

Reseña

George Gamow, uno de los físicos más brillantes de cuantos en el siglo XX se han interesado por la cosmogonía, expone en La creación del universo la que se considera teoría clásica para explicar un universo en expansión a partir de un origen en el tiempo. Con las aportaciones de esta teoría se ha encontrado una explicación para los más sorprendentes descubrimientos de la astronomía, y físicos vanguardistas como Stephen Hawking han partido de ella para desarrollar sus propias hipótesis. En esta obra se exponen con detalle y claridad todos los argumentos que, basados en investigaciones de la astrofísica, sustentan la teoría del Big Bang.

Índice

[Prefacio](#)

[Prefacio a la edición revisada](#)

[Introducción](#)

- I. [Evolución contra permanencia](#)
- II. [La Gran expansión](#)
- III. [Formación de los átomos](#)
- IV. [La jerarquía de las condensaciones](#)
- V. [La vida privada de las estrellas](#)

[Conclusión](#)

[Apéndice](#)

[El autor](#)

Prefacio

A los camaradas cosmogonistas de todas las tierras y todas las épocas.

Los progresos en los métodos de observación y cálculo obligan a los científicos a revisar, periódicamente, ciertos principios teóricos que pueden verse afectados por hechos recién descubiertos o por nuevas precisiones respecto de hechos ya conocidos. Esto es especialmente frecuente en cosmogonía, ciencia que depende en gran medida de las observaciones astronómicas, de los cálculos de la astrofísica y de las aportaciones de ciencias como la física y la química.

En *La creación del universo* de George Gamow se exponen los extraordinarios avances que tras las dos guerras mundiales se produjeron en la observación astronómica y en la aplicación de la informática a los cálculos y la reproducción de modelos. Así, el astrónomo británico Edwin Hubble, estudiando lo que entonces se denominaban grandes nebulosas, descubrió que éstas se separaban rápidamente unas de otras y, al observar detenidamente la nebulosa de Andrómeda, descubrió en los brazos de esta nebulosa espiral la existencia de cefeidas, estrellas cuya luminosidad varía periódicamente. Los posteriores estudios sobre la variabilidad de estos períodos demostraron que esas estrellas, de luminosidad aparente muy débil, debían tener una gran luminosidad absoluta y que, por tanto, ellas y la nebulosa que las contiene debían

encontrarse mucho más lejos de nosotros de lo que se suponía hasta entonces.

Partiendo de esos hechos, que en su opinión refutan el modelo de un universo estático o en estado estacionario, Gamow desarrolla en *La creación del universo* la teoría de un universo en expansión.

§. La edad del universo

Gamow comienza demostrando que el universo tuvo un origen en el tiempo, es decir, que no es eterno. Basándose en las aportaciones de la física y la química avanzadas, acumula datos sobre la edad de los átomos, del Sol, de la Tierra, de la Luna, de las estrellas y de las galaxias. Y al investigar la edad de alguna parte o de alguna propiedad del universo la respuesta es siempre la misma: unos pocos miles de millones de años. Una vez establecido que el universo tuvo un comienzo, Gamow intenta reconstruir lo que ocurrió hace unos 5 000 millones de años, cuando una masa de protones, electrones y neutrones cuya densidad era cien billones de veces mayor que la densidad del agua alcanzó una temperatura tal que originó la mayor explosión imaginable, lanzando las partículas subatómicas en todas direcciones y a velocidades cercanas a la de la luz.

§. La formación de la materia

Según la teoría de Gamow, todas las especies atómicas se formaron durante los primeros momentos de la expansión, debido a que las condiciones de altas presiones y temperaturas favorecen las

reacciones nucleares. Es razonable suponer que en esas condiciones se formaran cantidades sensiblemente iguales de todos los átomos; pero esta suposición entra en contradicción con las observaciones de los astrofísicos y los geofísicos, quienes han encontrado que el 55 % de la materia cósmica es hidrógeno, el 44 % está constituida por helio y sólo el 1 % está formado por los restantes elementos. Gamow presenta las diversas hipótesis que matizan esta aparente contradicción.

§. Treinta millones de años después

Cuando la temperatura descendió de los varios miles de millones de grados iniciales a unos pocos miles, una parte del gas compuesto por los átomos recién formados empezó a condensarse en forma de polvo. Gamow explica cómo de esa mezcla más o menos uniforme de gas y polvo empezaron a surgir galaxias, estrellas y planetas. Capítulo aparte merece la descripción del transcurrir vital de las diferentes clases de estrellas, en la que Gamow combina sabiamente la información proveniente de la observación astronómica con los modelos astrofísicos creados para estrellas con diferentes masas iniciales.

§. Una obra fundamental

La creación del universo, además de constituir la defensa clásica de la teoría del universo en expansión, dejó las puertas abiertas para el desarrollo de la nueva cosmogonía, que ha desarrollado hipótesis

tan sugerentes como los agujeros negros, la materia invisible, las cuerdas y las supercuerdas.

Prefacio a la edición revisada

Cuando se escribió este libro (hace aproximadamente diez años) tenía lugar una acalorada polémica entre quienes defendían la teoría convencional del Universo en Expansión, ahora conocida como la hipótesis del Big Bang, y quienes defendían la hipótesis del Estado Estacionario de Gold, Bondi y Hoyle. De acuerdo con esta última teoría, el universo ha existido desde siempre en un estado más o menos inalterable y continuará existiendo para siempre en el mismo estado. Los argumentos en pro y en contra de ambas hipótesis se incluyen en este libro.

Ha habido nuevos desarrollos en la teoría del origen de los elementos químicos y ahora parece que mientras el «guiso» básico de los núcleos atómicos tuvo lugar antes de que se formaran las estrellas, un «guiso» adicional de elementos pesados tuvo lugar en fechas posteriores en el interior de las estrellas, debido a sus altas temperaturas. Estos desarrollos también han sido incorporados en este nuevo texto.

En vista de las objeciones suscitadas por algunos críticos en relación con la palabra «creación», debería explicarse que el autor entiende este término no en el sentido de «hacer algo a partir de la nada», sino más bien en el de «dar forma a algo que no la tenía», como, por ejemplo, en la expresión «la última creación de la moda parisina».

G. Gamow

Universidad de Colorado, agosto de 1960.

Introducción

Dadme la materia y os construiré un mundo aparte.

Kant. Historia universal de la Naturaleza y Teoría del Cielo.

Los problemas de la cosmogonía, o sea aquellos que se relacionan con las teorías sobre el origen del mundo, han inquietado ya a la mente humana desde principios de su historia. Entre los antiguos, este origen estuvo asociado de un modo necesario con un acto creador de algún dios que separó la luz de la oscuridad, levantó y fijó la bóveda celeste sobre la superficie de la Tierra y modeló todas las otras formas que caracterizaron el muy limitado cuadro del mundo que se le presentaba al hombre primitivo.

Conforme los siglos transcurrían y los hombres acumulaban gradualmente conocimientos sobre los distintos fenómenos que se producían en el mundo que formaba su medioambiente, las teorías cosmogónicas fueron adquiriendo una forma más científica, y así los nombres de Buffon, Kant y Laplace caracterizaron la era científica en la que se hicieron los primeros ensayos para comprender el origen del mundo como exclusivamente debido a causas naturales. Las ideas de aquellos tiempos, que más tarde sufrieron un proceso de evolución múltiple, se limitaban, en esencia, a investigar el origen de nuestro sistema solar y culminaron en una teoría razonablemente completa y consistente de la formación planetaria,

recientemente desarrollada por Carl von Weizsäcker y Gerard P. Kuiper.

El progreso que las observaciones astronómicas hicieron mientras tanto, abrieron horizontes enteramente nuevos para el conocimiento del universo, y el viejo misterio del nacimiento de los planetas quedó empequeñecido como un incidente de menor importancia dentro del cuadro mucho más amplio de la evolución universal. El principal problema de la cosmogonía de hoy consiste en explicar el origen y evolución de las gigantescas familias estelares, conocidas con el nombre de galaxias, que se esparcen a través de las enormes inmensidades del cosmos hasta más allá de donde pueda alcanzar la vista auxiliada con los más potentes telescopios. El astrónomo americano Edwin P. Hubble fue quien, hace aproximadamente un cuarto de siglo, descubrió que estas galaxias que pueblan los espacios universales están separándose rápidamente unas de otras (a esta rápida dispersión fue a lo que se llamó la *expansión universal*), hallando en este hecho el factor clave para comprender la evolución en gran escala de los fenómenos cósmicos. Esto llevaba implícito el que haya tenido que existir un tiempo en el cual toda la materia del universo debía ser como una masa continua de gas caliente comprimida uniformemente. Asimismo fue el imaginativo abate belga y célebre científico Georges Édouard Lemaître el que primero formuló una ambiciosa teoría, que se apoyaba en la estrecha correlación observada entre los fenómenos de expansión y ciertas consecuencias matemáticas de la teoría general de la relatividad de Einstein, para explicar las estructuras tan

complicadas del universo y que hoy sabemos que fueron el resultado de la diferenciación en varias etapas sucesivas de aquel material primario, originalmente homogéneo, que después se expansionó. Únicamente podremos alcanzar un sistema completo de cosmogonía que pueda satisfacer los objetivos principales de la ciencia, si este programa se lleva a cabo en todos sus puntos, reduciendo al más pequeño número posible la complejidad de los fenómenos naturales de la hipótesis. Y aunque el cumplimiento de tal programa parezca todavía hoy muy lejano, se han efectuado, no obstante, considerables progresos en algunas de sus partes y pudiera ser que la realización del conjunto se vislumbrase como próxima.

No debemos dejar de señalar aquí que aún existen diferencias más bien fundamentales entre los puntos de vista aceptados por los diversos científicos que trabajan en este campo. Muchos de estos hombres (entre los que se cuenta el autor del presente libro) opinan que el estado actual del universo fue el resultado de un proceso evolutivo continuo que partió de un material sumamente comprimido y homogéneo que existía hace billones de años: a esta hipótesis la podemos llamar *del comienzo*. En cambio, otros prefieren considerar que el cosmos existió siempre de igual forma a través de toda la eternidad: ésta es la hipótesis a la que llamaremos *del universo en estado estacionario*. Uno de los defensores de la última teoría en este campo de la evolución estelar es el notable astrónomo ruso Vorontzoff-Velyaminov, que parece ser la aceptó

forzado por la filosofía del materialismo dialéctico.¹ El astrónomo inglés Fred Hoyle sostiene opiniones análogas,² si bien en diferente forma y, desde luego, por unas razones por completo distintas: Hoyle pretende explicar el estado estático del universo, que él admite, introduciendo la hipótesis de una continua creación de materia en el espacio intergaláctico.

Quizá sea demasiado pronto para decidirse por ninguno de los dos puntos de vista indicados y, sobre todo, para probar cuál de ellos sea el correcto. El objeto principal de este libro es presentar los argumentos en favor de la hipótesis del *comienzo* y analizar de forma crítica las objeciones de los que se deciden por el universo *en estado estacionario*.

Esperamos que este volumen constituya una perspectiva útil al objeto que perseguimos para los científicos de los distintos campos y al mismo tiempo preste un servicio a los profanos interesados en los problemas de la cosmogonía moderna.

¹ A. Vorontzoff-Velyaminov, *Nebulosas gaseosas y estrellas nuevas* (en ruso), Academia de Ciencias de la U.R.S.S., Moscú, 1948. Revisado por O. Struve, *Astrophysical Journal*, 1949, págs. 110, 315.

² A. Vorontzoff-Velyaminov, *Nebulosas gaseosas y estrellas nuevas* (en ruso), Academia de Ciencias de la U.R.S.S., Moscú, 1948. Revisado por O. Struve, *Astrophysical Journal*, 1949, págs. 110, 315.

Capítulo I

Evolución contra permanencia

Contenido:

- §. La edad de los átomos*
- §. La edad de las rocas*
- §. La edad de los océanos*
- §. La edad de la Luna*
- §. La edad del Sol y otras estrellas*
- §. La edad de los cúmulos galácticos*
- §. La edad de la Vía láctea*

Antes de entrar en discusión sobre el problema básico del origen de nuestro universo, debemos preguntarnos si esta polémica es necesaria. ¿No podría ser verdad que el universo existió desde toda la eternidad, variando ligeramente, de un modo u otro, en sus detalles, pero permaneciendo siempre en esencia el mismo, tal y como lo conocemos hoy? La mejor manera de responder a esa pregunta es la de acumular datos sobre la edad probable de las distintas partes fundamentales y hechos que caracterizan el estado presente de nuestro universo.

§. La edad de los átomos

Por ejemplo, podemos preguntarle a un físico o a un químico: «¿Qué edad tienen los átomos que forman el material del que está construido el universo?» Esta interrogación nuestra no habría tenido mucho sentido hace sólo medio siglo, porque hasta el

descubrimiento de la radiactividad y su interpretación como el espontáneo desmoronamiento de átomos inestables, estos mismos átomos habían sido considerados como partículas básicas, indivisibles, que habían existido así a través de un período indefinido de tiempo. No obstante, se hizo bien patente, apenas estudiada la radiactividad natural de determinados elementos, que éstos habrían debido tener por fuerza algún origen en el tiempo, porque, de otra forma, sería lógico que hubieran desaparecido por completo, desintegrados en su continua evolución radiactiva. Así, la observación de las abundancias relativas de varios elementos radiactivos puede darnos algún indicio sobre el tiempo en el que fueron originados. Ante todo, observamos que el torio y el isótopo común del uranio (U^{238}) no son mucho menos abundantes que los otros elementos pesados, tales como, por ejemplo, el bismuto, el mercurio o el oro. Y como el período de vida media³ del torio y del uranio común es de 14 billones⁴ y 4,5 billones de años respectivamente, podemos asegurar que estos átomos se formaron no hace mucho más de unos cuantos billones de años. Por otro lado, como es del dominio común en el día de hoy, es muy raro el isótopo fisionable del uranio (U^{235}), constituyendo sólo el 0,7 por 100 del isótopo principal; de no ser así, el proyecto Manhattan habría sido tan sencillo como pescar en una palangana. La vida media del U^{235} es considerablemente más corta que la del U^{238} ,

³ El período de vida media de una sustancia radiactiva es el lapso requerido para reducir a la mitad la cantidad original de la misma. Así, después de dos, tres, etc., períodos de vida media, sólo queda un cuarto, un octavo, etc., de la cantidad original.

⁴ El término billón equivale a mil millones en los Estados Unidos, y con este valor está usado aquí.

puesto que la de aquél alcanza únicamente alrededor de 0,9 billones de años; de aquí podemos deducir que si la cantidad de uranio fisionable se reduce a la mitad cada 0,9 billones de años, debe corresponder a siete de tales períodos,⁵ o sea alrededor de unos seis billones de años, para que el isótopo se presente con su rareza actual, si es que éste y el otro estuvieron originariamente presentes en cantidades comparables.

Similarmente, en otros pocos elementos radiactivos, tales como el potasio radiactivo que se encuentra en la naturaleza, se hallan también siempre isótopos inestables en cantidades relativamente muy pequeñas. Esto sugiere el que estos isótopos se redujeron en realidad considerablemente por lenta desintegración efectuada durante un período de unos pocos billones de años. Sin duda que no existen razones *a priori* para afirmar que todos los isótopos de un elemento dado se produjeron al principio en cantidades exactamente iguales; pero la coincidencia de los resultados es significativa, por cuanto nos indica la fecha aproximada de la formación de estos núcleos. Además, los elementos no radiactivos con períodos de vida media más cortos que una parte sustancial de un billón de años, se encuentran de forma natural, aunque puedan ser producidos artificialmente en la pila atómica. Esto indica también que la formación de las especies de átomos debió de ocurrir no mucho antes de unos cuantos billones de años antes de la era actual. De todo ello deducimos que existen fuertes argumentos para presumir que los átomos radiactivos, y acompañándolos otros

⁵ Dado que $(1/2)^7 = 1/128 = 0,8$ por 100.

estables, se formaron en alguna circunstancia extraña que debió de existir en el universo *hace unos cuantos billones de años*.

§. La edad de las rocas

Si conforme antes preguntábamos al químico por la edad de los átomos, interrogáramos ahora a un geólogo sobre la edad de las rocas que forman la corteza de nuestro globo, este especialista nos diría que la edad de varias rocas —esto es, el tiempo transcurrido desde su primitivo estado de fusión hasta su estado de solidificación— puede ser estimada con gran precisión por el llamado «método del reloj radiactivo». Este método, originariamente desarrollado por lord Rutherford, está basado en la determinación del plomo contenido en varios minerales radiactivos, como la peblenda y la uraninita. El hecho importante es que la desintegración natural de los materiales radiactivos da por resultado la formación de los llamados isótopos radiogénicos del plomo. La desintegración del torio da lugar al isótopo del plomo Pb^{208} , mientras que los dos isótopos del uranio producen Pb^{207} y Pb^{206} . Estos isótopos radiogénicos del plomo se distinguen de su compañero el plomo natural, Pb^{204} , en que éste *no es* el producto de la desintegración de ningún elemento natural radiactivo.

Conforme el material rocoso se fundió hasta llegar al estado actual en que hoy lo encontramos en el interior de la tierra, se fueron produciendo varios procesos físicos y químicos que pudieron separar el plomo recientemente formado de la sustancia madre,

aunque, una vez que se solidificó este material y se formó la ganga mineral, el plomo radiogenético permaneció en el lugar de su origen. Y por esto a un período mayor de solidificación de las rocas debe corresponder una mayor cantidad de plomo depositado para una determinada cantidad de sustancia radiactiva. De aquí deducimos que si se miden las cantidades relativas de los isótopos radiogenéticos del plomo y las de aquellas sustancias radiactivas que son capaces de producir plomo (es decir, las relaciones Pb^{208}/Th^{232} , Pb^{207}/U^{235} y Pb^{206}/U^{238}), se puede calcular el tiempo que ha tardado un mineral radiactivo en formarse conociendo aquellas velocidades de desintegración, bien sea con una sola fórmula, bien con las tres que suelen coincidir. Al aplicar este método a los depósitos de rocas radiactivas que pertenecen a diferentes eras geológicas, se alcanzan resultados como los que se muestran en el cuadro siguiente:

La edad de varios minerales radiactivos

<i>Mineral</i>	<i>Localidad</i>	<i>Periodo geológico</i>	<i>Edad estimada (Millones de años)</i>
Pecblenda	Colorado	Terciario	58
Pecblenda	Bohemia (Europa)	Carbonífero	215
Pecblenda	Congo belga (África)	Precámbrico	580
Uraninita	Wilberforce (Canadá)	Precámbrico	1 035
Pecblenda	Gran Lago de los Osos (Canadá)	Precámbrico	1 330
Uranita	Carelia (U.R.S.S.)	Precámbrico	1 765
Uranita	Manitoba (Canadá)	Precámbrico	1 985
Monacita	Rhodesia (África)	Precámbrico	2 710

Los dos minerales últimos son los más viejos que se hallaron hasta la fecha, y por su edad podemos deducir que la corteza terrestre cuenta por lo menos con una antigüedad de 2,7 billones de años.

Un método mucho más perfeccionado fue propuesto recientemente por el geólogo británico Arthur Holmes, con el que, dice, puede ir más allá del tiempo de formación de los diferentes depósitos radiactivos y dar una cifra exacta para los materiales que forman la Tierra. Quizá el procedimiento más sencillo para darse idea de este método sea traer a colación la historieta del granjero olvidadizo del Oeste, que recordaba que cierto día de primavera había dejado el ganado al aire libre en las praderas, pero no se acordaba exactamente de la fecha en que lo hizo. Recordaba asimismo que durante el verano había estado reuniendo el ganado de los diferentes prados, alojándolo en corrales recientemente construidos (un corral para cada uno de los prados), pero la fecha de esto también la había olvidado. ¿Existiría para él alguna manera de reconstruir todo lo que había hecho?

