solar. Naturalmente, las consideraciones anteriores no se aplican a cuerpos que son atravesados parcialmente por la luz ni a partículas ultramicroscópicas. Por lo demás, ya Eddington en su obra "La constitución interna de las estrellas" demostró que la presión de radiación desempeñaba un papel importantísimo en el equilibrio interno de estos astros.

Partiendo del valor 1.95 cal por cm^2 y por min, un cálculo aritmético sencillo, nos dice cuál es el flujo total de energía que el Sol emite, si se considera que, sobre cada cm^2 de una esfera gigantesca que tuviera por radio la distancia Sol-Tierra, caen casi 2 cal por min. Este resultado se puede expresar de varias maneras: el Sol irradia en cada seg un total de 4×10^{33} ergs, lo que equivale a 10^{41} ergs por año. Pero resulta más simple decir que cada cm^2 de la superficie solar suministra la energía suficiente para mantener en marcha ininterrumpida un motor de 9 caballos de fuerza.

¿Desde cuándo gasta el Sol energía a este ritmo colosal? Los geólogos saben contestar a esta pregunta. Desde hace muchos millones de años. Basan esta afirmación en la existencia de restos fósiles que hoy conocemos como minas de carbón y yacimientos petrolíferos. Por las capas de significado geocronológico que estos minerales ocupan en la corteza terrestre, los geólogos saben que fueron originados por seres vegetales o animales que vivieron hace varios cientos de millones de años. Pero la vida, en la superficie de nuestro planeta, sólo prospera allí donde la temperatura varía entre límites muy estrechos. Y si la vida fué posible en aquella época remota, ello se debió a que la radiación solar fué entonces aproximadamente igual a lo que es ahora.

Aquellos que no gusten de extrapolaciones tan atrevidas para determinar la edad de la Tierra pueden recurrir a otro método que se basa en los procesos radioactivos. El uranio y el torio sufren desintegraciones

nucleares espontáneas en las que, a través de la emisión de partículas alfa, beta y rayos gama, los núcleos atómicos radioactivos se degradan hasta llegar a los últimos elementos estabilizados de la escala de transmutaciones: el plomo y el helio. El ritmo de estas transformaciones es inalterable. Agentes físicos como la temperatura, la presión, etc. no atrasan ni adelantan estos procesos de desintegración atómica que constituyen lo que se ha llamado “el reloj radioactivo”. Midiendo el contenido de plomo y helio de las rocas y aceptando que todos los vestigios detectables de estos elementos son el último eslabón de la cadena radioactiva iniciada por el uranio y el torio, se puede calcular la edad de la capa geológica en que esas rocas se encuentran. De esta manera se ha estimado que la corteza terrestre existe desde hace por lo menos dos mil millones de años.

Otro método indirecto para determinar la edad de la Tierra, como constituyente del sistema planetario, consiste en estudiar, también desde el punto de vista radioactivo, diferentes muestras de aerolitos que nuestro planeta ha captado en sus viajes a través del espacio. Aún cuando los resultados obtenidos muestran una dispersión considerable, se puede aceptar como promedio de edad de dichos meteoritos el valor de mil millones de años.

Podemos así admitir que el flujo de radiación solar no ha cambiado apreciablemente en los últimos dos mil millones de años y que en este lapso de escala cósmica, el Sol ha disipado en forma de energía radiante más de 10^{50} ergs.

En la época presente, el Sol contiene dentro de su masa, a) energía radiante que alcanza a unos 3×10^{47} ergs; b) energía cinética de los átomos y de los electrones de alrededor de 3×10^{48} ergs, y c) energía de ionización y excitación que alcanza a unos 3×10^{48} ergs. Suponiendo que invirtiéramos todas estas cantidades prodigiosas de energía, disponibles de inmediato, en alimentar el horno solar, éste podría subsistir por no más de 50 millones de años, período que, como vemos, resulta totalmente insuficiente.

Por otra parte la masa del Sol es de 2×10^{33} gr; luego, en término medio, cada gramo de la masa solar ha generado en los últimos dos mil millones de años, por lo menos, 10^{17} ergs. Para justipreciar mejor esta extraordinaria cantidad de energía, podemos considerar que un gramo de carbón, al quemarse totalmente, nos proporciona 3×10^{11} ergs, de tal manera que, en igualdad de condiciones de masa, el material solar es un millón de veces más eficiente que el carbón, cuando de generar energía se trata.

¿Qué ocurre con las demás estrellas cuando se comparan con el Sol? Una de las características más notables del cielo estrellado es la enorme diversidad entre los brillos aparentes de las estrellas individuales. Sirio, la más brillante de ellas, es dos mil millones de veces más luminosa, vista desde la Tierra, que la más débil de las estrellas que puede ser fotografiada con el más potente de nuestros telescopios. Esto en cuanto al brillo aparente. En cuanto a la luminosidad intrínseca, existen es-

trellas desde un millón de veces más brillantes hasta un millón de veces menos brillantes que el Sol.

La temperatura superficial del Sol en 5.730° K en circunstancias que hay estrellas cuya temperatura es del orden de los 110.000° K y otras las más frías, que alcanzan apenas a los 2.000° K, inferior a la temperatura de un horno eléctrico de laboratorio. En cuanto a las temperaturas centrales, se admite que la solar es del orden de los 15 millones de grados y que en algunas estrellas novas y supernovas se deben considerar probables valores extremos de unos diez mil millones de grados absolutos.

Otro parámetro que origina diferencias enormes es el tamaño. La componente infra-roja de la estrella doble Epsilon Aurigae es tan grande que recorriendo su órbita con la velocidad de 30 km/seg en torno a su brillante estrella primaria la eclipsa durante 500 días. Esto significa que la cuerda de la estrella infra-roja, detrás de la cual pasa la estrella brillante durante el eclipse, tiene una longitud de dos mil millones de kilómetros. Si el eclipse fuera central, éste sería el diámetro de la compañera infra-roja; pero no lo es, porque el plano de la órbita no pasa por el ojo del observador. Resulta así, que el diámetro de la estrella infra-roja es de cuatro mil millones de kilómetros, es decir, tres mil veces el diámetro solar. Más simplemente, si se colocara en el centro de la compañera supergigante de Epsilon Aurigae, el Sol con toda su familia, los únicos planetas que quedarían exteriores a la estrella serían Neptuno y Plutón.

En el extremo opuesto de la escala, están las enanas blancas, con diámetros similares al de la Tierra o aún al de la Luna, lo que significa la 400 avas parte del diámetro solar. Así el diámetro de la más grande es un millón de veces mayor que el de la más pequeña y el Sol se encuentra más cerca de ésta que de aquélla, razón por la cual los astrofísicos lo califican entre las estrellas enanas.

Otro factor que experimenta variaciones pequeñas, pero que es necesario considerar, es la masa de las estrellas. Las hay desde 50 veces más pesadas hasta 10 veces más livianas que el Sol. Un caso excepcional lo constituye el anuncio, hecho recientemente por K. As. Strand acerca de la existencia de una tercera componente en el sistema 61 Cygni, con una masa de 0.016 de la masa solar, lo que la hace sólo 16 veces más pesada que Júpiter.

Si combinamos, finalmente, las variaciones de masa con las de tamaño, obtendremos toda la gama de variaciones de densidades estelares. La gigante Antares, que tiene una masa 20 veces mayor que la del Sol, tiene un diámetro que es 480 veces el solar. Así, la densidad media de esta estrella resulta del orden del 10 milésimo de la del aire; es casi transparente. En el extremo opuesto de la escala están las enanas blancas. La más conocida de ellas es Sirio B, que con una masa equivalente a la solar tiene un radio igual a $1/50$ del del Sol, es decir, algo más del doble del radio terrestre. De aquí que, su densidad media resulte igual a 175 mil veces la del agua y su gravedad superficial 2.500 veces mayor que la solar y 70 mil veces mayor que la terrestre. Esta última

característica de tener en su superficie un campo gravitacional intensísimo, hizo posible que en Sirio B se verificara experimentalmente el efecto previsto por la teoría de la relatividad, en el sentido de que las líneas espectrales originadas por la luz que abandona un cuerpo con campo gravitacional intenso, deben acusar un desplazamiento hacia el rojo. Conocemos hoy otras enanas blancas, como las estrellas de van Maanen y de Kuiper con densidades del orden de los 400 mil y 25 millones de gr/cm^3 , respectivamente.

Se supone que estas estrellas, residuos de un proceso evolutivo avanzadísimo, habrían dilapidado casi toda la energía subatómica de que estaban provistas y la mayor parte del material que las constituye, estaría formado por la llamada "materia degenerada". Tratemos de explicar el significado que encierra esta expresión.

Sabemos que a pesar de las densidades muy elevadas que alcanzan en su centro las estrellas normales —del orden de 120 gr/cm^3 en el centro del Sol— la materia se conduce como si fuera un gas perfecto porque, los núcleos atómicos y los electrones disociados por la ionización, provocada por una temperatura de unos 15 millones de grados absolutos, son mucho más elásticos que cuando están asociados en átomos organizados. Pero en las enanas blancas toda la masa se comprime en un volumen de orden planetario. Entonces el material estelar alcanza densidades que desafían la imaginación y la mezcla caótica de electrones y de núcleos, apretujados los unos contra los otros, ya no constituyen un gas perfecto. Se le ha dado el nombre de gas electrónico, o mejor, gas de Fermi, en homenaje al físico nuclear italiano que fué el primero en abordar su estudio teórico. A pesar de todo sería una especie de gas ya que estaría compuesto de partículas independientes que se agitan en todos sentidos; pero sería muy diferente a los que nos son familiares. En efecto, los electrones en los átomos normales poseen una energía de movimiento mínima que los mantiene en su órbita impidiéndoles precipitarse contra el núcleo. Asimismo, cuando en el gas de Fermi los electrones son arrancados del edificio atómico normal, excesivamente complejo para subsistir en un espacio tan minimizado, conservan en su agitación desordenada esta misma energía de movimiento que origina la presión interna considerable ejercida por este singular gas electrónico y que se opone a la presión de las capas exteriores del astro.

Como lo han establecido las investigaciones del astrofísico hindú Chandrasekhar, en este estado llamado degenerado, la materia ocupa contrariamente a nuestra experiencia habitual, un volumen tanto más pequeño cuanto mayor es su masa, porque la tensión del gas de Fermi crece más lentamente que la presión gravitacional de las capas exteriores del astro, cuando la masa total aumenta. La presión a partir de la cual los edificios atómicos se derrumban bajo las fuerzas de la compresión mecánica ha sido calculada en 10 millones de atmósferas. Mientras la presión no alcanza este valor crítico, la materia, aún cuando muy comprimida, conserva sus propiedades relativamente normales: los planetas más voluminosos son los más pesados. Por encima de esta presión crítica las estructuras atómicas se desploman catastróficamente y la ma-

teria se convierte en un gas generado: en una enana blanca a mayor masa corresponde menor volumen.

Hay algo más. En el interior de los planetas la materia sólida normal permanece casi homogénea a causa de su rigidez, mientras que en el interior de las enanas blancas, la densidad de la materia degenerada crece rápidamente a causa de la compresibilidad del gas de Fermi. Júpiter, el gigante de nuestro sistema planetario, con una masa igual a 0.001 de la solar, tendría en su centro una presión próxima a los 10 millones de atmósferas: sería, en consecuencia, el prototipo de la mayor cantidad de materia sólida ordinaria que podría existir en una sola unidad.

Otra propiedad fundamental y sorprendente de la materia degenerada es que, aún cuando se la lleve a temperaturas elevadísimas, como las que ocurren en las enanas blancas y que alcanzan a decenas y aún centenas de millones de grados absolutos, es incapaz de emitir ninguna radiación. Para un observador exterior, la estrella debe permanecer oscura y parecer fría. En efecto, la temperatura es una manera de expresar el estado de agitación de las partículas de la materia y éstas, para suministrar la presión necesaria al mantenimiento del equilibrio del astro, deben moverse con velocidades enormes —en el caso de los electrones exceden muchos millares y aún decenas de millares de kilómetros por segundo— y de aquí que la temperatura sea incontestablemente muy elevada. Pero, por otra parte, para que la estrella emita radiación, es necesario que, en los átomos, los electrones pasen de un nivel energético mayor a uno menor, emitiéndose la diferencia, durante la transición, en forma de un fotón. Obviamente en la materia degenerada, esta transición, o cualquiera otra es imposible porque los electrones, como ya está expresado, se encuentran en el estado de energía mínima que les ha impuesto la presión agobiante de las fuerzas exteriores. Por lo demás, el principio de exclusión de Pauli establece que los electrones, sean éstos planetarios o libres, no pueden tener el mismo conjunto de números cuánticos; en términos más sencillos, el número de lugares disponibles para los electrones que tienen un estado de energía mínima es estrictamente limitado. Precisamente, se dice que la materia está “completamente degenerada”, cuando todos esos lugares están ocupados y entonces ya no puede emitir ninguna radiación.

En las enanas blancas subsiste todavía una capa superficial de algunos centenares de kilómetros de espesor en la que la materia no está degenerada. El gas que la forma está lejos de la presión crítica y los átomos pueden conservar sus cortejos electrónicos; es gracias a la radiación que emite esta delgada película superficial que podemos ver y estudiar estas estrellas. Así se ha comprendido y explicado por qué las enanas blancas no obedecen a la relación masa—luminosidad: la mayor parte de la masa que ocupa el núcleo de la estrella no participa en la producción de radiación.