Desde luego, existiría una manera de que el granjero recordara todo lo hecho, siempre y cuando que éste hubiera tenido la precaución de conservar en los corrales y las praderas el estiércol producido en ellos por el ganado. El lector habrá adivinado probablemente que el estiércol simboliza en este caso el plomo producido por la desintegración del uranio, y que el ganado de los corrales representa la formación de depósitos radiactivos en las rocas solidificadas. Se ve bien que en el caso del estiércol se podrían calcular las fechas

aproximadas en que fueron ocupados los diferentes corrales, midiendo la cantidad total de los detritos acumulados y dividiendo luego esta cantidad por el estiércol producido por el correspondiente rebaño; lo cual es exactamente lo mismo que el método del reloj de la radiactividad que ya vimos para determinar la edad de las rocas. Pero nos quedamos a oscuras en cuanto a la fecha primera o inicial en la que se dejó el ganado en los pastizales o, lo que es igual, en la que se formaron los átomos radiactivos.

Vista la cosa superficialmente, podría parecer posible en este caso un método análogo, reuniendo todo el estiércol producido por el ganado mientras pastaba al aire libre; pero podríamos engañarnos si hubiese algún estiércol anterior o primitivo, no correspondiente al ganado que se dejó fuera por primera vez y que representaría al plomo originado simultáneamente con el uranio en la época en la que todos los átomos se formaron. Claro que la misma objeción se podría hacer contra el empleo del método del estiércol en el cálculo de las edades de los prados por separado, pero como éstos son relativamente de un área pequeña, la cantidad de estiércol primario podría descontarse con facilidad comparándola con la que el ganado produciría en el curso de unos cuantos días. Por otro lado, en campo abierto, la situación es en absoluto diferente y la existencia de estiércol primario puede influir en el resultado de un modo notable.

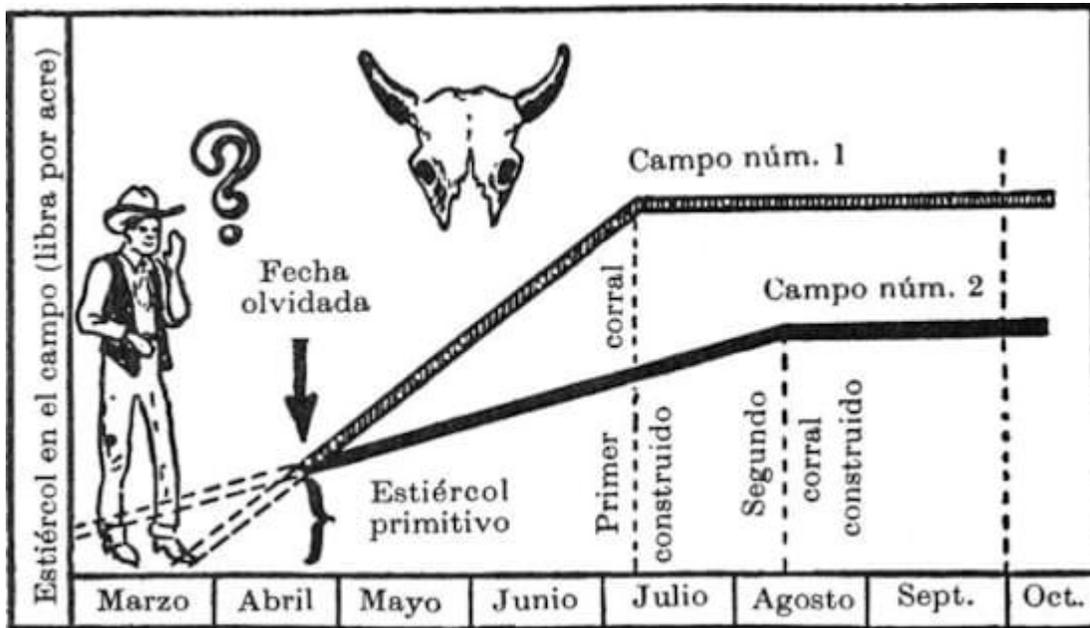


Figura 1. ¿Cómo se puede ayudar a recordar al granjero del Oeste, que se encuentra fuera de la granja, y que ha dejado también fuera a su ganado, pastando? (Método geológico de Arthur Holmes.)

Entrando ahora en detalles sobre el asunto, podemos comprobar — admitiendo que la cantidad de estiércol primario en las praderas fuera siempre la misma en todas (hipótesis de la uniformidad en la formación original del átomo)— que existe menos estiércol en aquellos pastizales desde los que el ganado se condujo a los corrales en las fechas más lejanas; lo cual coincide en la práctica con la experiencia de los geólogos al encontrar menos plomo radiogénico en las rocas de más alta edad geológica. En cada pradera podemos partir de la cantidad de estiércol que no cambió desde que el ganado se encerró en el corral, e ir retrocediendo en el tiempo, sustrayendo diariamente la producción del detrito. Procediendo así, llegaremos a un día (en la primavera) en que el estiércol en los campos haya

desaparecido del todo, es decir, en que se coloque en la cifra cero. En el caso de que no estuviera presente también el estiércol primario, aquel día representaría la primera fecha olvidada por el granjero. Pero si el estiércol primario estuviera presente (desde luego en cantidades desconocidas), este procedimiento aplicado a praderas determinadas podría narrarnos en la respuesta. Otra cosa muy diferente ocurre si comparamos las fechas suministradas por varias praderas: entonces las curvas que representan el historial de los depósitos de estiércol en los diferentes pastizales serán, en general, diferentes, puesto que dependen de la extensión de los campos, el número de las cabezas de ganado, la fecha de construcción de los corrales, etc. Pero si trasladamos todas estas curvas a un diagrama (como en la figura 1), se interfieren en el mismo punto, facilitándonos los dos datos olvidados: la fecha en la que el ganado se dejó fuera pastando y la cantidad de estiércol primario que ya había en aquel tiempo. Aplicando este método (ampliado con la introducción simbólica de rebaños de ovejas y su estiércol correspondiente, para la contabilidad de los dos isótopos del uranio U^{238} y U^{235} y los dos isótopos radiogénicos del plomo Pb^{206} y Pb^{207}) a las cantidades relativas de isótopos del plomo encontrado en las diferentes edades geológicas, el geólogo inglés Holmes halló que todas las curvas coinciden cerca de un punto correspondiente a la edad total de 3,35 billones de años,⁶ que debe de representar la edad correcta de nuestra Tierra. «¡Desde luego, mi querido Watson!»

⁶ Véase apéndice

§. La edad de los océanos

Y puesto que con la observación de los depósitos sólidos empleados en sus investigaciones por los geólogos hemos recibido tanta ayuda, permitidnos que nos dirijamos una vez más a ellos con esta pregunta: «¿Qué edad tienen los océanos que cubren gran parte de la Tierra?» Aquí la respuesta no puede ser tan exacta. Fue Edmund Halley, el mismo astrónomo que predijo la periodicidad del cometa que lleva su nombre, el primero que, basándose en el hecho de que la concentración en sales del agua de los océanos es debida principalmente a las sales aportadas por los ríos, propuso un método para determinar esta edad de los mares, hace ya más de dos siglos. En efecto, todo el mundo sabe que el agua de río contiene pequeñas cantidades de sales en solución que le dan un gusto diferente al agua de lluvia. Estas sales fueron arrastradas desde la superficie rocosa de la Tierra, la mayor parte de ellas por medio de arroyuelos y corrientes que se precipitan por las laderas montañosas hacia los valles. El agua de río almacenada en las hondonadas del océano se evapora; el vapor forma nubes que caen de nuevo transformadas en lluvia sobre los continentes en un ciclo constante. Y como las sales no se evaporan, continúan acumulándose en los océanos, que van gradualmente aumentando su salinidad. El método de Halley consiste en dividir la cantidad total conocida de sal disuelta en la actualidad en los océanos por la cantidad también conocida de sal aportada anualmente a los mares por los ríos: de esta manera encontramos que la concentración en

sal de los océanos se incrementa en la millonésima parte del 1 por 100 en cada siglo. De aquí se deduce que, si las condiciones de la actualidad no cambian en el futuro, todos los océanos estarán saturados de sales (siendo este límite de saturación el de 36 por 100) en unos 3,5 billones de años, y entonces serán todos los mares iguales al mar Muerto o Gran Lago Salado, deduciéndose asimismo que los ríos deben de haber estado corriendo alrededor de unos trescientos millones de años, a juzgar por la cantidad de sales recogidas en los océanos (3 por 100).

Este número parece, no obstante, demasiado pequeño, porque es sabido que la velocidad de depósito de las sales es, por lo menos ahora, muy alta. La razón de esto hay que buscarla en el hecho de que durante la mayor parte de la historia de nuestro globo la superficie de los continentes fuera muy lisa. Las viejas montañas habían quedado sumergidas por completo en el fondo de los océanos, y las nuevas todavía no se habían formado por la gradual contracción de la corteza terrestre, en la que los geólogos cuentan al menos diez de tales períodos sucesivos de levantamiento de las montañas. Y conforme a esto, se calcula, aunque muy por encima, que la acción erosiva de los ríos durante este período de aplanamiento terrestre, no debió de ser mayor del 1 por 100 de lo que es en la actualidad. Esto arrojaría una cifra para definir la edad de los océanos de unos cuantos billones de años, cifra que concuerda con la que se da para la edad de las más antiguas rocas.

§. La edad de la luna

Después de agradecer a la geología toda esta valiosa información, permitidnos que volvamos ahora la vista a la astronomía para preguntarle por la edad de varios cuerpos celestes, empezando con esta interrogación: «¿Qué edad tiene la Luna?» Desde un principio aprendimos que nuestra reina de la noche no siempre estuvo donde ahora, sino que en un lejano pasado se hallaba tan cerca de la Tierra, que casi hubiera podido uno tocarla alargando el brazo por encima de la cabeza, en el caso de que en aquella época, claro está, hubiesen podido existir algunos animales que tuvieran manos y cabeza. Como demostró el astrónomo inglés George Darwin (hijo del célebre biólogo Charles Darwin) en su trabajo, la Luna está alejándose constantemente de la Tierra. Su distancia a ésta aumenta en la proporción de 12 centímetros cada año. Ni que decir tiene que ni aun con los más precisos instrumentos sería posible medir tan pequeñísimo aumento en una distancia como la que hay de aquí a la Luna y que esta conclusión se logró por un camino indirecto, pero, no obstante, perfectamente seguro.

Para comprender bien todo, debemos recordar que las interacciones entre la Luna y la Tierra, donde son más evidentes es en el fenómeno de las mareas, debido a la atracción que ejerce la Luna sobre los océanos terrestres. A su vez, las mareas, moviéndose en tomo a nuestro globo, encuentran resistencia en las orillas de los continentes que hallan a su paso. Si pudiéramos observar el conjunto Tierra-Luna desde un punto fijo del espacio, se nos aparecería el volumen de la Tierra girando entre dos pleamares en forma parecida a como el eje de una rueda gira entre las dos

zapatas del freno. Podríamos esperar, pues, según esta imagen, que la velocidad de la rotación terrestre fuese disminuyendo gradualmente y que esto, a su vez, provocase un gradual crecimiento en la duración de nuestro día, lo cual, de acuerdo con una ley fundamental de la mecánica, que se conoce con el nombre de ley de conservación del momento angular, daría lugar a un período mayor de rotación de la Luna (mes) y a un gradual incremento de la distancia de ésta a la Tierra.



Lámina I. Nebulosa espiral de la Cabellera de Berenice, un lejano universo insular visto de perfil. Nótese el anillo de materia más oscura que circunda esta nebulosa.

Se ha calculado que la fricción de las mareas producirá un alargamiento del día de alrededor de una milésima de segundo por siglo, y la del mes en un octavo de segundo por siglo, aparte del aumento de la distancia entre la Tierra y la Luna que acabamos de ver. Por muy poca cosa que estas cifras puedan parecer, lo cierto es que estos cambios en las duraciones del día y del mes pueden comprobarse directamente por la observación astronómica. Debido a ellos, la posición del Sol entre las estrellas fijas se adelanta en 0,75 según dos de arco, y la posición de la Luna en 5,8 segundos de arco cada siglo. Las observaciones actuales dan los valores de $1,5 \pm 0,3$ y $4,3 \pm 0,7$, cifras que coinciden razonablemente con el efecto calculado. En consecuencia, poca duda puede cabernos sobre la seguridad del aumento medido entre la distancia de la Tierra y la Luna.⁷

Si dividimos la distancia actual a la Luna (365 000 km) por la velocidad de alejamiento que acabamos de calcular (12 cm por año),

⁷ Es interesante observar que en los alargamientos del día y del mes desempeña un papel importante la correlación entre lo que informan los escritores antiguos acerca de los eclipses y lo que revelan los cálculos realizados por nuestros modernos métodos de mecánica celeste. Los manuscritos babilónicos y egipcios, que llegan hasta el siglo xx a. de J.C., dan las fechas de los eclipses observados. Estos registros, en general, dan fechas que concuerdan perfectamente con las calculadas, pero no con los cálculos sobre la hora del día en que fue observado el eclipse. En realidad, en algunos casos los eclipses de que informan los manuscritos habrían ocurrido, de acuerdo con los cálculos, algunas horas antes de amanecer o después de la puesta del Sol en el Mediterráneo oriental, de modo que no fue posible su observación en Babilonia y Egipto. La explicación de la discrepancia reside en el hecho de que los cálculos teóricos fueron hechos con la hipótesis de que la duración del día es constante. Sin embargo, si el día se alarga a razón de 0,001 segundos por siglo, debe haber sido 0,04 segundos más corto hace cuarenta siglos. La duración media del día durante este período debe ser considerada 0,02 segundos menor que el valor actual. Ahora bien: cuarenta siglos contienen alrededor de un millón cuatrocientos mil días, de modo que la discrepancia total acumulada es:

$$1\ 400\ 000 \times 0,002 \text{ segundos} = 28\ 000 \text{ segundos} = 8 \text{ horas}$$

Esto basta para explicar el hecho de que babilonios y egipcios observaran estos eclipses cuando el Sol estaba sobre el horizonte.

encontraremos que la Luna debió de haber estado prácticamente en contacto con la Tierra hace unos cuatro billones de años. Y un resultado sorprendente de estos cálculos es que, por aquella época, la duración de un mes, o sea la del período de la órbita lunar, era igual a la longitud de un día, es decir, el período de la rotación terrestre, y lo más sorprendente todavía es que ambos ¡sólo equivalían a siete de nuestras horas actuales!

En aquellas primeras épocas, la Luna debía de pender inmóvil sobre el mismo punto de la superficie terráquea en que había nacido, arrancada de la superficie materna por la fuerza de las mareas del Sol. Podemos, con toda propiedad, llamar a este estado primitivo de nuestro satélite Luna hawaiana, puesto que pasó toda su juventud en su lugar de nacimiento, que fue el océano Pacífico. Parece, en efecto, que existe la evidencia de que la cuenca del Pacífico no es sino una gigantesca cicatriz en la piel granítica de la madre Tierra que recuerda constantemente el nacimiento de su primera y única hija.

§. La edad del sol y la de otras estrellas

¿Qué decir sobre la edad del Sol y la de otras estrellas? ¿Qué edad tienen? Podemos entrar en el cálculo sobre la edad de la Vía Láctea y la de la gigantesca familia estelar de la que nuestro Sol es un miembro humilde, investigando en los manantiales de energía que mantienen a estas mismas estrellas ardientes y luminosas. Es un hecho establecido que la energía generada en las estrellas es producida por la transformación gradual de su hidrógeno primitivo

en helio. (Este punto se trata con más extensión en el capítulo V.) Se sabe que la transformación nuclear del hidrógeno en helio libera 2×10^{-13} calorías por cada átomo de hidrógeno empleado. Y como nuestro Sol, por ejemplo, libera 10^{26} calorías por segundo, debe consumir, por tanto, 5×10^{38} átomos, o sea alrededor de 800 millones de toneladas de hidrógeno por segundo. Por otra parte, también sabemos que el hidrógeno constituye por lo menos el 50 por 100 de la masa total del Sol, que es de 2×10^{27} toneladas. De aquí que deba $(1 \times 10^{27}) / (8 \times 10^8) = 1,4 \times 10^{18}$ segundos = 5×10^{10} añosⁱ para consumir todo su contenido de hidrógeno. Parece, sin embargo, que el Sol puede usar sólo alrededor del 20 por ciento de su hidrógeno, la cantidad contenida en su núcleo central convectivo. Esto rebaja su período vital total a 10 billones de años. Pero debemos recordar que las estrellas tienen diferentes ciclos vitales según su tamaño y que pueden existir algunas que, teniendo la misma edad cronológica, estén, no obstante, en muy diferentes etapas en su evolución. En efecto, una estrella pequeña, una mediana y una grande nacidas en la misma fecha pueden haber alcanzado en el presente diferentes grados de desarrollo, comparables, por ejemplo, a los que alcanzan un ratón, un perro y un ser humano, todos de un año de edad.

La razón del diferente ciclo vital de las estrellas puede hallarse en el hecho de que el brillo estelar crece proporcionalmente al cubo de la masa de la estrella; de este modo, una estrella que posea una masa doble de la de nuestro Sol consume su combustible con una velocidad ocho veces mayor; y como este combustible es solamente

dos veces el del Sol (en proporción con la masa total), el ciclo vital de tal estrella será solamente de $1/4$ del ciclo del Sol. Esta diferencia en los lapsos vitales de las estrellas presta un método muy adecuado para calcular las edades de la población estelar de nuestra galaxia. Por primera providencia, la observación demuestra, de manera inequívoca, que existe una profunda diferencia entre aquellas estrellas que son menos pesadas que cuatro veces la masa solar y aquellas que aventajan esta cifra. Las estrellas del primer grupo constituyen el volumen principal de la población estelar y son miembros muy tranquilos de esta sociedad. Pero en cuanto cruzamos el límite de las que contienen una masa mayor que cuatro veces la del Sol, nos hallamos con que el número de estrellas de esta clase se reduce drásticamente, y las pocas que entran en esta categoría se conducen de una manera más bien extraña, girando muchas de ellas alocadamente alrededor de sus ejes, lanzando corrientes de material caliente de sus franjas ecuatoriales.⁸ Entre estos dos grupos principales están las estrellas que, al menos en apariencia, tienen un estado muy inestable y son capaces de toda clase de juegos celestiales. Algunas de ellas se hinchan hasta alcanzar un enorme tamaño y empiezan una especie de pulsación periódica con cambio en su brillo: son las llamadas *cefeidas variables*. Otras sufren fenómenos de explosiones alternas, que pueden ser desde destellos secundarios, como los de las explosiones periódicas de las estrellas U de los Gemelos, hasta las erupciones grandiosas de las supernovas, que se transforman temporalmente

⁸ Se ha hallado que a menudo también giran las estrellas del primer grupo, pero su rotación, como la de nuestro Sol, es muy lenta.

en una sola estrella, tan luminosa como toda la galaxia entera a la que pertenecen.

En el capítulo V se entra en un examen más detallado de estas pulsaciones y explosiones de estrellas, que parecen ser los síntomas de su decadencia, las convulsiones finales de las que ya casi han consumido sus primeras reservas de combustible. Utilizando, pues, las relaciones anteriormente mencionadas entre las masas estelares y el ciclo vital de las estrellas, encontramos que la edad media de las que ahora se aproximan a su muerte térmica oscila alrededor de los cinco billones de años. Llegamos, por tanto, a la conclusión de que la mayor parte de las estrellas que forman el sistema de la Vía Láctea nacieron hace unos cinco billones de años, y que las otras pocas de mayor tamaño observadas en el cielo, son de origen más reciente. Como se explica con más minuciosidad en el capítulo V, la rápida velocidad de rotación observada en las de mayor tamaño debe ser atribuida en parte a su relativa juventud. Conforme el tiempo pasa y nuestro universo estelar se hace más y más viejo, estrellas de masa cada vez más pequeñas se aproximarán gradualmente al fin de su vida natural y, hacia el año 5.000.000.000, nuestro propio Sol tendrá asegurada su muerte.

§. La edad de los cúmulos galácticos

Otro sistema de calcular la edad de la población estelar de nuestra galaxia se basa en el estudio de la conducta puramente mecánica de las estrellas que forman los denominados cúmulos galácticos; éstos son grupos íntimamente entrelazados de estrellas que se mueven

juntos a través de los enjambres de otras estrellas en la Vía Láctea. Uno de esos grupos, encontrado en la constelación del Toro, se muestra en la figura 2. Las flechas indican el desplazamiento de los miembros del grupo al cabo de quinientos siglos. Observamos que el movimiento muestra un efecto parecido al de un carril ferroviario, lo que indica que este grupo particular de estrellas se está moviendo bastante descentrado del Sol y alejándose de él. Podemos deducir de esto que tales grupos estelares, que aparentemente se formaron en el origen común de una gigantesca y única nube de polvo, no pueden mantenerse unidos durante un período infinito de tiempo: como consecuencia de la interacción de sus fuerzas de gravedad y las de otras estrellas, deben disiparse y dispersarse poco a poco al encontrarse unas masas de estrellas en el camino de otras. Cálculos llevados a cabo por B. T. Bock en Harvard demuestran que el término medio de la vida de tales cúmulos estelares debe andar entre uno y diez billones de años. Y puesto que existen aún varios cientos de estos cúmulos en nuestro sistema, la edad de la Vía Láctea no puede ser mayor de unos cuantos billones de años.

§. La edad de la vía láctea

Un método algo más general para determinar la edad de todas las estrellas que forman la Vía Láctea es el que se basa en el estudio de la distribución de la energía entre ellas. Como es sabido, todas estas estrellas tienen dos clases de movimientos: uno, el movimiento regular y vertiginoso de cada una de ellas alrededor de nuestra galaxia, y otro, irregular o desordenado, parecido al movimiento

producido por el calor en las moléculas de un gas. Debido a las interacciones gravitatorias entre los miembros de este enjambre gigante, se afectan y varían los movimientos de unas y de otras; pero puede esperarse que después de cierto período de tiempo se llegue a una distribución bien definida de velocidades.

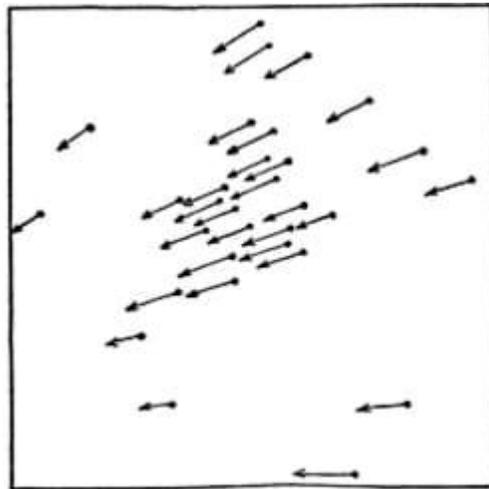


Figura 2. Movimiento de las estrellas en el cúmulo del Toro.

De acuerdo con las leyes de la mecánica estadística, esta distribución final de velocidades debe corresponder a la llamada equipartición de la energía cinética, siendo la velocidad de cada estrella inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su masa.

Estas leyes rigen particularmente la distribución de la velocidad (de las diferentes moléculas) en una mezcla de gases. Así vemos que en una mezcla de hidrógeno y oxígeno la velocidad media de las moléculas del oxígeno equivale a una cuarta parte de la de las moléculas del hidrógeno, mientras que la masa de éste es dieciséis veces mayor que la de aquél. No obstante, en tanto que en un gas

ordinario ese reparto de energía se establece en una fracción despreciable de segundo, el proceso similar en un *gas de estrellas* emplea un tiempo considerablemente más largo. F. Gondolatsch, astrónomo alemán, ha demostrado en un trabajo reciente que en el momento actual tal reparto de energía cinética entre las estrellas vecinas del Sol no se ha podido establecer aún de una manera definitiva, aunque sí llegar a la conclusión de que sólo falta alrededor del 2 por 100 del punto definitivo para este establecimiento, lo que significa que, de acuerdo con esta teoría, este sistema estelar cuenta con una existencia comprendida entre dos y cinco billones de años.

Observamos, pues, que cuantas veces tratamos de investigar la edad de alguna parte o propiedad del universo, siempre obtenemos la misma respuesta aproximada: unos cuantos de billones de años.

Es cierto que las respuestas se diferencian algo en cuanto al número exacto de billones, pero todas están de acuerdo en lo que respecta al orden general de magnitud. De ello parece deducirse que debemos rechazar la idea de un universo inmutable y admitir *que los hechos básicos que caracterizan al universo tal cual lo conocemos hoy son el resultado directo de algún proceso evolutivo que debe de haber comenzado hace unos pocos billones de años*. Asimismo, podemos admitir también que en un remoto pasado nuestro universo era considerablemente menos diferenciado y complejo que lo es ahora, y que el estado de la materia de entonces quedaría bien reflejado en el concepto ya clásico de *caos primitivo*. Y, en efecto, existen muchos signos evidentes, aunque empíricos, como se

mostrará en los próximos capítulos, que subrayan la dirección que acabamos de indicar. De esta manera el problema de la cosmogonía científica, después de adoptar esta hipótesis, se puede formular en el sentido de un intento de reconstruir el proceso evolutivo que permitió llegar de la sencillez de los primeros días de la Creación a la inmensa complejidad actual del universo que nos rodea. En estas investigaciones nos ayudará mucho la teoría de la expansión del universo, que se estudia en el capítulo II.

Capítulo II

La gran expansión

Contenido:

- §. *Ampliación de horizontes*
- §. *La teoría de la expansión universal*
- §. *¿Como empezó la expansión?*
- §. *La fecha de la gran compresión*
- §. *¿Se detendrá alguna vez la expansión?*
- §. *Nuestro universo, ¿es finito o infinito?*
- §. *Cálculos sobre las nebulosas, y confusión entre distancias y edades*
- §. *Etapas primitivas de la expansión*

§. **Ampliación de horizontes**

Son conocidos desde hace mucho tiempo por los astrónomos ciertos objetos celestes de apariencia muy particular a los que se ha dado en llamar *nebulosas espirales*. A diferencia de otras nebulosidades conocidas que semejan más o menos nubes en el cielo de formas por lo común irregulares, las nebulosas espirales adoptan siempre una estructura bien definida, ya que consisten en un cuerpo lenticular central al que se arrollan en forma de brazos un par de espirales (láminas I y II). Hasta hace aproximadamente un cuarto de siglo, se consideraba que las nebulosas espirales podían situarse, poco más o menos, entre las estrellas de nuestro sistema de la Vía Láctea y se pensaba que podía señalárselas como posibles ejemplos capaces de dar nacimiento a sus propios sistemas planetarios, de

acuerdo con el cuadro clásico formulado por Kant y Laplace. Sin embargo, en 1925, todas estas ideas fueron completamente desterradas por el gran descubrimiento hecho por Edwin P. Hubble, astrónomo del Observatorio de Monte Wilson, quien estudiando la gran nebulosa espiral de Andrómeda, que a simple vista es la mayor de todas y por esto resulta la más accesible a la observación, advirtió que sus brazos en espiral contienen cierto número de estrellas sumamente débiles cuyo brillo cambia periódicamente, siguiendo una sencilla ley sinusoidal. Tales estrellas, denominadas *cefeidas variables* (por la Cefeida Delta, que fue la primera estrella en que esta variabilidad fue observada), son bien conocidas en nuestro sistema de la Vía Láctea, y sus cambios periódicos de luminosidad se explican como resultado de las pulsaciones periódicas de sus cuerpos gigantes. Existe una relación sencilla entre el período de esas pulsaciones y la luminosidad absoluta de la estrella de que se trate: cuanto mayor es la brillantez de la estrella, mayor es el período de pulsaciones; de este modo estableció Harlow Shapley, astrónomo de Harvard, lo que se llamó la *relación período-luminosidad*, que constituyó una poderosa herramienta para la medida de las distancias de las estrellas pulsátiles que están demasiado lejanas para que se pueda precisar el paralaje de su desplazamiento. Por la medida directa del período de pulsaciones de una estrella dada, podemos llegar a una conclusión definida sobre cuál sea su brillo absoluto. Y esto, en combinación con el brillo visual, nos da la distancia actual de la estrella.

Por los períodos de pulsación que se observaron en las cefeidas y encontrados por Hubble en los brazos en espiral de la nebulosa Andrómeda, se vio que éstos debían de tener luminosidades absolutas muy grandes. Y como, además, a simple vista eran tan débiles que parecían estar en el límite de la visibilidad, se dedujo lógicamente que, lo mismo las estrellas que la propia nebulosa, debían de hallarse lejísimos: la distancia a la nebulosa de Andrómeda, medida por este procedimiento, fue de casi un millón de años-luz o, aproximadamente, ¡cien veces el diámetro de todo el sistema de la Vía Láctea en su totalidad! Y todavía otras nebulosas espirales, que son visualmente más pequeñas y más débiles que la de Andrómeda, deben de estar mucho más distantes aún. Esto quiere decir que, si las nebulosas espirales se hallan de verdad tan alejadas, deben ser también mucho mayores de lo que se imaginó en un principio, y quizá la realidad es que sean (cada una) tan grandes ¡como el mismo sistema de la Vía Láctea!

De esta manera fue como el descubrimiento de Hubble separó a las nebulosas espirales, que se consideraban hasta ese momento en la posición de humildes miembros comunes de nuestra galaxia, y las entronizó como galaxias independientes, por derecho propio, esparcidas en la inmensidad de los espacios universales. También se esclareció que estos objetos celestes no tenían nada que ver con las nebulosas ordinarias (como la de Orión, por ejemplo), que no son sino grandes nubes de polvo que flotan en el espacio interestelar. Las nebulosas espirales están constituidas por muchos billones de estrellas individuales que parecen, desde nuestros

observatorios, como una masa tenuemente luminosa y difuminada, debido a la gran distancia a que nos encontramos de ellas. Más recientemente, esta conclusión fue probada de un modo directo por otro astrónomo de Monte Wilson, Walter Baade, que consiguió determinar fotográficamente el cuerpo central de la nebulosa de Andrómeda y los de sus dos compañeras, entre las miríadas de puntos luminosos que representan las estrellas individuales de las que están formados estos distantes sistemas. Parece, por tanto, que ha llegado el momento de cambiar la vieja terminología y, en lugar de hablar de nebulosas espirales, hablar de galaxias espirales.⁹

Pero las consecuencias del descubrimiento de Hubble no habían de detenerse aquí y habían de ser el germen de progresos todavía más notables en nuestro conocimiento sobre la naturaleza del universo. Era cosa sabida desde hacía algún tiempo que las líneas espectrales de la luz emitidas por las nebulosas espirales se corrían hacia el extremo rojo del espectro. Según sabemos por el efecto Doppler,¹⁰ esto se puede interpretar ordinariamente como que los objetos se están alejando del observador. Y en tanto se creía que estos objetos eran miembros de nuestro sistema estelar, no había más remedio que deducir que estas nebulosas tenían algún movimiento singular entre las estrellas, siendo conducidas desde las regiones centrales de la Vía Láctea hacia su periferia. Y con este nuevo

⁹ Algunas galaxias no tienen brazos en espiral; se les llama elípticas o esféricas, según los casos.

¹⁰ Cuando la fuente luminosa se acerca al observador, las ondas luminosas se acortan debido al movimiento de la fuente y todos los colores se corren hacia el extremo azul del espectro. Cuando la fuente se aleja, las ondas luminosas se alargan y todos los colores se corren hacia el extremo rojo.

ensanchamiento de los horizontes, surgió un cuadro por completo nuevo:

el espacio del universo en su totalidad, poblado por billones de galaxias, se encuentra en un estado de rápida expansión, con todos sus miembros, separándose unos de otros a gran velocidad.

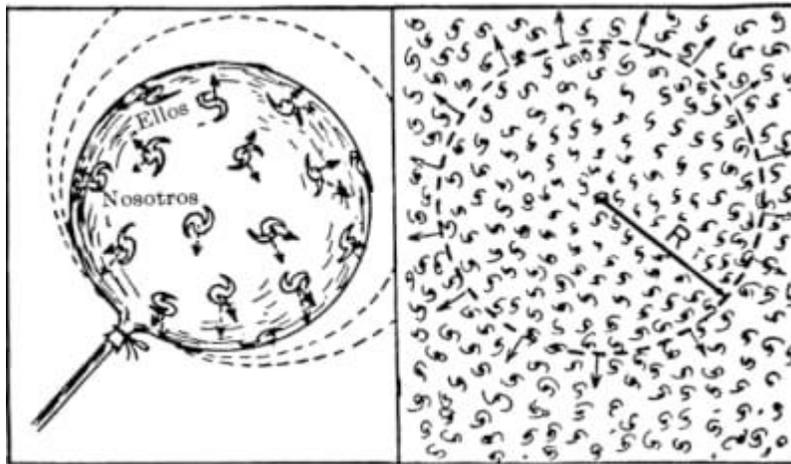


Figura 3. Idea de la expansión uniforme.

Un observador, colocado en cualquiera de las galaxias, vería a todas las demás como huyendo de él a velocidades proporcionales con su distancia, caso de que la expansión universal sea uniforme en todas direcciones. Esta demostración se puede hacer gráfica fácilmente pegando a un globo de goma cierto número de piezas de papel, que se pueden recortar, si se desea, en forma de galaxias, e hinchando este globo que va adquiriendo cada vez mayor tamaño (figura 3). Un observador, colocado *en uno cualquiera* de estos modelos de galaxias, tendrá el efecto de que todas las demás huyen de él, y sin duda se sentirá inclinado a creer, engañosamente, que es él el

centro de la expansión. Con frecuencia se encuentran en los campos de juego de los niños unos modelos de espacios tridimensionales en expansión denominados *selvas espesas*. Lo único que necesitamos imaginar es que esta selva espesa se extienda en todas direcciones y de tal modo que las distancias entre los niños, sentados en las diversas intersecciones de los tubos enchufables de que está constituida la selva, vayan creciendo gradualmente.

Y aparte de las velocidades regulares de alejamiento que se producen en la expansión del sistema total, las galaxias poseen asimismo un movimiento desordenado semejante al que vimos de las moléculas gaseosas sometidas al calor. Y como estas dos clases de movimientos (en las vecindades de las galaxias) son de magnitud parecida, muchas veces inciden unos con otros y se dan resultados confusos. La componente dirigida hacia nosotros de la velocidad del movimiento desordenado de una galaxia cercana, puede llegar a ser mayor que la correspondiente velocidad de alejamiento de esa galaxia, y en tal caso ésta se estará moviendo hacia nosotros y mostrará un corrimiento hacia el violeta en las líneas de su espectro. Éste es el caso que se observa en la actualidad en la gran nebulosa espiral de Andrómeda. No obstante, conforme las distancias van creciendo, las velocidades de alejamiento llegan a ser pronto demasiado grandes para ser contrarrestadas por el movimiento desordenado (térmico) de las galaxias individuales, y la expansión del sistema en su conjunto se hace muy evidente.

A esto hay que añadir también la rotación de las galaxias de varios grados sobre sus ejes. Muy pocas son las galaxias que no parecen

tener ninguna rotación y que poseen forma esférica. Otras galaxias dan vueltas con diversas velocidades y sus cuerpos elípticos muestran varios grados de alargamiento. La mayoría de las galaxias, no obstante, poseen un movimiento de rotación tan rápido que parte de su material se escapa de sus franjas ecuatoriales, adoptando la forma clásica de los brazos en espiral. Es interesante observar que la energía cinética media de la rotación galáctica es igual a la energía cinética media de su movimiento de traslación azaroso. Este hecho concuerda con la ley general de mecánica estadística, que rige también para los movimientos rotatorios y traslatorios de las moléculas de un gas ordinario.

§. La teoría de la expansión universal

El científico belga Georges Lemaître fue el primero que observó que la expansión del sistema galáctico señalada concuerda con las conclusiones cosmológicas de la teoría general de la relatividad. Es verdad que el modelo original de Einstein, denominado *universo esférico*, es mecánicamente estático y no se decide ni por la expansión ni por la contracción. Sin embargo, el matemático ruso A. Friedmann indicó que la naturaleza estática del universo de Einstein se debía a un error algebraico (esencialmente a una división por cero) cometido durante el proceso de su deducción. Y fue el mismo Friedmann quien demostró después que el tratamiento correcto de las ecuaciones básicas de Einstein permite una clase de universos en expansión y otros en contracción. Y singularmente se comprobó también que el *universo esférico*, ideado primero por

Einstein, era dinámicamente inestable y a propósito para iniciar una contracción o una expansión a la más ligera provocación. No entra en el cuadro general de la finalidad de este libro profundizar en el manejo detallado matemático de las ecuaciones tensoriales fundamentales de la teoría de Einstein ni en sus aplicaciones a los problemas de la cosmología; pero, por fortuna, muchas propiedades de los modelos cosmológicos relativistas se pueden describir y comprender teniendo como base tan sólo la teoría clásica newtoniana, usando muy pocas matemáticas.

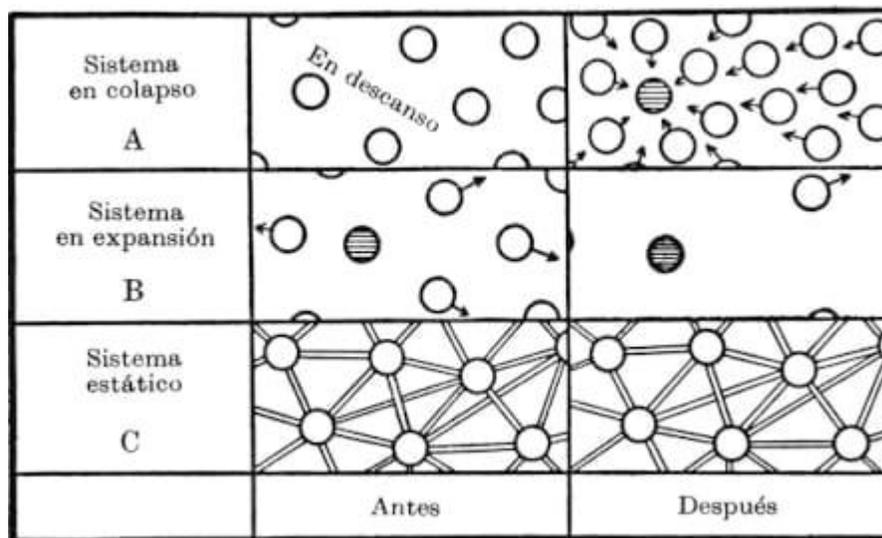


Figura 4. Tres estados posibles de un sistema de cuerpos gravitatorios.