Resumamos los antecedentes reunidos: el Sol es una estrella enana, de luminosidad discreta, más bien fría, de poca masa. En la época actual se encuentra en un punto relativamente avanzado de su proceso evolutivo. Sin pecar de pesimistas, casi nos atreveríamos a decir que, a fuerza

de prodigarse en la edad madura con esplendidez, ha dilapidado ya tantas energías, que se encuentra próximo al período de la senectud. . .

Hemos comprobado cómo, desde hace por lo menos mil millones de años y con un flujo comparable al ritmo presente, se ha generado energía radiante en las profundidades insondables de la masa solar, allí donde reinan condiciones de temperatura, presión, densidad, absolutamente extrañas a nuestra experiencia terrestre. Esta energía, liberada en la superficie del astro en cantidades prodigiosas, que los instrumentos de hoy acusan como equivalente a una potencia efectiva de 6×10^{23} kilowatts —600.000 millones de millones de millones de Kilowatts— ha significado un grave problema.

Veamos cómo lo enfocaron los físicos y los astrónomos de los últimos 100 años y cómo lograron resolverlo en nuestros días.

Mayer, a mediados del siglo pasado, suponía que la radiación solar era alimentada por la energía cinética, transformada en calor, de una lluvia continua de meteoritos que caería en el Sol atraída por su enérgico campo gravitacional. Pero tal lluvia continua de material debería hacer crecer en forma sensible la masa solar y esta variación repercutiría en los movimientos planetarios, hecho que las observaciones no acusan.

Poco después, Helmholtz sugirió la hipótesis de la contracción de una esfera gaseosa producida por su propia gravitación. A pesar de ser este proceso más eficaz que el de los impactos meteóricos, es todavía insuficiente. El cálculo nos indica que para alimentar el presente flujo de radiación, el Sol debería contraer su radio en 37 m por año, valor, hoy por hoy, imposible de observar; pero en el lapso de dos mil millones de años el Sol habría desaparecido por completo. Por otra parte, si el Sol se hubiera contraído desde un tamaño infinitamente grande hasta su radio actual de 7×10^{10} cm, la cantidad de energía gravitacional liberada habría alcanzado a 6×10^{48} ergs y la fracción de ésta que se habría transformado en energía calórica sería menor que el total del calor generado por el Sol durante la edad de la Tierra. Por lo demás, Eddington demostró que la energía gravitacional que se obtendría si el Sol se contrajera desde el infinito hasta su radio actual, sería suficiente para mantener su gasto presente durante 23 millones de años. Si se toma en cuenta que la luminosidad solar era probablemente menor cuando el radio era mayor, sería necesario duplicar esta última cifra.

Aún cuando la teoría de la contracción es en todo caso insuficiente para dar cuenta de la edad del Sol, se le atribuye, hoy día, una importante influencia en el problema cosmogénico de la evolución estelar. Una estrella joven, de formación reciente y que no ha alcanzado todavía una temperatura interna elevada, sin duda debe contraerse y generar así calor, en su primera fase evolutiva.

Así fueron desechadas las dos hipótesis termodinámicas que trataron de explicar, sin conseguirlo, el origen de la energía solar. Casi cien años demoraron todavía los físicos en encontrar la explicación adecuada. Y no podía ser de otra manera. Les faltaban herramientas para atacar el problema desde otro ángulo.

A mediados del siglo pasado estaba en su apogeo el concepto mecánico de la física. El mejor ejemplo de esta afirmación la constituye tal vez el espectacular descubrimiento de Neptuno por Leverrier, en 1846. Como lo dijo Sir James Jeans refiriéndose, en forma elocuente a esa época, “la ciencia parecía haber descubierto que vivíamos en un mundo mecánico, un mundo de partículas que se mueve como la fuerza de las demás partículas las obligan a moverse, un mundo en el cual el futuro está completamente determinado por el pasado. Era difícil imaginarse a los físicos del porvenir ocupados en otra cosa que no fuera poner los puntos sobre las *ies* de la explicación mecánica del universo y expresar la medida de las cantidades físicas con mayor número de cifras decimales. ¡Nadie habría podido imaginar cuán diferente habría de ser el curso de los acontecimientos!”

En 1869 el astrónomo inglés Lockyer descubrió espectroscópicamente en el Sol un elemento químico desconocido en la Tierra. Lo llamó helio. Es el más simple de los cuerpos usuales después del hidrógeno y ambos abundan sobremedida en la composición del Sol y de las estrellas. Desempeñan, precisamente, el papel principal en este problema de la energía del astro rey.

Pero la era de la física moderna comenzó algunos años más tarde. Maxwell tratando de explicar los experimentos de Faraday echó las bases matemáticas del electromagnetismo moderno. Primero Maxwell interpretó la radiación diciendo que consistía en perturbaciones que se propagaban a través de un éter sujeto a leyes mecánicas. Sin embargo, el hecho fundamental, que marca el paso de la era mecanicista a la de la radiación, ocurrió en 1887 cuando Hertz produjo ondas de tipo maxwelliano emanadas de fuentes de electricidad en el laboratorio y demostró su semejanza con la luz ordinaria. De esta misma época es el famoso experimento de Michelson-Morley para detectar “el viento de éter” que, junto con dar una respuesta negativa, echó por tierra la noción de espacio absoluto tal como lo concibiera Newton.

Después las dramáticas conquistas de la física de nuestro siglo se suceden vertiginosamente. En 1895 Roentgen descubre los rayos X. Tres años más tarde, Becquerel y los Curie descubren y estudian las sustancias radioactivas, las de estructura más compleja entre los cuerpos simples. Por primera vez el hombre se encuentra ante un fenómeno explosivo, subatómico, espontáneo e incontrolable que libera cantidades insospechadas de energía.

En 1900, Max Planck, en un documento que hizo época, dió a conocer al mundo científico su teoría de los quanta. Según ella, toda materia contiene vibradores, cada uno en su propia frecuencia y al emitir radiación en esa frecuencia, lo hace en forma discontinua en flagrante contradicción con las leyes del electromagnetismo y de la mecánica newtoniana.

Por aquel mismo tiempo J. J. Thompson determina la razón entre la carga y la masa de las partículas que más tarde se llamarían electrones. Constituye la primera tentativa, coronada con el éxito, de medir

una magnitud física relativa a uno de los componentes del edificio atómico.

La teoría de la relatividad restringida, establecida por Einstein en 1905, y la de la relatividad generalizada en 1915, adquieren ímpetu cuando sus predicciones sobre el peso de la luz encuentran confirmación brillante en el eclipse total de Sol de 1919.

En 1908 el matemático polaco Minkowski introduce el nuevo concepto de espacio-tiempo. En 1911 Rutherford establece que los átomos están constituidos por un núcleo central cargado positivamente, que concentra en un espacio reducidísimo la casi totalidad de la masa atómica y en torno del cual gravitan, describiendo órbitas planetarias, los electrones cargados negativamente y de masa insignificante. Con esto queda definitivamente consolidada la teoría que da a la materia una estructura eléctrica y corpuscular que se vislumbraba desde que se conocieron las propiedades de los rayos catódicos. Dos años más tarde el físico danés Niels Bohr, lograba explicar, aplicando la teoría de los quanta, características peculiares de los espectros del hidrógeno y del helio, pero su teoría fracasaba para los espectros de los átomos más complejos.

Naturalmente, no podemos seguir analizando todos los vastos progresos que las diferentes ramas de la física realizaron desde 1920 hasta nuestros días; pero la somera enumeración hecha anteriormente incluye todos los trabajos capitales que contribuyeron a resolver el enigma del origen de la energía solar.

La teoría de la relatividad restringida establece en su "principio de equivalencia de la masa y de la energía" que toda cantidad de energía está dotada de cierta inercia y, reciprocamente, toda masa material m es equivalente a una cierta cantidad de energía E dada por la fórmula

$$E = m.c^2$$

en la que c es la velocidad de la luz. De esta ecuación resulta que si la masa contenida en un gramo de una substancia cualquiera desaparece, por aniquilación de la materia en él contenida, la cantidad de energía generada es de 9×10^{20} ergs, o sea, 2×10^{13} calorías e, inversamente, podemos decir que 2×10^{13} calorías pesan un gramo.

El Sol lanza luz y calor al espacio por un total de 4×10^{33} ergs en cada segundo y si el origen de su energía es, como sabemos hoy día, de carácter subatómico vemos que ello equivale a que desaparezcan por aniquilación más de 4 millones de toneladas de material solar por segundo.

No siempre lo verdadero es verosímil. Hagamos una pausa para comprender bien el significado de esta cifra. El principio de la equivalencia de la masa y de la energía no debe ser considerado como una simple ficción matemática, sino como la expresión cuantitativa de una realidad física profunda. Ya en 1934, los físicos franceses Joliot y Thibaud, realizaron en el laboratorio experiencias en las que uniendo un positrón con un electrón desaparecería cierta cantidad de materia y se generaba un fotón.

Pero si el Sol derrocha 4 millones de toneladas de su masa por segundo y esto lo ha realizado en forma ininterrumpida durante los últimos dos mil millones de años, ¿cómo es posible que pueda irradiar todavía energía?

Un cálculo sencillo nos indica que si la masa solar es de 2×10^{33} gramos y en alimentar su flujo radiante el Sol consume 4 millones de toneladas por segundo, el tiempo durante el cual habrá consumido una de cada diez mil unidades de masa, será algo menos que dos mil millones de años. Más simplemente, si el Sol en los últimos dos mil millones de años ha irradiado energía uniformemente con el ritmo actual y la generación de esta energía ha sido a costa de su masa, de acuerdo con la ecuación de Einstein, la masa solar se habría reducido, en todo este período del orden de la edad de la Tierra, en la décima parte del uno por mil.

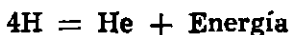
Por fin los físicos y los astrónomos tenían a su disposición un mecanismo que generaba energía en cantidades abundantes para satisfacer el ritmo fantástico del horno solar. Faltaba establecer solamente el proceso en virtud del cual esta transformación se opera.

Ya a comienzos del siglo pasado el médico inglés Prout, formuló la hipótesis audaz según la cual todos los elementos químicos naturales se formarían por la unión de dos o más átomos del más simple de ellos, el hidrógeno. En efecto, salvo pequeñas diferencias, todos los pesos atómicos de los distintos elementos son múltiples enteros del peso del átomo de hidrógeno. Las pocas excepciones aparentes a esta regla encontraron su explicación cuando, allá por 1910, se descubrió la existencia de los isótopos, es decir, elementos diferentes por su masa atómica pero de propiedades químicas y espectroscópicas idénticas. La mezcla de varios isótopos en los elementos simples origina, en ciertos casos, los pesos atómicos fraccionarios. Al núcleo del átomo de hidrógeno se le llamó protón cuando se le confirmó en su rol de elemento constitutivo primordial.

La determinación precisa de las masas atómicas, o más exactamente de las masas nucleares de los diferentes isótopos mediante el espectrógrafo de masa de Aston permitió descubrir pequeños residuos irreducibles entre estas masas y los múltiples enteros más próximos de la del protón. Estos "defectos de masa", como se les llamó, fueron explicados como masa que se convertía en energía y se liberaba cuando se formaban núcleos de átomos más pesados.

Fué partiendo de estos principios que el físico francés Jean Perrin, pudo indicar en 1919 que la síntesis del helio a partir del hidrógeno podría suministrar al Sol una fuente de energía, incomparablemente más eficaz que todas las hasta entonces indicadas y que podía continuar generando energía, con el flujo presente, durante 100 mil millones de años. Este lapso, no sólo es capaz de responder a todas las exigencias del pasado geológico de la Tierra, sino que aún provee de un amplio margen al futuro de nuestro planeta.

Consideraremos algunos valores numéricos de este proceso de conversión de hidrógeno en helio según la fórmula



En esta expresión se ha perdido masa porque el peso de los cuatro núcleos de hidrógeno, 4×1.00758 excede al peso del núcleo de helio resultante 4.00276 en 0.02866 unidades de masa atómica. En otras palabras, el 7 por mil de la masa del hidrógeno inicial no se encuentra en el núcleo de helio resultante y debe, en consecuencia, aparecer, según el principio de equivalencia, en forma de energía generada por esta fusión.

En el mismo año 1919, Rutherford demostró experimentalmente que tales transmutaciones atómicas, lejos de ser simples especulaciones de valor teórico, podían ser provocadas en el laboratorio bombardeando los núcleos atómicos con protones o núcleos de helio provistos de energía cinética suficiente para vencer la repulsión eléctrica y franquear la "barrera de potencial".

En 1932 Chadwick descubre el neutrón y Anderson el electrón positivo que se llamó positrón; en 1934 los Joliot-Curie provocan la radioactividad artificial y en 1939 Hahn y Strassman consiguen en el laboratorio la fisión del átomo de uranio que hizo posible la bomba atómica de 1945 y la de hidrógeno de 1952.

Así, durante los últimos 30 años los astrónomos estaban seguros de que las fuentes de energía del Sol y de las estrellas residían en la liberación de energía atómica. Las temperaturas de varios millones y aún decenas de millones de grados absolutos asignadas a las regiones centrales del Sol y de las estrellas, debían provocar extrema agitación térmica de los átomos o, más exactamente, de los núcleos los que pertrechados así de energía cinética suficiente para vencer la barrera de potencial, estaban en condiciones de desencadenar reacciones nucleares.