Imaginemos el espacio sin límite del universo con una multitud de galaxias esparcidas en toda su extensión, más o menos uniformemente. ¿Sería posible que estas galaxias permaneciesen así indefinidamente en reposo, a la misma distancia las unas de las otras? Evidentemente, no, puesto que sabemos que la fuerza de la

gravidad newtoniana, actuando sobre las galaxias individuales, tenderá a unir las de tal modo que el sistema entero se colapsará (figura 4, A). Si, por el contrario, admitimos que estas mismas galaxias no estaban originalmente en estado de reposo, sino huyendo unas de otras a grandes velocidades iniciales, entonces las distancias entre las galaxias vecinas continuarán aumentando y la totalidad del sistema sufrirá una expansión (figura 4, B). Ocurre aquí una situación parecida a la que tendría un cronista deportivo mirando una fotografía que muestra un balón de fútbol suspendido en el aire sobre las cabezas de los jugadores. Aunque la fotografía no tiene movimiento, el cronista está seguro de que el balón estará subiendo o bajando en el aire, a menos, desde luego, que estuviera descansando en lo alto de un poste o suspendido de una cuerda. De igual modo, la hipótesis de un sistema estático de galaxias que se atraen mutuamente bajo la fuerza de la gravedad, precisa la añadidura de fuerzas adicionales que impidan que las galaxias se precipiten y se unan unas con otras. Debemos imaginar un sistema de puntales (figura 4, C) que contrarresten la fuerza gravitatoria y conserven a las galaxias separadas unas de otras. El instrumento matemático de la teoría general de la relatividad (que no es sino una generalización ampliada de la vieja teoría gravitatoria de Newton) permite llegar exactamente a igual conclusión. Antes del descubrimiento de Hubble, y al objeto de obtener un modelo de universo estático, Einstein se vio forzado a introducir en sus ecuaciones generales un término adicional que se denominó *constante cosmológica* y que era físicamente equivalente a la

admisión de la hipótesis de una *repulsión universal* entre los cuerpos materiales. En contraste con otras fuerzas físicas que siempre disminuyen con la distancia, se admitió que ésta era muy débil para distancias pequeñas, pero importante para las intergalácticas.¹¹ La introducción por Einstein de esta fuerza no fue, en realidad, caprichosa, ya que, como se demostró más tarde, este término representa una generalización matemática lógica de las ecuaciones originales de la teoría general de la relatividad, y llegó a ser superflua cuando quedó reconocido el hecho de que nuestro universo no es estático, sino que se haya en rápida expansión. Sin embargo, como veremos más adelante, esta constante cosmológica puede aún servirnos de ayuda en esta ciencia, aunque las razones primitivas para su introducción se hayan desvanecido.

El descubrimiento de que nuestro universo está en expansión ha suministrado una llave maestra para abrir el cofre con los tesoros de los enigmas cosmológicos. Si el universo está ahora expandiéndose, debe de haber existido un tiempo en el que se hallara a alta presión, y si la materia está ahora esparcida a lo largo del inmenso vacío del espacio universal y en las pequeñas porciones individuales que son las estrellas, debe de haber existido un tiempo en el que todo esto estuviera comprimido en una masa uniforme de muy grande densidad. A la vez, cabe suponer que esta masa debe de haber estado sometida a temperaturas extremadamente altas,

¹¹ La expresión matemática de esta fuerza repulsiva que actúa sobre una partícula de masa m , puede indicarse con

$$F = -1/3 c^2 \Lambda mr,$$

donde c es la velocidad de la luz, Λ la nueva constante cosmológica y r la distancia de la partícula.

puesto que todos los cuerpos materiales se calientan cuando se comprimen, y se enfrían cuando se dejan en libertad. No nos es posible conocer por el momento con seguridad la densidad máxima probable de este estado primordial de la materia comprimida. La hipótesis que parece estar más cerca de la verdad es la de que, a todo lo largo y lo ancho, la densidad de aquel universo era comparable a la de los fluidos nucleares, que destilan pequeñas gotitas con las que se forman los núcleos de diversos átomos. Esto haría que la densidad de antes de la expansión del universo fuese cien mil billones de veces mayor que la densidad del agua, lo que significaría que cada centímetro cúbico de espacio contendría en aquel tiempo ¡cien millones de toneladas de materia! En tal grado de compresión tremenda, toda la materia que está ahora al alcance de la vista con un telescopio de cinco metros de diámetro, debió de ocupar una esfera que tendría solamente treinta veces el diámetro del Sol. Pero como el universo es infinito y siempre lo fue, el espacio que quedase fuera de esta esfera también estaría ocupado por materia, la materia que ahora queda más allá del alcance del telescopio de cinco metros de diámetro.

El hecho de que la materia ocupe un espacio infinito y pueda ser comprimida o distendida y ocupar todavía este mismo espacio infinito, constituye una de las llamadas *paradojas del infinito*. Esto se comprende mejor citando un ejemplo que puso el célebre matemático alemán David Hilbert en una de sus conferencias.

«Imaginaos —dijo Hilbert— un hotel con un número finito de habitaciones que están todas ocupadas. Cuando llega un nuevo

cliente, el director debe rechazarle con disculpas. Pero permitidnos imaginar ahora un hotel con un número infinito de estancias. Aun cuando todas estas habitaciones estuvieran ocupadas, el director acompañaría gustoso a cualquier nuevo huésped para acomodarlo, porque todo lo que tiene que hacer, si acaso, es trasladar al ocupante del primer cuarto al segundo, al del segundo al tercero, al del tercero al cuarto, y así sucesivamente. De este modo resulta que el nuevo huésped puede ocupar siempre la primera habitación. Figuraos ahora un hotel con un número infinito de habitaciones, todas ocupadas —continuó Hilbert—, y un número infinito de nuevos recién llegados. El director sentirá una gran satisfacción por servirlos, y a tal fin trasladará al ocupante del primer cuarto al segundo, al del segundo al cuarto, al del tercero al sexto, y así sucesivamente. De esta manera, cada segundo cuarto (todos los números impares) estará ahora libre, para acomodar un número infinito de nuevos huéspedes.»

Exactamente igual que un hotel con infinito número de habitaciones puede alojar a un número infinito de individuos sin que quede nunca lleno, un espacio infinito puede contener cualquier cantidad de materia, y aunque ésta se halle tan apretada como sardinas en lata o tan extendida como una capita de mantequilla en un bocadillo de tiempos de guerra, siempre existirá sitio bastante.

§. ¿Cómo empezó la expansión?

Podemos ahora hacernos dos preguntas importantes: ¿Por qué estaba nuestro universo en tal estado de altísima compresión y por

qué comenzó a dilatarse? La manera más sencilla, y matemáticamente más consistente de responder a estas

preguntas, sería decir que la gran compresión que hubo en la historia primitiva de nuestro universo fue el resultado de un colapso ocurrido en una era todavía anterior, y que la presente expansión no es más que un rebote de «elasticidad» de aquella gran compresión que empezó tan pronto como alcanzó ésta el máximo de densidad que le era permitido.

Como indicamos en la sección correspondiente, ignoramos cuál fuera exactamente la densidad alcanzada para ofrecer este máximo de compresión; pero, conforme a todos los indicios, esta densidad debió de ser realmente muy alta.



*Lámina II. Nebulosa espiral de los Perros de Caza, vista desde arriba.
Obsérvese el satélite que hay al extremo de su brazo inferior.*

Lo que ofrece mayor verosimilitud es que las masas del universo se apretasen entre sí de tal manera, que no quedó ningún rasgo estructural de lo que todo ello había sido durante la era anterior al colapso, resultando estos rasgos borrados por completo, y hasta los átomos y sus núcleos fueron rotos y descompuestos en sus partículas elementales (protones, neutrones y electrones) con los que estaban contruidos. Así, nada se puede decir sobre el universo de la era anterior a la compresión, que con propiedad podríamos denominar *era de San Agustín*, puesto que fue San Agustín de Hipona el que primero suscitó la cuestión de «lo que hacía Dios antes de que Él hiciera los cielos y la tierra». Tan pronto como la

densidad de las masas del universo alcanzó su valor máximo, se invirtió la dirección del movimiento y empezó la expansión; así es que las densidades muy elevadas habrían existido solamente durante muy corto plazo. A lo largo de las primeras o últimas etapas de esta expansión, debieron de desarrollarse varios procesos de diferenciación en las masas cósmicas, procesos de los que se derivaron nuestras actuales complicadas estructuras universales.

§. La fecha de la gran compresión

Hemos visto que, conforme indicaban las observaciones de Hubble, las galaxias esparcidas a través de la inmensidad de los espacios universales parecen huir de nosotros, ya que cuanto más lejanas están, más parecen correr. La relación entre la velocidad de alejamiento y la distancia está dada por la ley de Hubble (véase apéndice):

$$[\text{velocidad de alejamiento}] = \text{constante} \times [\text{distancia}].$$

Si las distancias son expresadas en años-luz, y las velocidades en kilómetros por segundo, el valor numérico de la constante de la ecuación de Hubble es de $1,8 \times 10^{-4}$. Así, por ejemplo, una galaxia colocada a un millón de años-luz se aleja con una velocidad de 180 kilómetros por segundo. Si, como es costumbre en física, medimos las distancias en centímetros y las velocidades en centímetros por segundo, el valor numérico de la constante en la ley de Hubble es de $1,9 \times 10^{-17}$. Para deducir la fecha en la que todas las galaxias

estuvieron en el pasado apelotonadas, sólo precisamos dividir sus distancias actuales entre sí por las velocidades de su alejamiento y, como estas velocidades son directamente proporcionales a las distancias, el resultado de la división siempre es igual, tanto si tomamos dos galaxias vecinas como si son dos muy alejadas. Se trata, sencillamente, del valor inverso de la constante de la ley de Hubble. De este modo se obtiene el siguiente valor para la fecha que tratamos de investigar:

$$1/(1,9 \times 10^{-17}) = 5,3 \times 10^{16} \text{ segundos} = 1,7 \times 10^9 \text{ años.}$$

Comparando este número con los otros varios en los que se estima la edad del universo, hallamos que resulta más corto que el promedio de las citadas fechas y, desde luego, es tan sólo algo así como la mitad del valor obtenido por Holmes mediante el estudio de la abundancia relativa de los isótopos radiogénéticos del plomo. ¿Cómo podría el universo, que tendría menos de dos billones de años de edad, contener rocas de unos tres billones de años?

Esta discrepancia importunó a los defensores de la teoría de un universo en expansión durante varias décadas, desde el trabajo original de Hubble hasta principios de los años cincuenta. Una posibilidad sugerida por Lemaître fue introducir la constante cosmológica originalmente empleada por Einstein en su modelo de universo estático. Esta constante corresponde físicamente a una fuerza repulsiva que actúa entre las galaxias a grandes distancias y que se incrementa en proporción directa a la distancia. La presencia

de tal fuerza haría que nuestro universo se expandiera a velocidad siempre creciente y cambiaría la posición del punto cero en el tiempo. Si se hace más rápido el proceso de expansión, las velocidades de las galaxias vecinas habrían sido más pequeñas antes que ahora y, por tanto, la fecha del comienzo habría que hacerla retroceder en el tiempo. Sólo si admitimos un valor tan ridículo como el que significa 10^{-33} s^{-1} para la constante cosmológica Λ , lograríamos hacer coincidir el cálculo original de Hubble con el que se deriva de la geología.

Otra modificación mucho más radical de la teoría de la expansión fue la propuesta por tres astrónomos matemáticos ingleses, M. Bondi, T. Gold y F. Hoyle, quienes basaron su teoría en el principio de la isotropía cuatridimensional del universo, según la cual el comportamiento del universo en el tiempo ha de ser igual que su comportamiento en el espacio. Dado que, según las observaciones astronómicas, por mucho que nos alejemos en el espacio, sea cual sea la dirección que tomemos, el universo se nos muestra igual, este mismo principio exige que el universo aparezca igual por mucho que adelantemos o retrocedamos en el tiempo. A fin de reconciliar esta conclusión con el hecho de la dispersión de las galaxias —evidencia establecida mediante la observación—, Bondi, Gold y Hoyle tuvieron que postular que el continuo enrarecimiento de la materia en el espacio del universo, causado por su continua expansión, se halla compensado por una continua creación de materia nueva que tiene lugar uniformemente a lo largo y a lo ancho del espacio intergaláctico. Este postulado no contradice, como en ocasiones se

ha afirmado, la ley de la conservación de la materia, puesto que la cantidad de materia existente dentro de un volumen dado permanece siempre constante. Sencillamente, estamos ante una de las paradojas del infinito, que corresponde a la categoría del ejemplo del hotel propuesto por David Hilbert. Para compensar de un modo total la expansión basta con que sólo se produzca un átomo nuevo de hidrógeno por litro de espacio una vez cada billón de años. Así es que el genio creador no tendría que matarse mucho en el trabajo. De acuerdo con estos puntos de vista, las galaxias más viejas están retrocediendo gradualmente cada vez más y más, pero a su vez están formándose siempre galaxias nuevas por condensación de materia recién creada en los anchos espacios que median entre ellas. De este modo el espectáculo continúa sin comienzo y sin fin. Si pudiéramos llevar a la pantalla las ideas de Bondi, Gold y Hoyle en una película que las representase, haciendo rodar ésta hacia atrás, parecería al principio que todas las galaxias que surgían en la pantalla iban a apelotonarse tan pronto como se alcanzara la fecha de hace 1,7 billones de años. Pero si la película continuase rodando hacia atrás, advertiríamos que las galaxias más próximas, las que se acercaban a nuestra Vía Láctea desde todas las direcciones, amenazando con irrumpir en ella y hacerla añicos, se esfumarían poco a poco en el espacio neblinoso antes de que constituyeran un peligro real. Y antes de que el segundo grupo de nuestros más próximos vecinos tuviera tiempo de precipitarse sobre nosotros, nuestra propia galaxia también habría perecido ya. Y aunque estas opiniones explican el origen y evolución de las galaxias individuales,

consideran que el universo mismo es eterno, si bien con un cambio constante de población galáctica.

Así como la imagen convencional de un universo en expansión puede compararse con un grupo de personas nacidas todas el mismo año y que por tanto envejecen a la vez, la imagen de la teoría de Bondi, Gold y Hoyle corresponde a la de una comunidad en la que al mismo tiempo que mueren ancianos nacen niños, de manera que la composición del grupo permanece invariable. En el segundo de estos casos están presentes todas las edades y no hay contradicción entre el valor de Hubble de $1,7 \times 10^9$ y la edad estimada para nuestra propia galaxia.

Sin embargo, a principios de la década de 1950 se vio que para eliminar la discrepancia entre el valor de la constante de Hubble y los restantes cálculos de la edad del universo no se requiere ninguna de las dos posibilidades anteriormente descritas. Revisando trabajos anteriores sobre distancias intergalácticas, W. Baade, astrónomo de Monte Wilson, ha descubierto un error en el método empleado para calcularlas. Dichas distancias se calculan observando las estrellas pulsantes, o cefeidas, situadas en galaxias que se encuentran a una distancia lo suficientemente próxima a nosotros para permitir que el brillo de las estrellas sea visible individualmente. La observación de las cefeidas situadas en el interior de nuestra galaxia ha permitido determinar que el período de sus pulsaciones depende de manera claramente definida de su brillo absoluto. Es decir, si observamos una Cefeida en una galaxia cualquiera y medimos el período de sus cambios de luz, podemos

determinar cuál es su brillo absoluto. Y comparando ese brillo absoluto con el brillo visual observado podemos averiguar a qué distancia se halla no sólo esa estrella sino toda la galaxia. En sus estudios sobre las estrellas de la Vía Láctea, Baade halló que existen dos tipos considerablemente distintos de población estelar: uno que pertenece a los brazos espirales (tipo I) y otro que pertenece al cuerpo central de la galaxia (tipo II).¹² Y resultó que las cefeidas pertenecientes a estos dos tipos de poblaciones son también diferentes y emiten luminosidades distintas para un mismo período de pulsación. El error de la medición de la distancia se debía a que los astrónomos, ignorando la existencia de dos tipos distintos de cefeidas, aplicaban la relación período—brillo de las cefeidas de un tipo a las cefeidas del otro. Para decirlo con claridad, Baade descubrió que los cálculos de las distancias de diversas galaxias eran inferiores en un factor de aproximadamente 2,5. Así, en un abrir y cerrar de ojos, Baade aumentó el alcance del telescopio de cinco metros de diámetro de Monte Palomar, elevando el valor anteriormente calculado, que era de un billón de años-luz, nada menos que a 2,5 billones de años—luz. Y lo que es más importante, el tiempo necesario para que las galaxias retrocediesen a sus distancias actuales aumentó de 1,7 billones de años a aproximadamente 4,3 billones de años. Con ello, la discrepancia existente entre la edad del universo obtenida por medio de la recesión galáctica y la obtenida mediante todos los demás métodos ha dejado de existir.

¹² Véase capítulo IV.

Este progreso aniquiló la teoría de la expansión acelerada del universo, ya que, si tal fuera el caso, la edad del universo calculada mediante la recesión galáctica sería muy superior a los valores obtenidos por otros métodos. También tomó superflua la hipótesis de la creación continua de materia de Bondi, Gold y Hoyle, aunque en modo alguno la invalidó como teoría que posiblemente sea correcta. No sólo eso, sino que, dado que según dicha hipótesis es posible que el universo contenga galaxias de todas las edades, siempre podemos hallar una galaxia de la edad adecuada para llamarla nuestra Vía Láctea. La prueba de la teoría de Bondi, Gold y Hoyle depende ahora de la comparación de las edades de las galaxias que pueblan el espacio que nos rodea. Según esa teoría las galaxias tienen que mostrar una amplia variedad de edades, mientras que según la teoría convencional todas habrían de tener la misma antigüedad. Además, según la teoría de Bondi, Gold y Hoyle, el promedio de la edad de las galaxias ha de ser igual a un tercio de la inversa de la constante de Hubble, esto es, $1,4 \times 10^9$ años, lo cual es muy inferior a la edad de nuestra Vía Láctea. Si tal afirmación es cierta, la situación de nuestra Vía Láctea con relación a las galaxias vecinas ha de ser equivalente a la de un hombre maduro sentado en medio de un grupo de colegiales. Es lógico esperar que las galaxias muestren el envejecimiento de forma análoga al hombre; en las galaxias más viejas las estrellas más brillantes han debido de agotar su potencial de energía nuclear y se han extinguido, de tal modo que cuanto más vieja es la galaxia más débil es el brillo de las estrellas que contiene. Si fuera cierto que la Vía Láctea es mucho

más vieja que las galaxias próximas, las estrellas de nuestras galaxias vecinas brillarían con mucha más intensidad que las de la Vía Láctea. Las observaciones astronómicas demuestran que no es sí, lo cual indica que es posible que la teoría de Bondi, Gold y Hoyle no corresponda a la realidad.

§. ¿Se detendrá alguna vez la expansión?

La cuestión de si la expansión actual de nuestro universo continuará por siempre jamás, o si alguna vez se detendrá en el futuro, sufriendo algún colapso, se parece a la pregunta de si un cohete disparado desde la superficie de la Tierra continuará por siempre su viaje a través del espacio o caerá sobre nuestras cabezas. En el caso del cohete todo dependerá de la velocidad que adquiera: si es mayor de 11,2 km por segundo (que es la llamada *velocidad de escape*), el cohete desafiará la gravedad y no caerá nunca; pero con cualquier velocidad menor, el cohete llegará inevitablemente a detenerse a una cierta altura y después retrocederá. En el primer caso decimos que la energía cinética del cohete era mayor que el potencial del campo de gravitación terrestre; en el segundo caso, la situación es la inversa.

Parecido a este ejemplo del cohete es el caso de las galaxias que se alejan entre sí con ciertas velocidades y en contra de las fuerzas de gravedad de cada una, que tratan de unir las. La cuestión es, sencillamente, saber cuál de estas dos fuerzas es más poderosa. Simples cálculos, que se presentan en el apéndice, indican que en la presente época la atracción gravitatoria entre las galaxias es

despreciable comparada con sus velocidades de lo que pudiéramos llamar *inercia de alejamiento*. Es un caso semejante al de un cohete que se alejara de la Tierra a velocidad mucho mayor que la velocidad de escape. Las distancias entre las galaxias próximas se inclinan a aumentar hasta más allá de cualquier límite, *y no hay posibilidad de que la expansión actual se detenga nunca ni caiga en ningún colapso*.

§. Nuestro universo, ¿es finito o infinito?

Parece que con esto llegamos al momento adecuado para suscitar la cuestión del tamaño total de nuestro universo. ¿Es finito y tiene un volumen de tantos metros cúbicos, o tantos años-luz cúbicos, como Einstein sugirió, o se extiende sin límites en todas direcciones, como se lo representó nuestra buena y vieja geometría euclidiana? Dentro de la distancia de 2,5 billones de años-luz, que es lo que puede abarcar el telescopio de cinco metros de diámetro del Observatorio de Monte Palomar, las galaxias (alrededor de un billón de ellas) parecen estar esparcidas a través de todo el espacio de una manera más o menos uniforme. Pero supongamos que los astrónomos llegasen a construir telescopios de diez, de veinte, hasta de cuarenta metros de diámetro, ¿qué encontrarían? La teoría general de la relatividad y gravitación de Einstein permite sólo dos soluciones matemáticas posibles.

La primera solución es que el espacio del universo puede *curvarse hacia dentro*, como la superficie de la Tierra (curvatura positiva), y finalmente cerrarse sobre sí mismo en un *punto antípoda* (figura 5,

parte superior izquierda). Éste es el *universo cerrado* de Einstein (que puede ser estático o estar en expansión), y en el cual, salvo por el oscurecimiento del espacio, nos sería agradable observar el corte del pelo sobre nuestra propia nuca si pudiéramos esperar varios billones de años para que la luz diera la vuelta al universo. La segunda solución es que el espacio del universo puede *curvarse hacia fuera*, como la superficie de una silla de montar (figura 5, parte inferior izquierda).

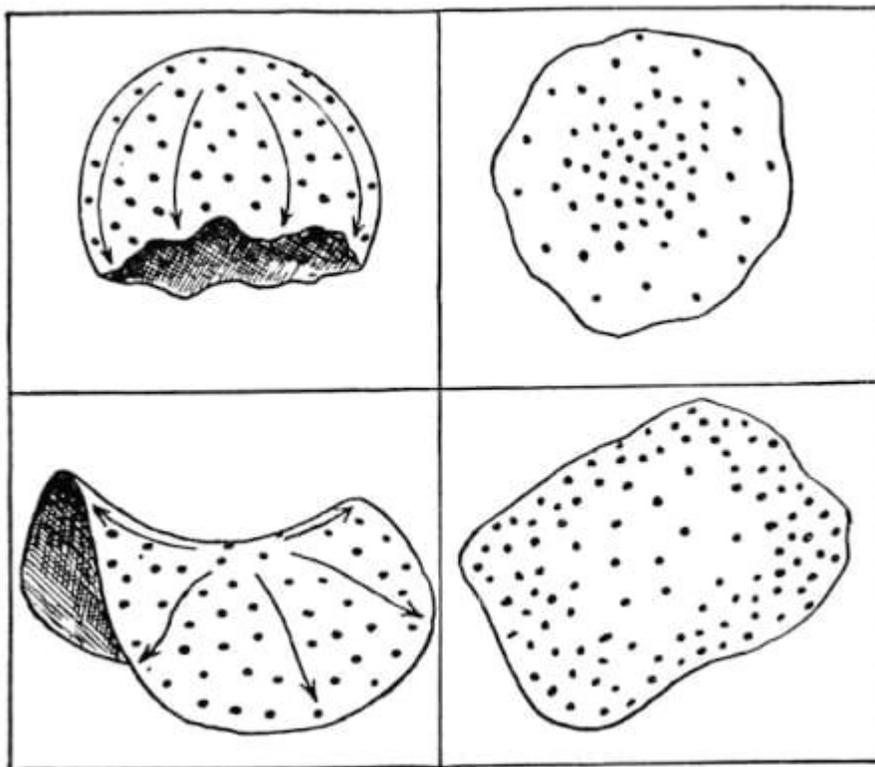


Figura 5. Superficies de curvaturas positivas y negativas (cóncavas y convexas), y lo que sucede cuando se trata de extender cada una sobre una mesa.

Cuál de estas dos posibilidades puede ser adscrita a nuestro universo es cosa que sólo pueden decidir las pruebas que se deriven de la observación. Y las pruebas existentes parecen apoyar decididamente la segunda posibilidad, es decir, el universo infinito e ilimitado.

Desde un punto de vista puramente matemático, el que la geometría del universo sea de tipo *abierto* o *cerrado* determinará directamente su conducta en el curso del tiempo. Se puede demostrar que un universo einsteniano cerrado sólo podría ensancharse hasta un cierto límite, pasado el cual la expansión se tornaría en contracción. Pero un universo abierto no tiene trabas para expansionarse siempre y sin ningún límite. Puede decirse que si el universo es cerrado y periódico en el espacio (como la superficie de una esfera), es también periódico en el tiempo y está sometido a expansiones y contracciones alternas (universo pulsante). Por otra parte, si el universo es abierto y aperiódico en el espacio (como la superficie de un paraboloides), no se repetirá a sí mismo ni siquiera en el tiempo. De donde se deduce que los mismos argumentos que nos llevaron en el párrafo anterior a aceptar la *expansión sin límites* del universo también nos permiten aceptar su *extensión sin límites*.

Ciertamente que estas conclusiones, que se basan por completo en las pruebas obtenidas de la observación dentro de una esfera que tiene un radio de 2,5 billones de años-luz, no serían necesariamente extrapoladas de un universo que esté más allá de lo que puede abarcar el telescopio de Monte Palomar y que estuviera, por tanto, fuera de nuestro conocimiento empírico. No podemos excluir la

posibilidad de que, a una distancia mucho mayor, las propiedades del espacio cambien tan radicalmente, que nuestro conocimiento actual no se pueda aplicar en estos casos. Se puede imaginar, por ejemplo, que aunque dentro de las distancias corrientes a las que se observa el espacio, este nuestro no muestra la más ligera tendencia a cerrarse, a más grandes distancias puede repentinamente «cambiar de intención» y empezar a cerrarse. La discusión de tal posibilidad cae, naturalmente, fuera del esquema de la ciencia empírica. En relación con estos interesantes puntos de vista, el astrónomo sueco C. V. L. Charlier expresó hace muchos años una opinión interesante, a la que podemos denominar *hipótesis de la complejidad ilimitada*. Charlier sugiere que, de la misma manera que la multitud de estrellas que rodean a nuestro Sol pertenecen a la nube única que conocemos como nuestra galaxia, las propias galaxias forman una nube mucho mayor, de la que solamente una pequeña parte cae dentro del poder de nuestros telescopios. Esto quiere decir que si nosotros fuéramos más y más lejos en el espacio, encontraríamos finalmente un espacio más allá de las galaxias. Sin embargo, esta supergigante galaxia de galaxias no es única en el universo, y mucho, mucho más allá en el espacio se encuentran otros sistemas semejantes. A su vez, estos enjambres de galaxias de galaxias se unen todavía en unidades mayores *ad infinitum*. Pero, aunque todo esto nos intrigue mucho, el cuadro de una siempre creciente agregación de materia está, desgraciadamente, fuera de la posibilidad del estudio directo por la observación.

§. Cálculos sobre las nebulosas, y confusión entre distancias y edades.

Existe otro método, basado en la pura geometría y realmente independiente de la teoría de la expansión en el tiempo, para dilucidar si el espacio del universo se curva hacia *dentro* o hacia *fuera*. Esto está relacionado con la cuestión del espacio que nos es útil dentro de una distancia dada y que se puede comprender mejor haciendo referencia a un ejemplo bidimensional. Supongamos que cortamos un pedazo circular del cuero de un balón de fútbol y tratamos de extenderlo sobre la superficie de una mesa (figura 5, parte superior derecha); es evidente que esto no lo podemos hacer sin estirar de los bordes del cuero; y como la superficie original se curva hacia dentro, no hay bastante material en sus porciones periféricas. Si ahora repitiéramos el mismo experimento con una pieza cortada del cuero de una silla de montar (figura 5, parte inferior derecha), la situación sería enteramente diferente: lo que ahora ocurre es que hay demasiado cuero en los bordes y debemos remeterlo para poderlo poner en un plano. Si en un principio las dos superficies estuvieran cubiertas de puntos de una manera uniforme, encontraríamos que, después de ponerlas en un plano, habrá una escasez de puntos cerca de los bordes de la superficie esférica y una acumulación de ellos cerca del borde de la superficie de la silla de montar. Hablando matemáticamente, el área de un círculo dibujado sobre una superficie esférica crece más lentamente que el cuadrado del radio; en la superficie de la silla de montar lo hace más rápidamente.

Una situación parecida existe en el caso de un espacio curvo tridimensional, si bien hallándonos dentro de este espacio no podemos visualizar la cosa tan fácilmente como en las superficies bidimensionales, a las que nos es agradable contemplar desde fuera. En lugar de los puntos en la badana tenemos ahora galaxias en el espacio (y se supone que en distribución uniforme). Si el espacio es limitado y curvo hacia dentro, el número de galaxias debe crecer más lentamente que el cubo de estas distancias. Si el espacio es infinito y curvo hacia fuera, el número de galaxias crecerá más rápidamente que el cubo de esta distancia.

Tales *cálculos galácticos* fueron realizados por Hubble, quien, en contradicción con nuestras conclusiones del párrafo anterior, encontró que el espacio universal es, en efecto, curvo hacia dentro, pero realmente muy cerrado. No obstante, esta conclusión de Hubble depende enteramente de la corrección con que se hayan hecho los cálculos sobre las distancias galácticas. Si, de acuerdo con los resultados de W. Baade mencionados anteriormente, estas distancias son en realidad dos veces y media mayores que lo que se creyó en un principio, los cálculos sobre las galaxias conducen al resultado opuesto, y nos encontramos con un universo que es abierto e infinito. Debe recordarse también que todos los cálculos sobre las distancias galácticas se basan en la hipótesis de que todas ellas poseen una luminosidad constante; y, en efecto, las distancias se miden simplemente utilizando la ley de la proporcionalidad inversa del cuadrado para el brillo aparente de una fuente distante. Y como vemos las galaxias distantes tal y como fueron hace millones

de años, los resultados de estos cálculos galácticos serán sustancialmente diferentes si las galaxias cambian sus luminosidades con el tiempo. Y como la población estelar de las galaxias se supone que evoluciona con el tiempo (véase capítulo V), es lógico suponer también que las luminosidades de las galaxias en el pasado diferían de las actuales.

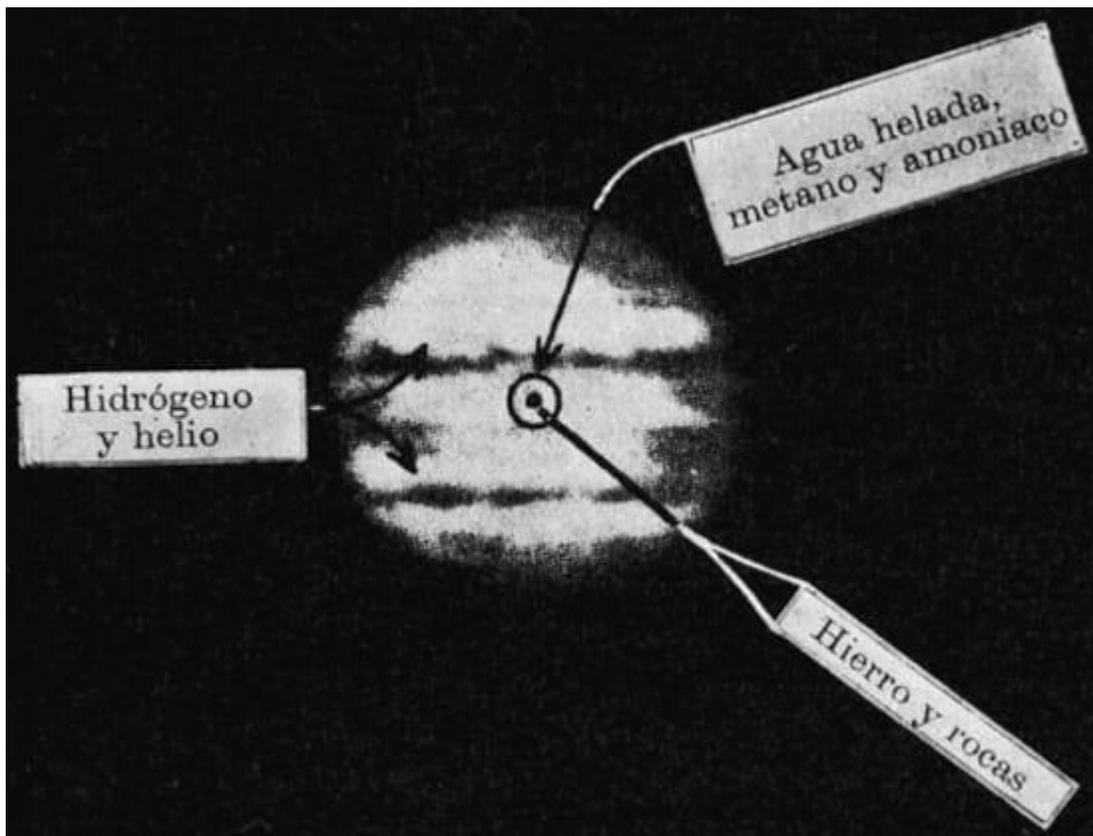


Lámina III. Júpiter. Las leyendas de donde parten las flechas indican la estructura interna del planeta.

No podemos emplear el método de los cálculos galácticos de Hubble para el estudio de la curvatura del espacio, a menos que sepamos primero en qué proporción y a qué ritmo cambian las galaxias su

luminosidad con la edad; por otra parte, sólo es posible un estudio fructífero de los cambios evolutivos de las luminosidades galácticas si poseemos un método eficaz para calcular sus distancias, lo que a su vez requiere el conocimiento de la geometría del universo. Parece que el único medio es proceder a investigar la naturaleza de esta geometría universal partiendo de la teoría de la expansión (como ya se hizo en la sección anterior) y emplear estos resultados en el desciframiento de las observaciones que se han hecho sobre los cambios evolutivos de las luminosidades galácticas.

§. Etapas primitivas de la expansión

Los estudios matemáticos del proceso de la expansión, que presentan con algún detalle en el apéndice de este libro, señalan que la constante de la ley de Hubble cambia lentamente con el proceso evolutivo del universo. Para etapas relativamente primitivas de la expansión, el valor de la constante de Hubble está relacionado con la densidad media del universo conforme a la fórmula:

$$[\text{constante de Hubble}]^2 = 5,8 \times 10^{-7} [\text{densidad media}].$$

Debe hacerse resaltar que la densidad media del universo no solamente incluye la densidad de la materia ordinaria, sino también la masa-densidad de la radiación (luz visible e invisible) que llena el espacio. Sabemos que, de acuerdo con el famoso principio de Einstein de la *equivalencia entre masa y energía*, la radiación posee un cierto peso que puede ser expresado numéricamente dividiendo

su energía por el cuadrado de la velocidad de la luz. En la vida corriente, el peso de la radiación es tan pequeño que puede ser despreciado. Concretamente, el peso de la luz que observamos en una habitación iluminada brillantemente es despreciable, comparado con el peso del aire que llena la misma habitación. En el cosmos, sin embargo, la situación es diferente, no tanto porque el peso de la radiación sea más alto como porque la densidad media de la materia sea tan baja. De acuerdo con la tan conocida fórmula de la física clásica (la llamada fórmula de Stephan-Boltzmann), la cantidad de energía radiante por unidad de volumen de espacio a temperatura T (la temperatura absoluta contada desde el punto cero a -273 grados centígrados) es igual a $7,6 \times 10^{-15} \times T^4$. Dividiendo esto por el cuadrado de la velocidad de la luz ($c^2 = 9 \times 10^{20}$), hallamos para el peso de la energía radiante el valor de $8,5 \times 10^{-36} \times T^4$ gramos por centímetro cúbico. En una habitación a la temperatura normal (poco más o menos a 300 grados absolutos) el peso de la radiación, que en este caso es el de los rayos caloríficos, es tan sólo de 10^{-25} gramos por centímetro cúbico. En el espacio interestelar que es calentado por las estrellas y tiene la temperatura constante de alrededor de 100 grados absolutos (próxima a la temperatura en la que se licúa el aire), la densidad de radiación (¡rayos caloríficos muy fríos!) es de 10^{-27} gramos por centímetro cúbico. Por pequeño que esto sea, constituye el 0,1 por 100 de la densidad del gas interestelar, que tiene 10^{-24} gramos por centímetro cúbico.

A partir de las leyes de la física clásica, podemos deducir el hecho de que la densidad de la radiación de un volumen en expansión disminuirá más rápidamente que la densidad de la materia en el mismo volumen.¹³ Esto nos hace suponer que *durante las más primitivas etapas de la expansión el peso de la radiación en cada volumen de espacio superaba al de la materia en el mismo volumen.* Esto quiere decir que en aquellas épocas la materia ordinaria no contaba apenas, y que el principal papel correspondía a la radiación intensamente caliente.

Casi podíamos citar las palabras de la Biblia: «En el comienzo fue la luz» (¡y tanta luz!). Pero desde luego esta *luz* estaba compuesta en su mayor parte por rayos X y gamma de alta energía. Los átomos de la materia ordinaria estaban definitivamente en minoría y eran arrojados de acá para allá por poderosas corrientes cuánticas de luz.

La relación anteriormente establecida entre el valor de la constante de Hubble y la densidad media del universo permite deducir una sencilla fórmula que nos da la temperatura durante las etapas primitivas de la expansión en función del tiempo contado a partir del momento de la máxima compresión. Expresando aquel tiempo en segundos y la temperatura en grados (véase apéndice, págs. 212-214), tenemos:

$$\text{Temperatura} = 1,5 \times 10^{10} / [\text{tiempo}]^{1/2}.$$

¹³ Si la arista de un recipiente cúbico es multiplicada por un factor a , su volumen crecerá en un factor a^3 y la densidad de materia en él decrecerá según el mismo factor. Pero la temperatura de la energía radiante en este volumen decrecerá según el factor a (ley de Wien), de modo que su densidad decrecerá según el factor a^4 (de acuerdo con la ley de Stephan-Boltzmann)

Así, cuando el universo tenía un segundo de edad, un año y un millón de años, su temperatura era, respectivamente, de 15 billones, 3 millones y 3 000 grados absolutos. Incluyendo la edad actual del universo ($t = 10^{17}$ segundos) en aquella fórmula, encontramos:

$$T_{\text{actual}} = 50 \text{ grados absolutos.}$$

Lo que está poco más o menos de acuerdo con la temperatura actual del espacio interestelar. ¡En efecto, nuestro universo se tomó algún tiempo para enfriarse, desde el achicharrante calor de sus días primitivos al frío de hielo de hoy!

Mientras la teoría suministra una fórmula exacta para la temperatura de la expansión universal, se reduce a una fórmula con un factor desconocido, cuando trata de la densidad de la materia. En efecto, se puede probar (véase el apéndice) que

$$[\text{Densidad de materia}] = \text{constante} / [\text{tiempo}]^{3/2}.$$

Vemos en el capítulo III que el valor de aquella constante puede obtenerse a partir de la teoría del origen de las especies atómicas.