En 1939 la física nuclear había ya catalogado y estudiado un número suficientemente grande de estas reacciones para que los físicos Hans Bethe, en Norteamérica y von Weizsäcker en Alemania, pudieran, independientemente, anunciar la serie de procesos termonucleares que hoy se conocen con el nombre de ciclo del carbón y que transforman al hidrógeno en helio en los 15 millones de grados que reinan en el centro del Sol. Las reacciones son las siguientes:

- | | | |
|-----------------|-------------------------|---------------------------------------|
| 1) carbón 12 | + protón = nitrógeno 13 | + fotón (120.000 a 1.300.000 años) |
| 2) nitrógeno 13 | = carbón 13 | + positrón (10-13 min vida media) |
| 3) carbón 13 | + protón = nitrógeno 14 | + fotón (28.000 a 250.000 años) |
| 4) nitrógeno 14 | + protón = oxígeno 15 | + fotón (2.2 a 41×10^6 años) |
| 5) oxígeno 15 | = nitrógeno 15 | + positrón (126 seg vida media) |
| 6) nitrógeno 15 | + protón = carbón 12 | + partícula alfa (520 a 9.500 años) |

Cuando un núcleo de carbón 12 captura un protón, la única reacción nuclear posible es la formación de un núcleo de nitrógeno 13; éste es inestable, su núcleo emite un positrón y decae en el isótopo estable carbón 13. Este captura un segundo protón y forma un núcleo estable de nitrógeno 14 el cual, con la captura de un tercer protón se transmuta en oxígeno 15. Este es inestable, el núcleo emite un positrón y decae en

un núcleo estable de nitrógeno 15. El nitrógeno 15 absorbe un cuarto protón y se desintegra en carbón 12 y una partícula alfa que es el núcleo del átomo de helio.

Así, con los isótopos del carbón y del nitrógeno actuando a la manera de cuerpos catalíticos, cuatro protones han sido transformados en un núcleo de helio y los dos positrones emitidos durante el ciclo, aniquilan a dos electrones, generando fotones de radiación gama.

El ciclo completo tiene una duración que está limitada por la reacción más lenta que es la cuarta —captura de un protón por el núcleo del átomo de nitrógeno ordinario— y se estima en 2 a 3 millones de años. Las reacciones segunda y quinta son descomposiciones radioactivas con vidas medias de 10 y 12 minutos respectivamente.

La energía liberada en el curso del ciclo es de 0.0004 ergs por núcleo de helio formado; pero las cantidades de materia que entran en juego en las profundidades de la masa solar son tan enormes que cuando se calcula el gasto total de energía correspondiente al ciclo se obtienen 246 ergs por gramo y por segundo, si se admiten 20 millones de grados como temperatura central del Sol, o 13.2 ergs por gramo y por segundo si se aceptan 16 millones de grados absolutos.

Como se ve, la cantidad de energía que libera el ciclo del carbón es muy sensible a la temperatura de la región en que se produce; para ser más exactos, esa cantidad de energía varía proporcionalmente a la potencia 18 de la temperatura para 20×10^6 grados absolutos y a la potencia 20 para 16×10^6 grados absolutos. Así, las cantidades de energía que libera el ciclo del carbón concuerdan bien con las que arrojan las observaciones.

Otra circunstancia muy elocuente que aboga en favor del ciclo del carbón, como fuente de la energía solar, es la composición de los elementos químicos de este astro: 51% de hidrógeno, 42% de carbón y nitrógeno y 6% para el resto de los cuerpos.

Así, en el seno de la masa solar, allí donde la temperatura está en las proximidades de los 15 millones de grados absolutos y la densidad es del orden de los 120 gramos/cm³, es el ciclo del carbón el que genera la energía que arroja un promedio de 2 calorías por gramo y por segundo. Es allí donde, desde hace dos mil millones de años, sin interrupción, en cada segundo, 564 millones de toneladas de hidrógeno se transmutan en 560 millones de toneladas de helio y los 4 millones de toneladas de luz que así han nacido en el centro, salen en flujo incontenible por la superficie en raudales de luz y calor.

Estas 560 millones de toneladas de helio, que se forman en cada segundo en el Sol, pueden considerarse como la "ceniza" de la combustión nuclear de la cual el Sol obtiene su energía. En efecto, todas las experiencias establecen que el núcleo de helio o partícula alfa es uno de los más estables de la naturaleza y para poder entrar en reacción se necesitarían temperaturas del orden de varios miles de millones de grados, las que están totalmente excluidas del centro del Sol.

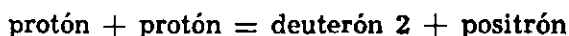
Por otra parte, astrofísicos como Chandrasekhar, han analizado el problema desde un punto de vista teórico y sus conclusiones han esta-

blecido que las reacciones del ciclo del carbón no sólo satisfacen todas las exigencias del problema de producción de energía en el Sol, sino que satisface también ampliamente la generación de energía en todas las estrellas cuyas temperaturas centrales son mayores que la solar.

Vamos a considerar ahora otros procesos nucleares que tienen sobre el ciclo del carbón la ventaja de no requerir temperaturas tan elevadas y que, en consecuencia, constituyen las fuentes de energía para aquellas estrellas cuyas temperaturas centrales son del orden de los 10 millones de grados absolutos o menos.

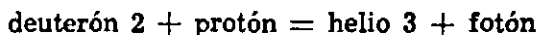
Desde luego, en las estrellas enanas rojas del tipo espectral M, la temperatura central de unos 8 a 10 millones de grados, parece insuficiente para dar a las reacciones del ciclo del carbón la intensidad necesaria. La mayoría de los núcleos atómicos tiene una energía cinética incapaz de vencer las barreras de potencial y la actividad del ciclo se encuentra apreciablemente reducida.

Para estas estrellas, Bethe y Critchfield, propusieron otro proceso basado en la reacción protón - protón

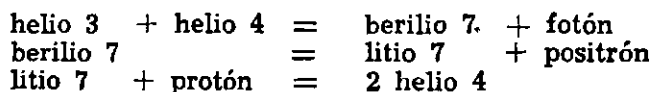


La probabilidad de que esta reacción ocurra está dada por la vida media del hidrógeno en las condiciones físicas de densidad y temperatura que hay en las entrañas de las estrellas. Esta vida media es de algunas decenas de miles de millones de años para densidades de unos 100 gr/cm³ y temperaturas de algunos millones de grados absolutos. Así, pues, se ve que el consumo de hidrógeno por este proceso no es muy rápido.

El deuterón 2 producido por la reacción protón - protón desaparece casi de inmediato por la reacción



cuya vida media en los interiores estelares es de dos o tres segundos. El núcleo del isótopo de helio 3 es estable para las reacciones con protones ya que el litio 4 no existe. El helio 3 tiene las dos alternativas siguientes



o bien



El primer proceso fué propuesto por Bethe; pero el segundo sugerido por Fowler y Lauritsen es más probable.

La cantidad de energía producida por la reacción protón - protón para una densidad de 120 gr/cm³ y la temperatura de 16 x 10⁵ grados absolutos es del orden de los 12 ergs por gramo y por segundo lo que,

como se ve, resulta en esas condiciones casi tan efectivo como el ciclo del carbón para los efectos de generar energía.

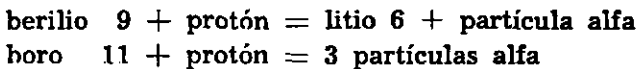
Los especialistas estiman hoy día que en el Sol el 85% de la energía la da el ciclo del carbón y el 15% restante la reacción protón - protón.