Capítulo III

Formación de los átomos

Contenido:

- §. *La abundancia natural de las especies atómicas*
- §. *Hipótesis del equilibrio congelado*
- §. *Hipótesis del átomo primario*
- §. *Hipótesis de Hilen*
- §. *Curva teórica de las abundancias*
- §. *El caso de los elementos ligeros*
- §. *¿Puedan formarse elementos pesados en las estrellas?*

§. La abundancia natural de las especies atómicas

Como hemos indicado en varias ocasiones, parece razonable suponer que las diferentes especies atómicas fueron formadas durante los períodos de expansión muy primitivos, cuando toda la materia del universo se hallaba aún uniformemente comprimida a densidades muy elevadas y sometida a temperaturas altísimas, ofreciendo, por consiguiente, unas condiciones muy favorables para toda clase de transformaciones nucleares. Nuestro conocimiento de la abundancia relativa de los elementos químicos y sus isótopos en la naturaleza, nos permitirá reconstruir el cuadro de las primitivas etapas de la expansión, ya que estas diferencias en las cantidades de las distintas especies atómicas producidas durante esta *era del guiso universal*, deben de haber sido causadas por las condiciones físicas que entonces prevalecían. De este modo resulta que podemos considerar el cuadro que expresa la abundancia relativa de las

especies atómicas como el más antiguo documento que pertenece a la historia de nuestro universo.

Las abundancias relativas de los elementos han sido objeto de estudios exhaustivos por parte de un buen número de geofísicos y astrofísicos, y hoy poseemos gran cantidad de datos sobre esta cuestión. La mayor parte de estos datos nos lo proporciona el análisis químico de la corteza terrestre y de los meteoritos que representan, probablemente, los fragmentos de un planeta primitivo que en algún tiempo circulaba entre las órbitas de Marte y de Júpiter. A estos datos se añadieron los del análisis espectral del Sol, el de las estrellas y el de la materia difusa esparcida a lo largo de todo el espacio interestelar. El resultado más importante de estos estudios es el hecho de que *la constitución química del universo es sorprendentemente uniforme*. Se halló que el 55 por 100 de toda la materia cósmica es hidrógeno, el 44 por 100 está constituido por helio, y el restante 1 por 100 es al que pertenecen todos los elementos más pesados, en las mismas proporciones que los encontramos en la Tierra. Considerando las cifras generales de la abundancia cósmica, nuestra Tierra representa una notable excepción, casi carente como se halla de hidrógeno y de helio, que son los principales constituyentes de la materia en el universo.¹⁴

¹⁴ Todos saben que el helio es un elemento muy escaso en la Tierra, pero parecería a primera vista que el hidrógeno es muy abundante. Sin embargo, esta impresión se debe enteramente al hecho de que tenemos que vivir en el centro del principal depósito de hidrógeno, a saber, la humedad de la atmósfera, y cerca de los océanos, que cubren dos tercios de la superficie terrestre. Si recordamos que la profundidad oceánica es despreciablemente pequeña si se la compara con el diámetro de nuestro globo, y que las rocas graníticas y basálticas que constituyen el cuerpo principal de la Tierra no contienen nada de hidrógeno, resulta que éste es, en realidad, bastante raro en nuestro planeta.

Pero tanto la escasez de estos como de otros gases raros, es un fenómeno estrictamente local, derivado de las circunstancias que concurrieron en el nacimiento de la Tierra. Como demostraremos en el capítulo IV, la formación de nuestro sistema planetario empezó por un proceso de agregación de polvo interplanetario del que salieron los que podríamos llamar núcleos planetarios. Este polvo, que flotaba en el gas interestelar constituido por una mezcla de hidrógeno y helio, tiene aproximadamente la misma composición que las nubes de polvo que se levantan en un camino montañoso durante el trabajo de una excavadora, y su aglomeración originó los cuerpos rocosos de nuestra Tierra, Venus y otros planetas menores. Pero el material gaseoso que llenaba los espacios interestelares no siguió participando en este proceso hasta que los cuerpos rocosos se hicieran lo bastante grandes y densos para que su fuerza de gravedad pudiera capturar a aquellos gases. Para que esto hubiera sido posible, uno de esos que hemos llamado núcleos planetarios habría debido tener varias veces el peso de la Tierra. Y ni ésta, ni Marte, ni Venus, crecieron nunca lo suficiente para que tal cosa sucediese (probablemente porque en sus cercanías se había agotado la cantidad de polvo), y por eso se quedaron como los planetas rocosos que conocemos hoy. No ocurrió lo mismo con los núcleos primigenios de Júpiter, Saturno y otros planetas mayores, los cuales, al exceder el límite crítico de su masa, se rodearon a sí mismos de pesadas atmósferas de hidrógeno y de helio. Así, de acuerdo con los estudios de Harrison Brown, el núcleo rocoso de Júpiter, que es parecido al de nuestra Tierra, pero seis veces más

pesado, sólo alcanza alrededor del 2 por 100 de la masa total (300 veces la masa de la Tierra) del planeta. Este núcleo central está cubierto por capas de hielo, amoníaco y metano, los que en su conjunto constituyen otro 8 por 100. El restante 90 por 100 del gigantesco cuerpo de Júpiter consiste en una mezcla a gran presión de hidrógeno y helio que casi alcanza la densidad del agua en las proximidades de la superficie oculta del núcleo central. Esta estructura interna de Júpiter, superpuesta a su fotografía ordinaria, puede verse en la lámina III. Así pues, solamente los planetas pequeños y los satélites quedan fuera de la regla según la cual el universo está compuesto de un 55 por 100 de hidrógeno, un 44 por 100 de helio y un 1 por 100 de *otros átomos*.

La figura 6 representa las abundancias cósmicas de las especies atómicas mediante un diagrama basado en el trabajo clásico del geoquímico noruego V. M. Goldschmidt, complementado con datos más recientes, obtenidos por Harrison Brown, del análisis de meteoritos. Vemos claramente que las abundancias cósmicas decrecen muy rápidamente al crecer los pesos atómicos. Elementos tales como la plata o el molibdeno, colocados la mitad superior del camino del sistema periódico, solamente se encuentran en la cantidad de una parte entre varios billones. El hecho sorprendente de la curva de abundancias naturales es que,

después de alcanzar los elementos con peso atómico próximo a 100, la curva se hace plana, indicando abundancias casi iguales para todos los elementos de la mitad superior del sistema periódico.

Esta sorprendente forma de la curva empírica, su original y rápida caída (exponencial), seguida de su continuación horizontal, contiene, evidentemente, una importante indicación sobre las condiciones bajo las que se originaron los átomos.

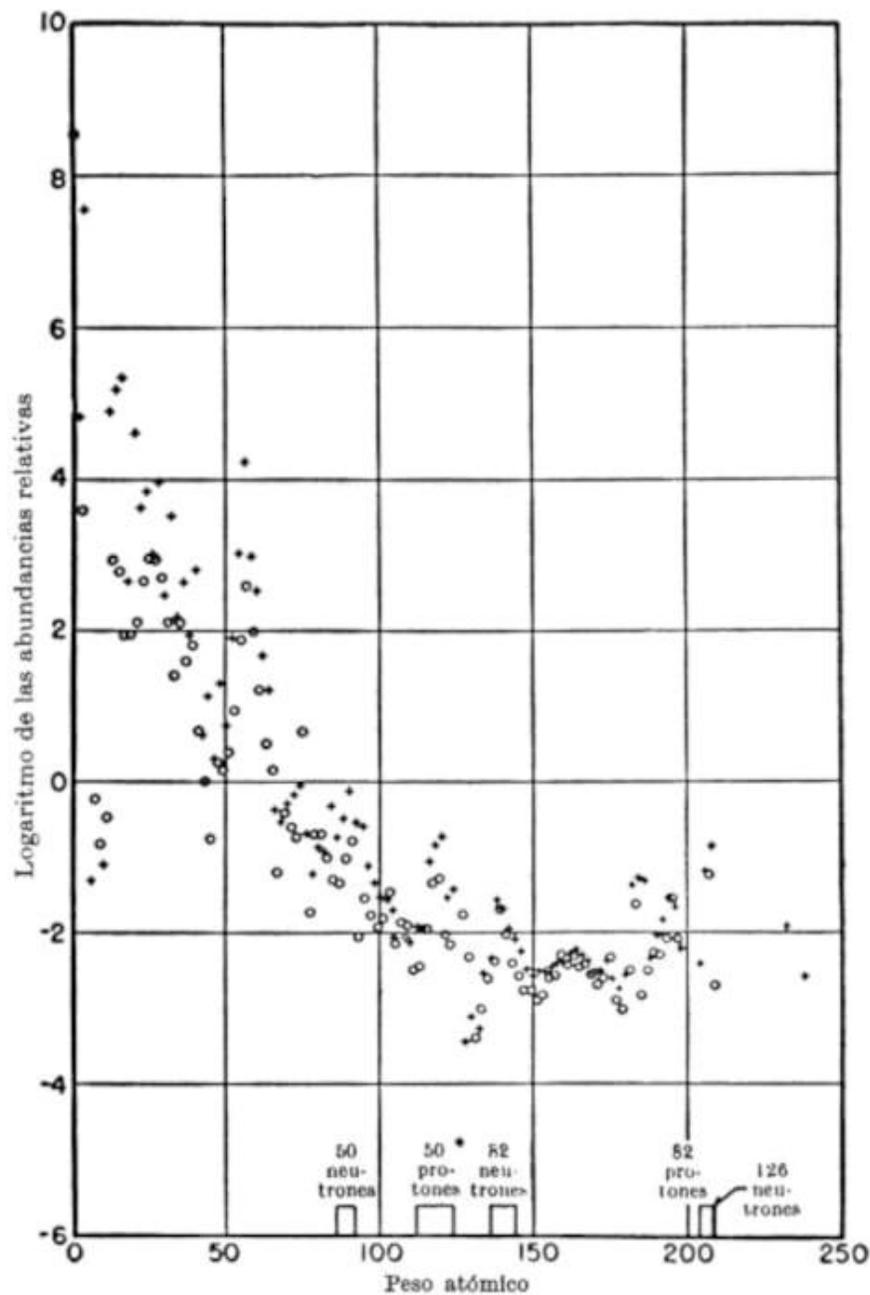


Figura 6. El documento arqueológico más antiguo perteneciente a la historia del universo. Las abundancias de varias especies atómicas observadas en el universo, señaladas (a escala logarítmica) al lado de sus pesos atómicos respectivos. Las cajitas (abajo) indican los «números mágicos».

Cualquier teoría que pretenda establecer una semblanza clara del proceso de la elaboración nuclear, también tiene que ser capaz de dar una explicación satisfactoria de esta curva de abundancias.

§. Hipótesis del equilibrio congelado

Las primeras interpretaciones de la curva empírica de las abundancias naturales se basaron en la simple —y en cierto modo más lógica— hipótesis de que la distribución observada representa alguna clase de equilibrio químico (o más bien alquímico) entre las diversas especies atómicas. Este período debió de existir cuando la temperatura de la materia era lo suficientemente alta como para permitir toda clase de reacciones termonucleares, y debió de haberse congelado cuando la temperatura descendió de resultas de la rápida expansión.

La noción del *equilibrio congelado* se puede explicar con un sencillo ejemplo que proviene del campo fisicoquímico. Supongamos que tenemos una cierta cantidad de agua en un recipiente cerrado (figura 7, A). Si la calentamos a una temperatura lo suficientemente alta (que esté por encima de la llamada *temperatura crítica*, que para el agua es de 374 grados centígrados), toda el agua del recipiente se

transforma en vapor; a esta temperatura el movimiento térmico de las moléculas de agua es tan veloz que las fuerzas de cohesión entre ellas no pueden por más tiempo hacerlas permanecer unidas (figura 7, B). Con un ulterior crecimiento de la temperatura, el movimiento térmico crece de una manera lo bastante violenta como para que los choques entre las moléculas lanzadas empiecen a partirlas en átomos de hidrógeno y de oxígeno por separado (figura 7, C). A una temperatura de unos cuantos miles de grados, nuestra retorta contendrá una mezcla de átomos libres de hidrógeno y de oxígeno entre las pocas moléculas de agua que quedan. Para cada temperatura y presión dadas (o densidad) existirá una proporción determinada de estos componentes, que puede calcularse por medio de la fórmula clásica del equilibrio. Si ahora enfriamos nuestro recipiente muy poco a poco, el proceso se invertirá y finalizará con el agua de la que partimos. Sin embargo, si enfriamos el recipiente muy de prisa (echando aire líquido sobre él o haciendo que de pronto el gas ocupe mucho mayor volumen), el proceso de recombinación debe realizarse precipitadamente. Algunos átomos tendrán aún tiempo de encontrar a los compañeros que les corresponden y se formarán algunas moléculas de H_2O , así como de H_2 y O_2 (figura 7, D). Pero con temperaturas normales sólo tendríamos en el recipiente agua, puesto que las mezclas de agua más oxígeno e hidrógeno Ubres representan el equilibrio para temperaturas mucho más altas. Tal mezcla, pues —la enfriada con rapidez— está en *equilibrio metastable*: si le echamos una cerilla, se

producirá una explosión y el gas se transformará en vapor de agua, que más tarde pasará a agua por condensación.

Este ejemplo presenta una gran analogía con lo que ocurriría durante la rápida expansión de la materia en el universo, calentada en un principio a elevadísimas temperaturas. Ésta podría ser la explicación del hecho de que la distribución actual de las variadas especies atómicas contenga muchos núcleos que pueden reaccionar todavía unos con otros, liberando así ingentes cantidades de energía nuclear oculta. Porque si, en efecto, el conjunto de las especies atómicas que existen estuviera ahora en estado de equilibrio, cualquier programa basado en la energía atómica sería tan imposible como un proyecto para obtener energía a partir de las reacciones químicas entre los diversos minerales (excluidos, desde luego, el carbón y el petróleo) que constituyen la corteza terrestre.

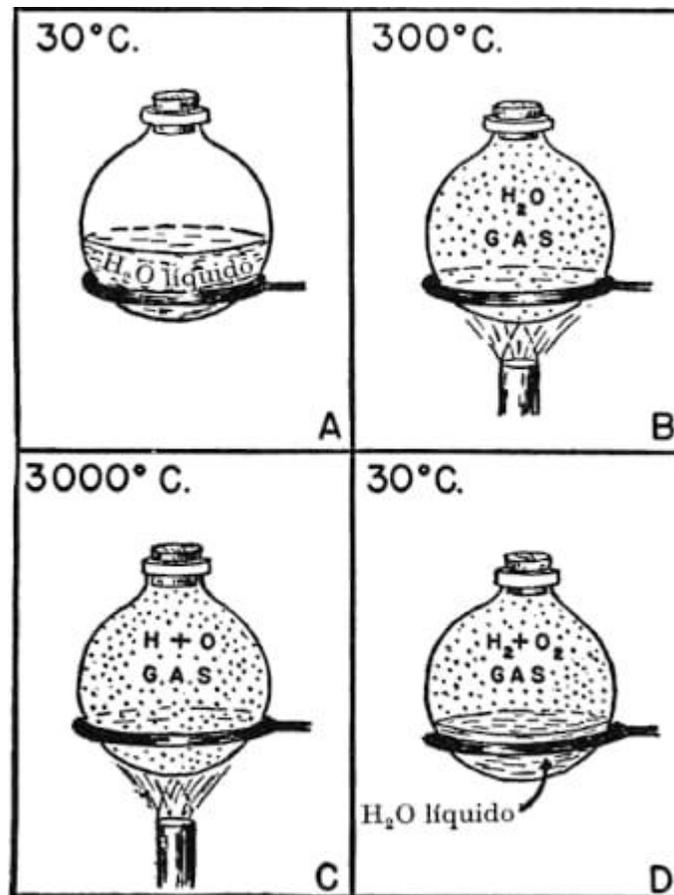


Figura 7. Cómo obtener una mezcla explosiva hidrógeno-oxígeno mediante el equilibrio congelado.

Las proporciones en las que se hallan en equilibrio las diversas especies atómicas, para ciertas condiciones dadas de temperatura y densidad, se pueden calcular por una fórmula parecida a la que emplean los fisicoquímicos en el cálculo de los estados de equilibrio entre moléculas. Todo lo que hay que hacer es sustituir las energías de los enlaces nucleares (que alcanzan varios millones de electronvoltios) por las energías de enlace molecular (que sólo son de varios electronvoltios) y, desde luego, emplear muchos más altos valores para las temperaturas y las presiones. Muchos científicos

han llevado a cabo cálculos de esta clase, principalmente S. Chandrasekhar y V. L. R. Henrich y, más recientemente, O. Klein, G. Beskow y L. Treffenberg. Se encontró que la parte descendente de la curva (excluyendo todas las pequeñas irregularidades de la curva empírica) podía interpretarse como el estado del equilibrio congelado correspondiente a una temperatura de 8 billones de grados y a una densidad 10 millones de veces la del agua. Estos cálculos se ven en un aprieto, no obstante, cuando intentan seguir su éxito inicial al tratar de los elementos más pesados. En vez de hacerse plana, como le ocurre a la curva empírica de las abundancias, la curva teórica continúa su descenso rápido (figura 8). Las abundancias empíricas de los elementos pesados son billones de billones de veces mayores que los predichos por la curva teórica. Este resultado negativo no se debía a ninguna hipótesis específica hecha en los cálculos, sino que se derivó directamente de la hipótesis del equilibrio.¹⁵

Este fallo de la teoría del equilibrio produjo varios intentos para corregirlos. Así, por ejemplo, Chandrasekhar y Henrich sugirieron que los elementos ligeros y pesados fueron elaborados en épocas diferentes, durante el proceso de expansión. De acuerdo con esta hipótesis, los elementos pesados se fraguaron y *congelaron* en una fecha más primitiva, cuando la temperatura muy alta y la fabricación de los elementos más ligeros continuaba por mucho más

¹⁵ En esta teoría, las abundancias relativas están dadas imperfectamente por la expresión:

$$\log(\text{abundancia}) = E_A/kT,$$

donde E_A es la energía total de enlace de los núcleos de peso atómico A , k la llamada constante de Boltzmann, y T la temperatura absoluta. Puesto que en todo el sistema periódico las energías nucleares de enlace son groseramente proporcionales a los pesos atómicos, la curva $\log(\text{abundancia})$ -peso atómico debe descender ininterrumpidamente en todo el intervalo entre el hidrógeno y el plomo.

tiempo a temperaturas más bajas. No obstante, tal creencia no puede sostenerse, habida cuenta de lo que los físicos nucleares saben acerca de las proporciones en las reacciones nucleares y en las condiciones de que se trata.

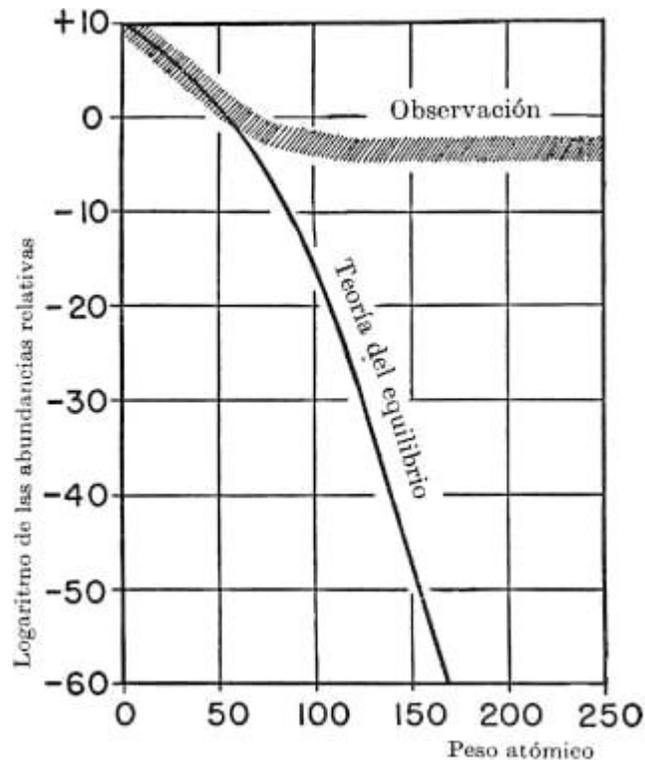


Figura 8. Fallos en la teoría del equilibrio congelado.