Otra reacción nuclear plausible en las inmediaciones de los 10^7 grados absolutos y que es la que ocurriría en las gigantes del tipo espectral A es

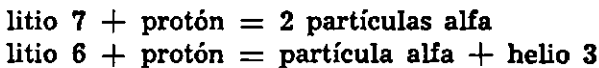


en la que entra en juego el isótopo usual del boro que captura un protón y forma un isótopo raro del carbón.

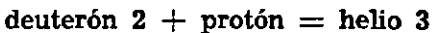
Para estrellas cuyas temperaturas centrales están comprendidas entre los 3 y los 9 millones de grados, como ocurre con las gigantes de los tipos espectrales G y F y, en especial, las cefeidas clásicas, deben producirse cualquiera de las reacciones siguientes:



A una temperatura central del orden de los 2 millones de grados, es decir, para las estrellas gigantes del tipo K el litio podría capturar protones dando origen a una de las dos reacciones



Todavía, para temperaturas del orden del medio millón de grados o sea para las estrellas gigantes rojas y para las variables de largo período del tipo M, entra en juego la reacción



la que como vimos anteriormente tiene dos alternativas para transmutarse finalmente en una o más partículas alfa.

Vemos así que existen reacciones nucleares generadoras de energía para las diferentes temperaturas que pueden dominar en las regiones centrales estelares. Naturalmente estos intervalos térmicos pueden superponerse y dar origen a dos o más reacciones de las anteriormente enumeradas. Sea como fuere, todas ellas tienen una sustantiva característica común: la reunión de cuatro núcleos de hidrógeno para formar un núcleo de helio o partícula alfa con liberación de energía. Los cuerpos intermedios pueden ser cualquiera de los ocho primeros elementos simples o sus isótopos; pero el resultado final es siempre el mismo: la fusión de cuatro protones para formar un núcleo de helio.

Antes de terminar, analicemos brevemente las ideas actuales acerca de las etapas principales de la evolución del Universo.

Los astrónomos de mediados del siglo XX, utilizando placas fotográficas con emulsiones de alta sensibilidad, expuestas durante largas horas —y, a veces, en noches sucesivas— en el plano focal del telescopio Hale de 5 metros de diámetro, han logrado registrar pequeños puntos, imágenes de nebulosas espirales cuya distancia es del orden de los mil millones de años-luz. Son los objetos luminosos más lejanos que, con los medios actuales, nos es dable observar. Su distancia representa el radio del Universo explorado por el hombre.

Este Universo habría partido, hace muchos miles de millones de años, de un núcleo primitivo de materia hiperdensa de unos 10^{12} gr/cm³, concentrada en una esfera de 10^{-4} años-luz de radio. En cierto momento y por razones que ignoramos, se habría producido una explosión cataclísmica de este proto-núcleo, comenzando el proceso de la formación de átomos hace unos 5 mil millones de años cuando el radio del Universo era del orden de 10^{-2} años-luz y su densidad unas 10^6 veces la del agua. Desde hace unos 3 ó 4 mil millones de años se habrían principiado a formar los astros, iniciándose ya una fase de expansión cuando el radio del Universo era de algunos 10^9 años-luz y su densidad media 10^{-27} gr/cm³. En los últimos 2 mil millones de años el Universo habría decuplicado su radio hasta alcanzar su valor presente de 10^{10} años-luz y una densidad media de 10^{-30} gr/cm³, es decir un átomo por metro cúbico.

Para explicar la formación de las estrellas y de las galaxias en el caos que dominaba en el Universo hace unos 3 a 4 mil millones de años es preciso saber si las estrellas se formaron antes o después de las galaxias, o bien si son contemporáneas. Hay quienes estiman que la formación de las estrellas es anterior al de su disposición en galaxias separadas; otros piensan que las galaxias se han separado primero y que las estrellas se han formado en seguida en su interior gaseoso por un mecanismo que recurre a la rotación diferencial de las galaxias. Esta rotación se habría instaurado en la época de su condensación inicial a consecuencia de choques directos excéntricos o de pasajes rasantes con las galaxias embrionarias vecinas, cuando estaban todavía muy próximas las unas de las otras.

Esta última hipótesis se confirma por el descubrimiento reciente de glóbulos galácticos que se consideran como estrellas en vías de formación. Parece, sin embargo, que ciertas categorías de estrellas son más antiguas que otras; aquellas habrían nacido en todo el Universo antes o durante la separación de las galaxias, éstas durante o después de su separación. Por lo demás, hoy día se distinguen dos tipos de poblaciones estelares, de acuerdo con la proposición de Baade de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar. La población II que tiene representantes en todas las galaxias, aparece sola en los cúmulos globulares y en las nebulosas elípticas en tanto que la población I aparece sólo mezclada con la otra y únicamente en los brazos de las nebulosas espirales allá donde se observan las supergigantes azules.

La vida de éstas es breve si se compara con la de las demás estrellas y su existencia actual hace suponer que se forman constantemente a expensas del medio interestelar. En cambio, la longevidad de las repre-

sentantes de la población II, sean enanas o gigantes, excede a la de las galaxias; no solamente serían más viejas sino que tendrían todavía una larga vida por delante.

En cuanto al proceso evolutivo de las estrellas mismas las ideas se han trastocado substancialmente en el último decenio, desde que la fuente de energía subatómica fué universalmente aceptada. Y el trastorno provino especialmente de la siguiente propiedad inesperada enunciada por Gamow: "cuanto más disminuye la reserva de hidrógeno de una estrella tanto más crece la cantidad de energía producida". Veamos cómo se explica esta aparente paradoja.

La energía generada en el centro de la estrella no se transmite íntegra a las capas superficiales que la irradian al exterior sino que una fracción de ella es retenida en las regiones centrales mismas del astro, donde la opacidad de la materia mantiene la regularidad del flujo de energía. Pero ocurre que, por razones físicas intrínsecas, el helio es más opaco a la radiación que el hidrógeno que lo ha generado; por consiguiente, a medida que el hidrógeno se consume, el material estelar se enriquece en contenido de helio y la mayor opacidad del medio retiene en proporción creciente la radiación, la temperatura central de la estrella crece y las reacciones nucleares se desarrollan a ritmo acelerado.

Así, el flujo de radiación estelar, lejos de disminuir en el curso del tiempo, crece sin cesar hasta que las reservas de hidrógeno están casi totalmente agotadas. Partiendo de los parámetros que determinan las actuales características físicas del Sol, Russell propuso el siguiente esquema para explicar su evolución probable, pasada y futura. Hace 8.4×10^{10} años, el Sol era una estrella muy joven de tipo espectral dK5 con un contenido de 81% de hidrógeno y la magnitud absoluto 7.1. En la época actual es una estrella vieja del tipo d02, tiene el 51% de hidrógeno y su magnitud es 4.7. Dentro de 1.4×10^{10} años su tipo espectral será B9 y su magnitud absoluta será 2.1; en la escala cósmica del tiempo podemos decir que estará próxima a expirar.