El único camino sería suponer que los diferentes átomos se hicieron en diversos lugares y bajo distintas condiciones de temperatura y presión. Así, Klein, Beskow y Treffenberg, en Suecia, imaginaron que los diferentes elementos químicos se habían formado a profundidades distintas en algunas estrellas primitivas (que después desaparecieron), las cuales estallaron más tarde, esparciendo su material por todo el espacio. Una opinión parecida

es la expresada por el astrónomo holandés G. B. van Albada y el astrónomo inglés Fred Hoyle, quienes prefieren que este trabajo se haya hecho en estrellas que ahora existen: Van Albada dice que en las llamadas gigantes rojas, y Hoyle afirma que fue en las supernovas que estallan. Sin embargo, los escritores posteriores no fueron capaces de calcular las abundancias relativas conforme a lo que sus teorías establecían, principalmente por la enorme complejidad del cuadro que todo ello implicaba, ya que debía siempre ser posible reproducir *cualquier* curva dada de abundancia de los elementos empleando convenientemente las condiciones elegidas para explicar sus diferentes partes. Lo que Albada y Hoyle exigen parece ser algo así como la petición de una inexperta ama de casa que deseara tres hornos eléctricos para un banquete: uno para guisar el pavo, otro para las patatas y otro para cocer el pastel. Tal hipótesis de las heterogéneas condiciones que se precisan para cocinar, arreglada para darnos las correctas cantidades de luz, tamaño medio y elementos pesados, destruiría, no obstante, por completo el simple esquema de la fabricación de los átomos, introduciendo un complicado aparato, aunque éste se llamase, de un modo muy particular, *facilitador del guiso*.

§. Hipótesis del átomo primario

Otra posible explicación del origen de las especies atómicas fue propuesta por el científico belga Georges Lemaître, quien formuló su denominada *hipótesis del átomo primitivo* (u original), de esto hace ya veinte años. Un nombre más correcto sería el de *núcleo primitivo*,

ya que Lemaître sugirió que antes de que empezara la expansión, toda la materia del universo se hallaba en estado de fluido nuclear denso, formando un núcleo gigantesco parecido al núcleo atómico actual, pero desde luego mucho mayor. Esta hipótesis implica que en los comienzos de la expansión la temperatura de la materia era relativamente baja (por debajo de la *temperatura crítica* del fluido nuclear), de modo que el movimiento térmico de los nucléolos no era lo suficientemente fuerte para romper los enlaces de la fuerza de cohesión que los mantenía unidos y en un fluido continuo. Cuando empezó la expansión, este fluido original se hizo mecánicamente inestable y empezó a fraccionarse en pedazos de todos los tamaños posibles. He aquí la descripción de este proceso según las propias palabras de Lemaître:

El mundo atómico se rompió en fragmentos y cada uno de éstos en pedacitos aún más pequeños. Suponiendo, para simplificar las cosas, que esta fragmentación se hizo en trozos iguales, hallamos que se necesitaron doscientas sesenta fragmentaciones sucesivas para alcanzar la pulverización actual de la materia en nuestros pobres y pequeños átomos, tan pequeños que apenas permiten que se les divida más. La evolución de mundo puede compararse a unos fuegos artificiales que acabaran de finalizar: unos cuantos fuegos fatuos rojos, cenizas y humo. Frente a un brasa ya fría, observamos el lento declinar de

*los soles y tratamos de recordar la brillantez desvanecida de origen de os mundos.*¹⁶

El autor de esta espectacular visión no quiso, sin duda, seguir los detalles del proceso de fragmentación mediante el análisis matemático riguroso. Esta tarea se cargaría a las espaldas de María Meyer y Edward Teller, de Chicago, quienes llegaron, independientemente uno de otro, a ideas semejantes en lo que se refiere al origen de las especies atómicas. Meyer y Teller no discuten el verdadero comienzo del proceso de ruptura en relación con la teoría general de la expansión del universo. Empiezan con la etapa en la que los fragmentos individuales se habían reducido a un tamaño de varios kilómetros de diámetro y poseían una masa comparable a la de una estrella mediana¹⁷ (*estrellas atómicas* de Lemaître). En tal momento los fragmentos estaban constituidos por el resultado del proceso de ruptura mecánica del fluido nuclear inicialmente neutro, y debían consistir exclusivamente en neutrones. Sin embargo, debido a transformaciones de tipo espontáneo [protón \rightarrow neutrón + electrón], estos originales *polineutrones* pronto se debieron de cargar positivamente y rodear de una fina capa de atmósferas electrónicas. Estos átomos primitivos se parecían más bien a los átomos ordinarios de hoy, excepto por su gigantesco tamaño y porque el grosor de sus

¹⁶ En la *Revue des Questions Scientifiques*, noviembre de 1931.

¹⁷ Puesto que el fluido nuclear tiene una densidad de 10^{14} veces la del agua, el radio de una gotita nuclear que tenga la masa solar sería de unos 14 o 15 kilómetros.

atmósferas electrónicas (de sólo 10^{-10} cm) era despreciablemente pequeño comparado con los diámetros de sus núcleos (figura 9).



Lámina IV. La gran nebulosa de Orion, iluminada por sus más próximas estrellas.

Estudiando la estabilidad mecánica de tales superátomos, Meyer y Teller pudieron demostrar que la superficie del gigantesco núcleo se cubriría rápidamente de una multitud de granos o papilas minúsculas, de unos 10^{-12} cm de diámetro.



Lámina V. Nebulosa oscura del Águila, no iluminada por las estrellas.

Estos bultitos se separarían del cuerpo materno y se dispersarían en forma de fino rocío que portaría los núcleos de los distintos elementos pesados. Meyer y Teller sugieren que, en tanto que los elementos pesados debieron originarse por el proceso de los bultitos, los elementos más ligeros debieron de ser el resultado de algún equilibrio congelado, conforme lo describimos con anterioridad. No obstante, es difícil comprender cómo éstas dos teorías pueden compaginarse. En realidad, cada una necesita condiciones físicas enteramente diferentes para el éxito en la factura del átomo.

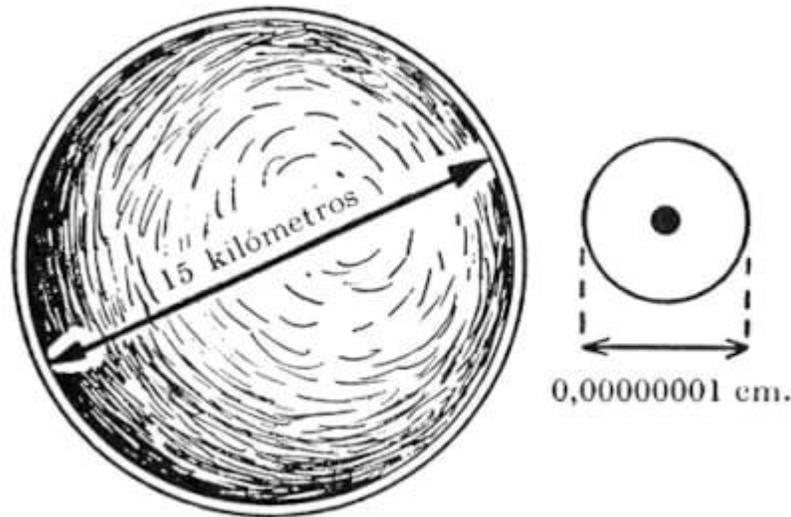


Figura 9. Un superátomo hipotético y un átomo ordinario. El grosor de la atmósfera en el primero y el tamaño del núcleo en el segundo están muy aumentados.

§. Hipótesis del hilen¹⁸

Un tercer modo posible mediante el cual las especies atómicas pueden haber sido formadas fue propuesto hace pocos años por el autor de este libro y desarrollado con algún detalle en colaboración con sus colegas Ralph Alpher, R. C. Herman, J. S. Smart, Enrico Fermi y Anthony Turkevich. Esta teoría ocupa una posición intermedia entre la hipótesis del equilibrio congelado y la de la ruptura espontánea del fluido nuclear primitivo. Este estado original de la materia se supone que sería un *gas nuclear caliente*, no un fluido. También se supone que las condiciones físicas de aquella época cambiaban tan rápidamente que no podía establecerse nunca ningún equilibrio real, y por esto la situación no debe tratarse sino en términos de un proceso muy dinámico. Ambas suposiciones

¹⁸ Del griego ὑλη, materia primaria, para Aristóteles. (Nota del traductor.)

están lejos de ser arbitrarias; se deducen, en efecto, de la teoría general de la expansión descrita en el capítulo II,¹⁹ la cual muestra que durante las etapas primitivas de la expansión universal la temperatura debió de ser extremadamente alta y los cambios extraordinariamente rápidos.

Podemos ilustrar las diferencias entre el *equilibrio congelado* y esta *dinámica muy rápida* con el ejemplo de una escuela sometida a ciertas variaciones en su programa pedagógico. Si este programa no se cambiara en un número determinado de años (mayor que el empleado en esta escuela por cualquier estudiante) y repentinamente se cambiara el programa, los alumnos que terminaran los estudios antes del cambio, estarían en equilibrio con el primer programa. Por ejemplo: si el cambio consistiera en la abolición de las lenguas clásicas, que antes enseñaban, los alumnos más antiguos sabrían griego y latín. Pero si los cambios en el programa se hicieran continuamente, entonces los conocimientos de los estudiantes que se fuesen graduando serían distintos para cada promoción, ninguna de éstas correspondería nunca a ninguna de los distintos programas que estuviesen en vigor en las distintas épocas. Tal situación, sin duda tan dañina para un programa educativo, es realmente útil para la comprensión del origen de las especies atómicas.

Permitidnos considerar ahora el estado de la materia durante los primeros minutos del proceso de expansión, cuando la temperatura

¹⁹ Ningún autor anterior basó su hipótesis en los resultados de la cosmología relativista.

del universo era de muchos billones de grados.²⁰ A estas temperaturas, la energía cinética del movimiento térmico seguía medida en millones de electronvoltios, y las partículas estarían lanzadas a velocidades comparables a las obtenidas hoy con las máquinas *rompedoras de átomos*. En estas condiciones no existiría ningún núcleo compuesto, y el estado de la materia se debe imaginar como un gas caliente formado enteramente por partículas nucleares, esto es, por protones, neutrones y electrones. Se sabe, desde luego, que los neutrones libres son intrínsecamente inestables y que se rompen espontáneamente, transformándose en protones y electrones hasta trece minutos después de haber sido expulsados de los núcleos. Sin embargo, a muy altas temperaturas y presiones, pueden coexistir neutrones libres, protones y electrones en número realmente considerable. En efecto, en tales condiciones extremas, se establecerá una especie de equilibrio dinámico: la progresiva desintegración de los neutrones ($n \rightarrow p + \bar{e}$) será compensada por la construcción de nuevos neutrones mediante el proceso inverso, choques de protones y electrones ($p + \bar{e} \rightarrow n$). A esta mezcla primitiva de partículas nucleares le llamaremos *hilen*, resucitando un término desusado que, según el *Diccionario* de Webster, significa «la primera sustancia a partir de la cual se supone que se formaron los elementos».

²⁰ Véase fórmula de la pág. 70.

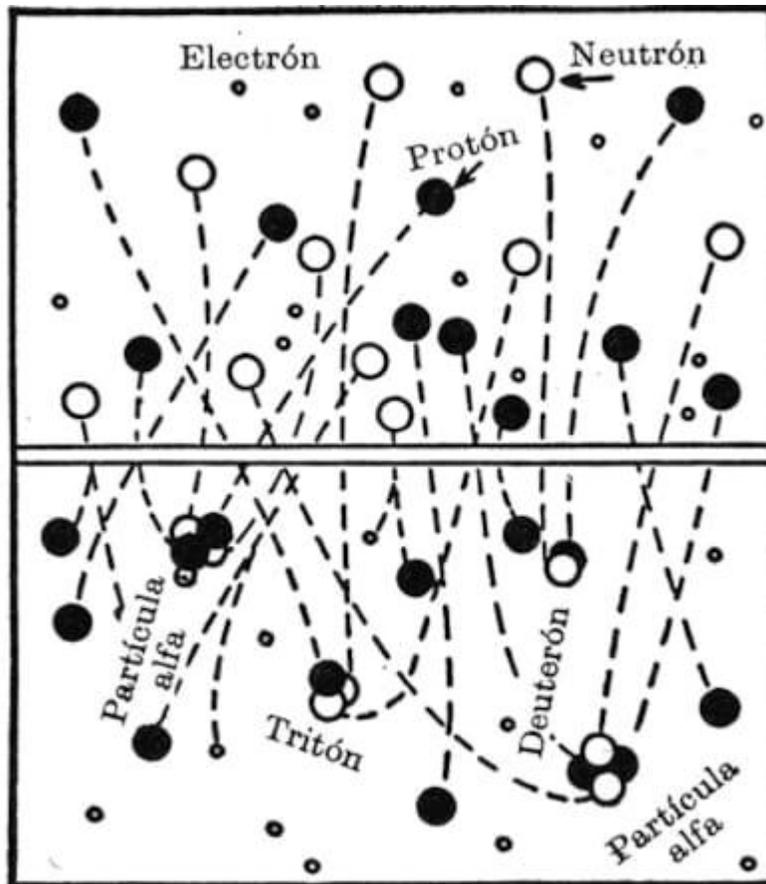


Figura 10. Proceso desarrollado en el hidrógeno en enfriamiento. De cada diez neutrones presentes en un principio (arriba), tres se desintegran, cuatro entran en la estructura de dos partículas alfa, dos se emplean en construir un tritón, y uno, un deuterón.

A continuación podemos preguntarnos qué le sucedió al hidrógeno cuando su densidad y temperatura comenzaron a disminuir como resultado de la rápida expansión que se producía en el joven universo. Tan pronto como el hidrógeno empezó a enfriarse, la reacción engendradora de neutrones ($p + e^- \rightarrow n$), que había estado suministrando electrones frescos, hubo de retardarse al principio, y luego detenerse por completo, debido a la falta de electrones

térmicos rápidos. El desmoronamiento espontáneo de los neutrones se llevó a cabo entonces sin ninguna compensación; así que no quedarían muchos de éstos libres en la mezcla al finalizar la primera hora después de que la expansión comenzase. Por otra parte, el descenso de la temperatura favorecería el *proceso de agregación*, en el que los neutrones que todavía quedaban fueron uniéndose a los protones, formando de esta manera combinaciones de partículas con diferentes grados de complejidad. Estas combinaciones fueron los prototipos de los núcleos atómicos que existen hoy. La rivalidad entre la desintegración neutrónica y el proceso de combinación o agregación se muestra en la figura 10.

Los agregados nucleares que se originaron de esta manera contenían en un principio muchos más neutrones que protones, porque la agregación de protones era impedida fuertemente por la repulsión entre sus cargas eléctricas del mismo signo. Y como la estabilidad del núcleo atómico requiere aproximadamente igual número de ambas clases de partículas (el núcleo estable del átomo de oxígeno, por ejemplo, tiene ocho protones y ocho neutrones), el crecimiento de agregados de partículas debió de interrumpirse de cuando en cuando por el proceso de transformación β , en el cual los neutrones sobrantes eran convertidos en protones por la emisión de un electrón negativo. El desarrollo de un núcleo complejo por capturas neutrónicas intermitentes y transformaciones β se muestra de forma esquemática en la figura 11.

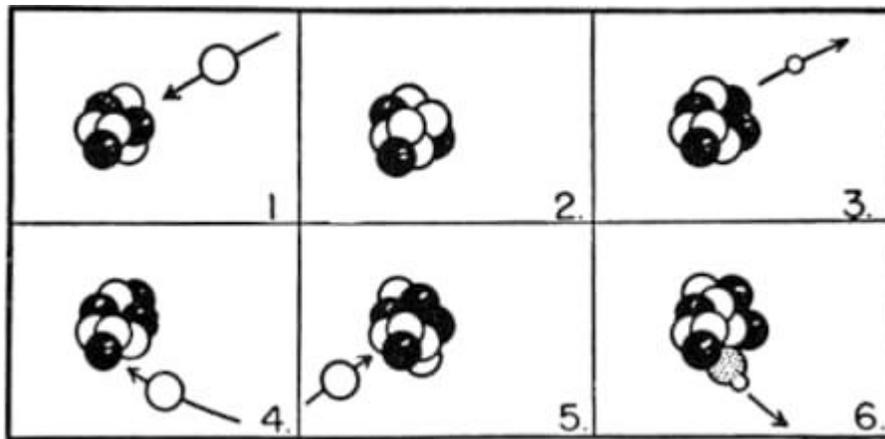


Figura 11. Proceso intermitente de la captura neutrónica y de la desintegración β . Las bolas negras representan los protones: las blancas, los neutrones; las más pequeñas, los electrones negativos.

Puesto que el tiempo total permitido para la agregación se limitaba a una hora poco más o menos (después de este lapso ninguno de los neutrones fue abandonado y la temperatura del hilen cayó por debajo del límite necesario para las reacciones de protones), los resultados del proceso debieron de depender de la velocidad a la que se producía la agregación, velocidad que a su vez estaba determinada por la densidad del hilen, ya que a más alta densidad corresponde un mayor número de choques entre las partículas por unidad de volumen y tiempo. Si en el momento en que la temperatura del hilen cayó al punto —por debajo de 10° grados centígrados— en el que la agregación es posible, la densidad del hilen era ya muy baja, la mayoría de los neutrones inicialmente presentes se habrían roto en protones y electrones antes de tener la oportunidad de encontrarse en su camino con un núcleo en período de crecimiento y al que pudieran unirse. Por otra parte, en el caso

contrario de que en aquel momento la densidad del hilen fuera muy alta, la mayoría de los neutrones presentes en un principio se emplearían en la construcción de núcleos pesados, y sólo muy pocos se habrían desintegrado en protones y electrones. En el primer caso, el proceso daría por resultado una gran cantidad de átomos de hidrógeno, y prácticamente no habría elementos pesados; en el segundo, muy poco hidrógeno y grandes cantidades de núcleos pesados. Vemos que, con respecto a la formación de las especies atómicas propiamente dichas y a los porcentajes que corresponden a aquellas que se encuentran actualmente en la naturaleza, se debe tener en cuenta y apreciar con mucha finura la densidad del hilen (o presión) durante el período de formación. Así, si se emplease demasiada presión en esta «olla de presión primitiva», se fabricaría demasiado hidrógeno y poco uranio, en tanto que poca presión en la «olla» daría lugar al resultado opuesto. Esta clase de ajustes debe darnos el valor de la constante en la fórmula de la densidad estudiada en el capítulo II, que es el único eslabón que nos falta en la cadena de condiciones que determinaron las propiedades físicas iniciales del universo en expansión.

El resultado primero de la teoría del hilen, o sea la conclusión de que todo el proceso de la construcción atómica se desarrolló en menos de una hora, bien podía ser recibido con sorpresa e incredulidad. En efecto, parece cosa de locos hablar de algo que sucedió hace billones de años y que duró sólo alrededor de una hora. Sin embargo, se debe recordar que en los fenómenos nucleares es más bien elástica la escala de la velocidad del tiempo.