Tal sería, a grandes rasgos, el proceso evolutivo del sol o de una estrella cualquiera de la rama principal del diagrama de Herzprung-Russell. Comienzan siendo estrellas relativamente frías, pequeñas y compuestas casi exclusivamente de hidrógeno. El ciclo del carbón transmuta lentamente a éste en helio y la temperatura central sube. En este proceso emplean las 0.9 partes de su vida estelar, porque al comenzar el último 0.1 la provisión de hidrógeno se ha agotado y entonces la fuente de energía se trueca en la contracción gravitacional de Helmholtz que se esfuma rápidamente y la estrella se transforma en una enana blanca.

Existe otro tipo de estrellas, las supergigantes rojas, cuya luminosidad es miles de veces superior a la del Sol y que deben, en consecuencia, agotar rápidamente su provisión de hidrógeno. En circunstancias que la radiación media solar es de 2 ergs por gramo y por segundo, la de la estrella Y Cygni —17 veces más pesada que el Sol y 30 mil veces más luminosa— se eleva a 3.600 ergs por gramo y por segundo y la de una de las componentes de VV Cefeo alcanza a 17 mil ergs por gramo y por segundo. En estas condiciones estas estrellas deben agotar totalmente

su hidrógeno en no más de 10^7 a 10^8 años. Ciertamente la edad del Universo es mayor. Así, es necesario admitir que, a medida que las estrellas más viejas desaparecen, otras, recientemente formadas, aparecen constantemente.

Ocurre esto, en algunas centenas de millones de años, a costa del material interestelar de nubes suficientemente densas. Comienzan las estrellas en forma de glóbulos gigantes, extremadamente enrarecidos, liberando energía potencial de gravitación según el mecanismo de la contracción progresiva. La temperatura de la estrella sube emitiendo primero una radiación infra-roja que luego pasa al visible. Ejemplar típico de esta fase es la supergigante roja Epsilon Aurigae. Cuando la temperatura central alcanza a unos 400 mil grados absolutos, la agitación térmica de los átomos es suficiente para vencer las barreras de potencial y la reacción nuclear que requiere la energía más baja, como es aquella en que intervienen protones y los núcleos del deuterio, comienza a actuar liberando energía subatómica. Durante este período la estrella mantiene su equilibrio radiante con la energía nuclear que genera y el proceso de contracción cesa, aún cuando no es imposible que quede sometida a ciertas oscilaciones de largo período que es característico de las estrellas como la variable Mira Ceti.

Cuando el deuterio se ha agotado y la temperatura es insuficiente para desencadenar otras reacciones nucleares, el proceso de la contracción vuelve a hacerse presente hasta que la temperatura central alcanza a unos 2 ó 3 millones de grados. Representantes genuinos de este grupo son las cefeidas clásicas que obtienen energía a expensas del litio primero y del berilio después. Sigue un nuevo intermedio de contracción, con la consiguiente elevación de temperatura, y el boro entra en juego, como ocurre en Capella o Alfa Aurigae. Así la estrella supergigante pasa a través de una serie de etapas de temperatura ascendente y de tamaño decreciente, en el curso de las cuales los elementos ligeros se van consumiendo en este proceso alternativo de generación de energía por contracción y por reacciones nucleares, hasta que la estrella desemboca en la serie principal donde domina el ciclo del carbón. Allí están Sirio, el Sol y 61 Cygni.

En el ciclo del carbón la estrella dilapidada rápidamente sus reservas de hidrógeno, la que apenas ha sido tocada en las reacciones anteriores debido a que, en el Universo, la abundancia de los elementos ligeros considerados es del orden del millonésimo de la del carbón y del nitrógeno.

Así, después de una travesía rápida de las clases espectrales A, B y, eventualmente, O, que dura varias decenas de millones de años, la supergigante, excesivamente pródiga de sus recursos, habrá consumido todo su hidrógeno. Entonces la estrella tendrá que contraerse nuevamente para mantener su radiación. Pero ahora, diferencia substancial, la gravitación crece mientras la presión de radiación disminuye y en el interior de la estrella el peso creciente de las capas superiores pone en peligro la estabilidad de las estructuras atómicas.

Tarde o temprano, todas las estrellas caen en el ciclo del carbón, las supergigantes rojas a través de las fases que acabamos de estudiar y

las enanas tardías, ascendiendo lentamente la rama principal del diagrama de Hertzsprung-Russell.

Ocurre así que la estrella, que disponía de cantidades considerables de energía en las postreras fases de su período atómico, agotado el hidrógeno, recurre a la contracción. Pero las disponibilidades de energía que ésta le proporciona no le permiten mantener ese gasto y la estrella no sólo se encoge más y más sino que irradia cada vez menos, evolucionando rápidamente hacia un nuevo estado de equilibrio. Este es de carácter mecánico y queda determinado por el hecho de que la masa de la estrella casi no ha cambiado, en circunstancias que el volumen se ha reducido sin cesar. La presión en el centro de la estrella ha crecido constantemente hasta que los edificios atómicos sucumben bajo su acción. La materia en el centro de la estrella “degenera” bruscamente y la estrella se transforma en una enana blanca.

Otra hipótesis plausible es que las enanas blancas sean los restos de estrellas supergigantes que han evolucionado rápidamente produciéndose una superposición entre el período de su fase atómica y el proceso de contracción final, en el curso de la cual la estrella habría reducido su luminosidad en 10 a 15 magnitudes y no habría tenido tiempo de ponerse en equilibrio con el flujo de energía gravitacional liberado. Entonces, al aparecer los primeros indicios de materia degenerada, el exceso de energía podría ser expulsado con eyección simultánea de materia. Si el fenómeno se produce bruscamente, debe venir acompañado de un considerable aumento de brillo y la estrella se presenta como una “nova”. Si el restablecimiento del equilibrio se obtiene a través de un proceso periódico amortiguado, susceptible de repetirse a intervalos más o menos espaciados, se trata de una nova recurrente. Si, por el contrario, la eyección se efectúa lentamente, con regularidad continua, la estrella puede entonces expulsar una envoltura gaseosa extendida como lo hacen las estrellas Wolf-Rayet. La escasez de estos astros indica precisamente que se trataría de un estado transitorio, de corta duración, en la evolución estelar y que esta envoltura puede presentarse bajo la forma de una “nebulosa planetaria” cuyas estrellas centrales se sabe que pertenecen al tipo de estrellas de Wolf-Rayet.

Pero, en realidad, y como lo ha establecido a base de consideraciones teóricas Chandraseldhar, la materia de una estrella, que está prácticamente desprovista de hidrógeno, puede degenerar si, y sólo sí, su masa es inferior a 1.5 veces la masa solar, lo que ocurre en la mayoría de las estrellas. Si, por el contrario, la masa de la estrella es superior a 1.7 veces la del Sol, ésta se hace inestable en el curso de su contracción y puede ocurrir que se divida en fragmentos bajo el efecto de la fuerza centrífuga creciente desarrollada por una rotación progresivamente acelerada por la contracción; ésta es una de las causas que se admite da origen a las explosiones de novas. Pero puede ocurrir también que el exceso de materia se expulse regularmente de acuerdo con el mecanismo de las estrellas de Wolf-Rayet hasta que su masa sea inferior al límite citado.

Para las estrellas más livianas que 1.5 veces la masa solar la teoría sugiere que deberían contraerse indefinidamente sin poder estabilizarse en el estado degenerado porque la tensión del gas de Fermi no alcanzaría a equilibrar la presión ejercida por las capas exteriores del astro. En este caso, y como lo ha indicado el físico ruso Landau, la contracción continúa hasta la formación de un núcleo de materia hiperdenso. Transformada así la estrella en un núcleo atómico gigante de sólo unas pocas decenas o centenas de kilómetros de diámetro, terminaría su carrera estelar en una masa compacta cuya inverosímil densidad alcanzaría a los 10^{12} gr/cm³.

Si la masa de la estrella está comprendida entre los límites precedentemente indicados de 1.5 y 1.7 veces la masa solar una catástrofe prevista por Zwicky de Monte Palomar, como posible explicación de las supernovas, parece poder ocurrir en el curso de la contracción.

Digamos, de paso, que las supernovas son, como las novas, estrellas en las cuales ocurren transformaciones súbitas y violentas, cataclísmicas, que en pocos días, más aún, en pocas horas, liberan cantidades increíblemente gigantescas de energía que se desparrama en forma de raudales incontenibles de luz y calor. Así, una estrella, habitualmente inconspicua, aún en los grandes telescopios, se convierte en pocos días en una nova que, por algún tiempo, puede llegar a ser visible a simple vista para, después, retrotraer lentamente su luminosidad a su valor primitivo. Novas aparecen unas cuantas cada año en cada galaxia. Las novas llegan a ser de 10 a 100 mil veces más luminosas que las estrellas que las originan. En cambio, supernovas aparecen, en promedio, una cada 500 años en cada galaxia; llegan a ser otras tantas veces más luminosas que las novas y entonces pueden verse en pleno día.

La hipótesis de Zwicky supone que en el centro de las estrellas de masa 1.5 a 1.7 veces la solar debe aparecer un núcleo de materia degenerada; pero, bajo las presiones cada vez más grandes que imponen la contracción continua de estas masas, debe llegar un momento en que los protones nucleares, o aún núcleos enteros, excesivamente comprimidos contra electrones libres por las fuerzas de la pesantez —que exceden a la resistencia del gas de Fermi— podrían combinarse súbitamente con formación de neutrones. La materia de la estrella se convierte así en eléctricamente neutra y bruscamente se ve privada del apoyo que le ofrecen las enormes fuerzas de repulsión eléctrica que aseguran la estabilidad de los átomos y la individualidad de sus partículas; en estas condiciones se derrumbará brutalmente sobre sí misma, liberando en algunas horas inmensas reservas de energía gravitacional. Estas, transformadas en radiación, se escapan casi instantáneamente, arrastrando consigo lejos las capas superficiales del astro con las velocidades extraordinarias que se observan.

Las circunstancias excepcionales que deben conjugarse para que tan cósmica explosión ocurra, concuerda bien con la escasísima frecuencia con que las supernovas aparecen si se las compara con otros accidentes que se pueden presentar en la vida de las estrellas,

El cuadro que hemos bosquejado en las páginas anteriores, adolece necesariamente, de la incertidumbre que caracteriza a los resultados de la astrofísica. Concedámosle generosamente a esta rama moderna de la astronomía 150 años de existencia. Si de lo que se ha visto y medido, estudiado y discurrido en este siglo y medio, se quiere reconstituir la trayectoria pretérita remota y deducir la evolución futura del universo, estamos expuestos a cometer los errores gravísimos inherentes a toda extrapolación. Es demasiado exigua en el tiempo, la base de observación y de reflexión, para que nos permita proyectarnos cientos y miles de millones de años hacia el pasado y el porvenir. Pero la tentación es considerablemente grande, y a los hombres de ciencia les agrada sucumbir a ella, formulando hipótesis, sugiriendo teorías que expliquen, total o parcialmente, los fenómenos que nos presenta la naturaleza. Es una tarea fascinadora. Se yerra muchas veces; pero, de cuando en cuando se acierta. Y entonces la ciencia da un paso hacia adelante.

Dijo un filósofo que el genio no existe entre los hombres de ciencia. Sus premisas son las siguientes. Merece el calificativo de genio aquel, y sólo aquel, que es capaz de concebir y realizar algo que, de no haber existido, no habría sido jamás concebido ni realizado. Ni la Mona Lisa, ni el Quijote, ni la obra del inmortal sordo de Bonn, ni la Venus de Milo, habrían existido si no hubieran nacido sus creadores. Pero si Colón y Newton no hubieran existido, alguien habría, tarde o temprano, descubierto la América y enunciado la ley de la gravitación universal. Son éstas, verdades que están escritas en el libro abierto de la naturaleza; aquéllas, son creaciones de la imaginación.

Nos hemos detenido en estas reflexiones porque tememos que algunos de todos los que nos han honrado, en esta ocasión, con su presencia, puedan encontrar motivo de desaliento al meditar en los términos y en el contenido de esta disertación.

En realidad de verdad, la soberbia criatura humana es pequeña, infinitamente pequeña, frente a la cósmica grandiosidad imponente del Universo conocido. El hombre primitivo, de la edad de piedra, fué un egocéntrico desenfrenado. Más adelante, ligeramente ampliados sus horizontes, fué un topocéntrico. Los griegos superaron esta etapa, exaltaron la posición de nuestro planeta, que algunos de ellos creían singular y abrazaron el geocentrismo hasta que Copérnico y Galileo, con su teoría heliocéntrica, abrieron los ojos de la humanidad deslumbrada, señalando al Sol como astro sin par. . .

Hoy día, nosotros sabemos que el Sol es una de los centenares de miles de millones de estrellas que pululan en la Galaxia. Perfecto en la mediocridad no se destaca en ningún sentido. Ni siquiera, probablemente, en ser el único asociado a un cortejo de planetas, uno de los cuales está habitado. Aceptar esta singularidad, equivaldría a colocarse, una vez más, en una anticientífica posición de privilegio.

Con ayuda de un nutrido instrumental de técnica refinada, los astrofísicos saben arrancar a las estrellas sus más íntimos y bien guardados secretos y cuando contemplamos el esquema de Universo que han elaborado, acude a nuestro recuerdo este pensamiento de Anatole France: "se qui est admirable, ce n'est pas que le champ des étoiles soit si vaste, c'est que l'homme l'ait mesuré."