Por ejemplo: la reacción nuclear en cadena producida por la explosión de una bomba atómica dura unos cuantos microsegundos, pero, en cambio, varios años después de la explosión pueden detectarse todavía algunos productos radiactivos de la fisión en el lugar donde estalló la bomba.

La relación de varios años a varios microsegundos es:

$$\sim 3 \times 10^7 / 10^{-6} = 3 \times 10^{13};$$

la relación de tres billones de años a una hora es:

$$10^7 / 3\,600 = 3 \times 10^{13}.$$

Pues bien: si no nos sorprendemos de que tan breve proceso como el de la explosión de una bomba atómica pueda producir material radiactivo que dure varios años, ¿por qué nos ha de sorprender que el proceso nuclear primitivo originara los átomos de uranio, torio, etc., que se encuentran en actividad todavía hoy, varios billones de años más tarde?

Se puede discutir nuestro derecho a aplicar los datos empíricos de la física nuclear de hoy a procesos desarrollados en condiciones tan extrañas como las existentes durante las etapas iniciales de la gran compresión, durante la expansión del universo, con el material recalentado a muchos billones de grados. Pero también a esta situación se le puede hallar un paralelo. En efecto, como ya hemos dicho, a aquellas temperaturas las energías térmicas de las

partículas nucleares andaban por los alrededores del millón de electronvoltios, que son las energías empleadas todos los días en los laboratorios nucleares para el estudio de estas reacciones. Da lo mismo que esas partículas nucleares que sufren colisiones tengan tan altas energías como resultado del movimiento térmico o porque sean aceleradas de un modo especial por medio de máquinas de alta tensión. También aprendimos que la densidad de la materia durante el período de la formación atómica era comparable a la del aire atmosférico, de manera que no existe razón alguna para dudar de la aplicabilidad de las leyes físicas correspondientes a los gases o de las leyes de la gravedad que han gobernado el proceso de expansión. En efecto, hallamos que existen muy pocas hipótesis entre las que se pueda elegir para basar nuestros cálculos. Todo lo que podemos hacer es aceptar la fórmula relativista para la expansión universal y los datos empíricos correspondientes a las distintas reacciones nucleares, comprobando si los cálculos conducen a un resultado que esté de acuerdo con las abundancias observadas de las especies atómicas conocidas.

§. Curva teórica de las abundancias

Realmente son muy sencillas las ecuaciones matemáticas que describen el proceso constructivo que acabamos de examinar. Ellas establecen que la velocidad de variación del número de núcleos con un peso atómico dado es igual a la diferencia entre la velocidad de producción por captura neutrónica del grupo inmediato de peso atómico más bajo y la velocidad de desaparición a través de la

captura neutrónica por el grupo inmediato de peso atómico más alto.

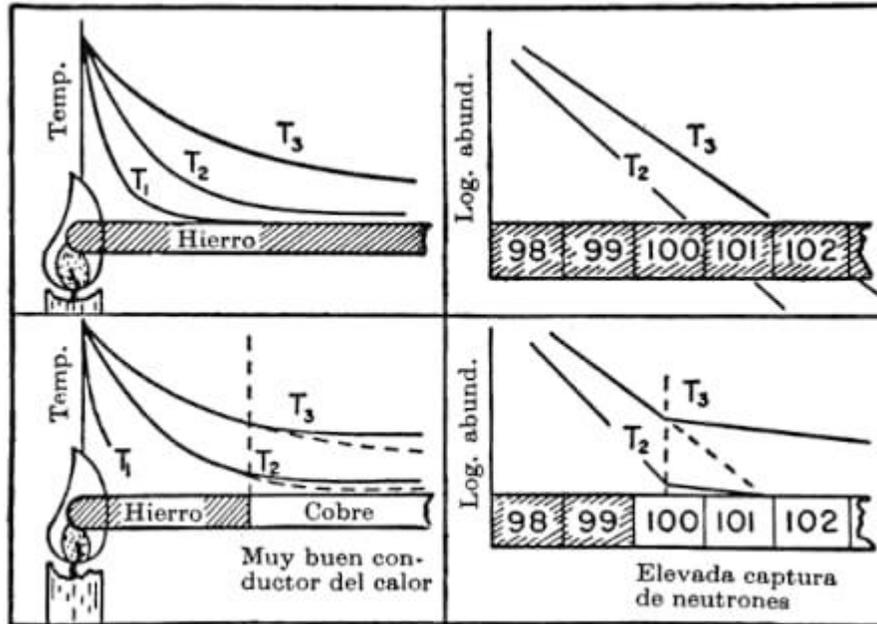


Figura 12. Analogía entre la conducción calórica y el proceso de construcción nuclear.

El problema a que tenemos que hacer frente aquí, aunque más dificultoso, es muy parecido al de la conducción de calor a lo largo de una barra térmicamente aislada y calentada por un extremo. También en este problema el aumento de la temperatura en cualquier sección de la barra es la diferencia entre el calor que entra por la izquierda y el que sale por la derecha. Y, por una divertida coincidencia, el coeficiente de conducción calorífica en la barraproblema se expresa corrientemente por la misma letra griega σ que designa la sección transversal de captura de neutrones en nuestro problema nuclear. Esta analogía está representada en la

figura 12. Si la barra está constituida por material homogéneo (por ejemplo, hierro), de tal manera que el coeficiente calorífico de conducción κ es el mismo a todo lo largo de su longitud, la distribución de la temperatura a lo largo de la barra tomada en tiempos distintos a partir de aquel en el que se empezó a calentar, estará representada por las curvas exponenciales que aparecen en la figura. Si las probabilidades de la captura neutrónica (sección transversal de captura σ) fueran las mismas para el núcleo de todos los átomos pesados, el proceso constructivo sería también la causa del decrecimiento exponencial de la curva de las abundancias relativas conforme al peso atómico. Esto explicaría la parte descendente de la curva empírica de las abundancias (figura 6), pero no la casi horizontalidad en la región de los elementos más pesados. Es fácil ver, sin embargo, que la parte plana de la curva se puede obtener si se admite que σ crece de izquierda a derecha. En realidad, si consideramos una barra metálica mitad hierro y mitad cobre (que es mejor conductor del calor que el hierro), con el extremo de hierro en la llama, esperaríamos tener un gradiente de temperatura excesiva en la parte de hierro, y una distribución de temperatura mucho más uniforme en la parte de cobre, donde el calor fluye mucho más fácilmente. En forma parecida, podríamos esperar obtener la continuación horizontal de la curva de abundancias en la región de los elementos pesados, si la probabilidad de la captura neutrónica σ fuera mayor para los núcleos más pesados que para los más ligeros. Y he aquí que esto es precisamente lo que ocurre, como se muestra en la figura 13, que

representa las secciones transversales de capturas neutrónicas medidas en varios elementos para energías neutrónicas en las vecindades del millón de electronvoltios (correspondiente a 100 millones de grados). La teoría de la construcción atómica basada en el proceso de sucesivas capturas neutrónicas promete, según todo esto, dar una correcta explicación de la curva empírica de las abundancias.

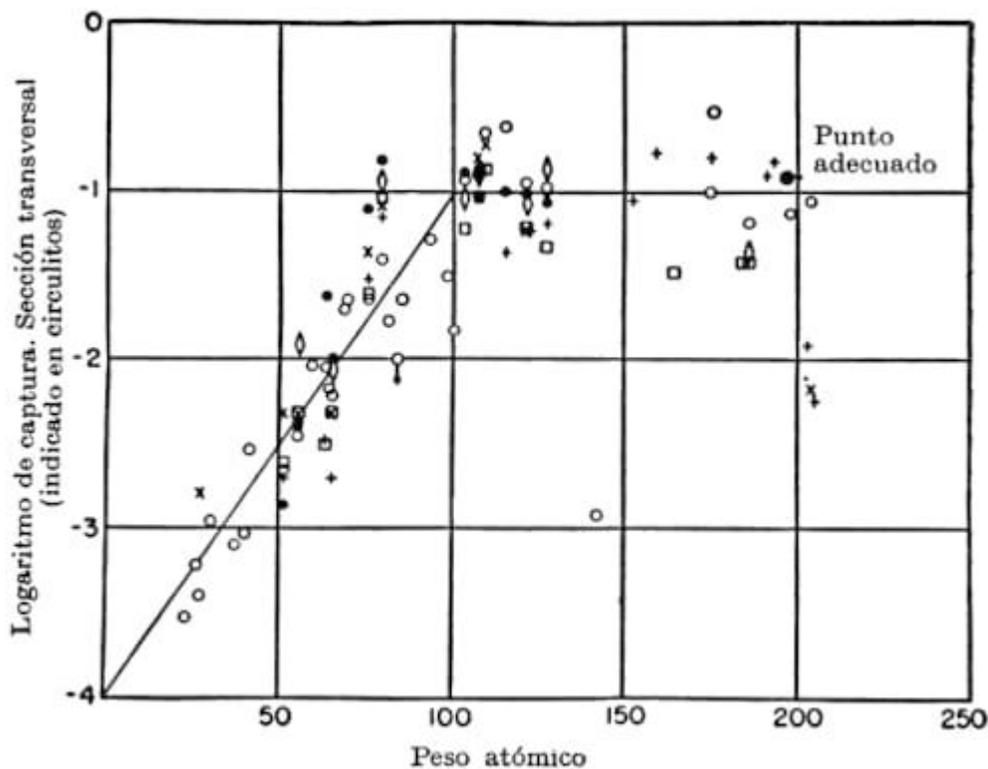


Figura 13. Sección transversal de captura, o probabilidad de ser capturados los neutrones de energía de alrededor de un millón de electronvoltios, en función de los pesos atómicos de los elementos que van a la captura. La línea continua es un promedio aceptado como base para ulteriores cálculos.

Antes de examinar los resultados de la integración de las ecuaciones para tal construcción atómica, queremos señalar una coincidencia puramente empírica que existe entre las secciones transversales de capturas neutrónicas mostradas en la figura 13 y las abundancias de las especies atómicas señaladas en la figura 6. Si, combinando estas dos curvas, expresamos los logaritmos de las abundancias directamente observadas en función de las secciones transversales medidas, alcanzaremos el resultado indicado por los circulitos de la figura 14. Podemos observar que los círculos se sitúan muy aproximadamente en una línea recta, indicando una relación sencilla entre las dos cantidades. Las cruces de la figura 14 indican una comparación entre las abundancias relativas conocidas de los distintos elementos químicos y sus precios corrientes en el mercado, según aparecen en el catálogo de una gran firma comercial de productos químicos. En este caso, los puntos están esparcidos mucho más que regularmente por todo el campo, indicando que los precios corrientes de los elementos puros están determinados no tanto por su abundancia o su variedad en la naturaleza como por su utilidad industrial y las facilidades que existen para extraerlos de la tierra y purificarlos.

La actual integración de las ecuaciones de la formación atómica fue realizada primero por Ralph Alpher.²¹

²¹ Los resultados de estos cálculos fueron anunciados, en primer término, en una comunicación a *The Physical Review*, del 1 de abril de 1948. Estaba firmada por Alpher, Bethe y Gamow, y a menudo se habla de ella como del *artículo alfabético*. Parecía injusto para el alfabeto griego tener el artículo firmado por Alpher y Gamow, solamente, y por eso fue agregado el nombre del doctor A. Bethe (*in absentia*) al preparar el manuscrito para la imprenta. El doctor Bethe, que recibió una copia del manuscrito, no lo objetó y en realidad fue de mucha ayuda en las subsiguientes discusiones. Sin embargo, circuló el rumor de que cuando, después, la teoría

El perfecto ajuste de la curva calculada y las abundancias observadas se muestran en la figura 15, que representa los resultados de los últimos cálculos llevados a cabo en el computador electrónico de la National Bureau of Standards por Ralph Alpher y R. C. Herman, quien no quiso de ninguna manera cambiar su nombre por el de Delter. Es evidente que las dos curvas superiores señaladas $10_{\rho_{ST}}$ y $7_{\rho_{ST}}$, preparan elementos pesados, mientras que la curva señalada $b_{\rho_{ST}}$, difícilmente los destruye. Se alcanza un ajuste bastante bueno en la curva $5_{\rho_{ST}}$, y probablemente se obtendrían mejores resultados si se calculase la curva $4_{\rho_{ST}}$ —. Para obtener la curva satisfactoria, el valor que debe darse a la constante en la fórmula de la densidad del capítulo II debe ser de $1,2 \times 10^{-3}$ gramos por centímetro cúbico.

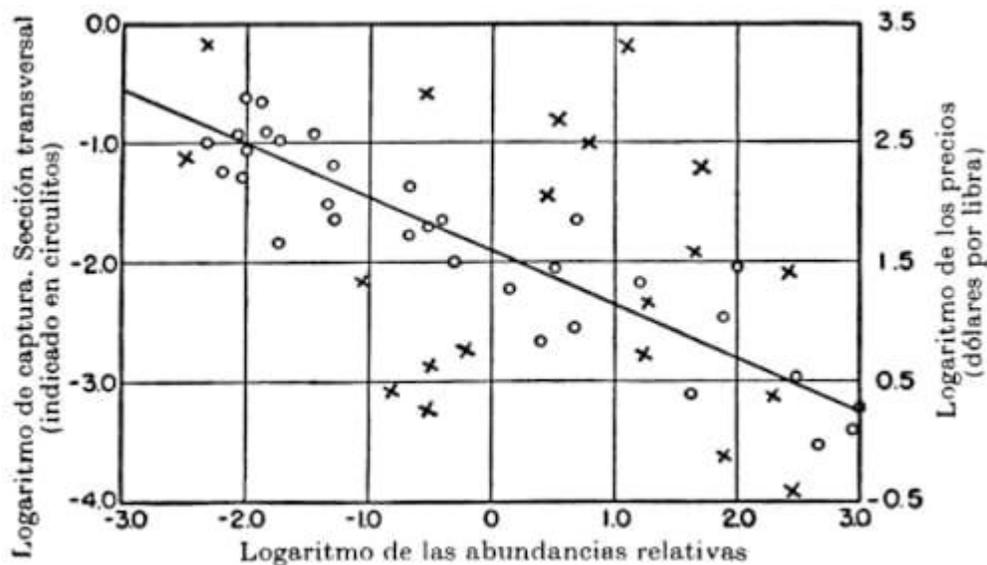


Figura 14. Correlación entre las abundancias relativas de elementos químicos, por un lado, y sección transversal de captura (circulitos) y

alfabética chocó temporalmente contra los escollos, el doctor Bethe consideró seriamente el cambio de su nombre por el de Zacharias.

precios comerciales por libra (cruces), por otro. Existe una buena correspondencia entre las abundancias y las secciones transversales de captura, pero muy pobre entre las abundancias y los precios.

Aparte de proporcionamos una representación bastante buena de la tendencia general de la curva de las abundancias, podemos observar aquí que la teoría también explica algunos detalles característicos que conciernen a la abundancia de ciertos elementos. Unos cuantos grupos de elementos poseen unas abundancias elevadas anormales y originan así máximos agudos que se elevan sobre la curva, por lo general suave (figura 6).

Si observamos la situación más cuidadosamente, encontramos que estas abundancias elevadas anormales (con la única excepción de un máximo agudo próximo al hierro) corresponden a las especies nucleares con un *número mágico*, bien de neutrones, bien de protones. En física nuclear los *números mágicos*, que son 2, 8, 20, 50, 82, 126, desempeñan el mismo papel que los números 2, 8, 18 en química ordinaria.



*Lámina VI. Cúmulo de galaxias poco brillantes en la Corona Boreal.
Las galaxias pueden ser reconocidas por su figura fusiforme; los
puntos representan estrellas.*

Representan el número de partículas dentro del núcleo que constituyen un anillo completo en su estructura interna. Así como en la química los átomos que tienen completados los anillos electrónicos (helio, argón, neón, etc.) son muy estables y químicamente inertes, también en el núcleo los *números mágicos*, ya sean de protones, ya de neutrones, son considerablemente menos eficaces en la captura de nuevas partículas, lo que es igual que decir que sus secciones transversales de captura son anormalmente

pequeñas. Evidentemente, los núcleos con tan pequeñas secciones transversales de captura deben presentar un estrangulamiento en el proceso continuo de construcción atómica, y de tal modo que el material se debe estar acumulando cerca de estos estrangulamientos en proporciones anormalmente altas. Este argumento parece que prueba la interpretación satisfactoria de las abundancias anormales observadas en las vecindades del núcleo con *número mágico*, pero sólo sirve para señalar que también puede esperarse que los núcleos con anillos estructurales completos posean enlaces con energías anormalmente altas, y por ello las abundancias anormales podrían explicarse asimismo en el marco de la teoría del equilibrio, con tal que esta teoría fuera capaz de representar correctamente la forma general de la curva empírica de las abundancias.

Un detalle de los datos empíricos de la abundancia que no puede ser satisfactoriamente explicado por el proceso constructivo de los átomos es la existencia de los llamados *isótopos protegidos*.

Estos son especies nucleares estables que no se habrían formado por varias transformaciones β sucesivas a partir del núcleo originalmente radiactivo, porque algunas de estas transformaciones necesitarían mayores cantidades de energía de las que son utilizables en el núcleo.

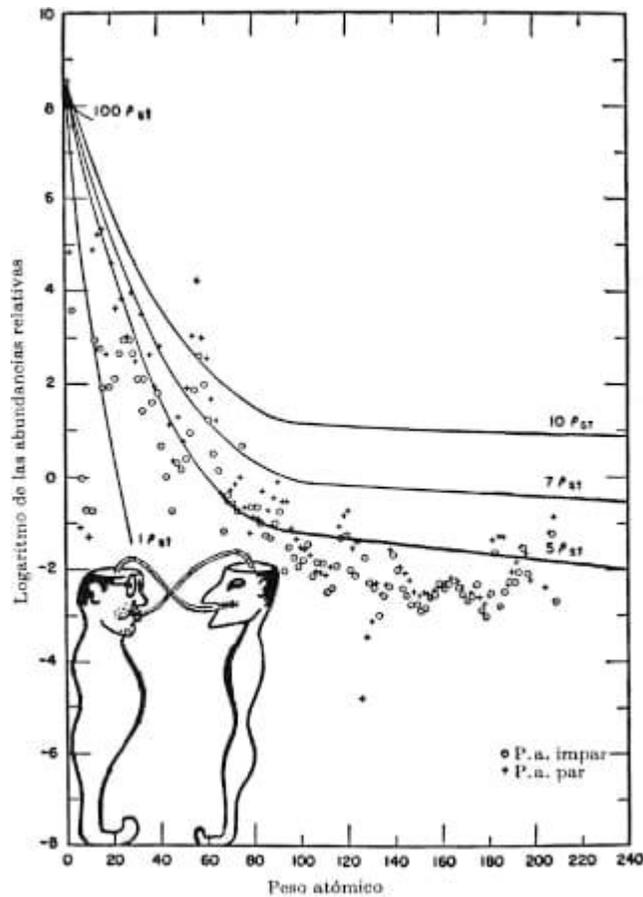


Figura 15. Curvas de cálculo de las abundancias, según Ralph Alpher (a la izquierda) y R. C. Hermán (a la derecha).

Puesto que, de acuerdo con la teoría clásica del hilen, todos los núcleos son construidos primero con un exceso de neutrones y alcanzan su estado normal solamente más tarde, por una serie de transformaciones B sucesivas, tales isótopos protegidos no se podrían producir de ninguna manera. No obstante, estos isótopos protegidos existen en la naturaleza. Parece existir la posibilidad de que se produjeran por el llamado *proceso n, 2n*, en el cual un neutrón penetrante rápido producido en alguna reacción previa

golpea a dos neutrones del núcleo con el que choca. Sin embargo, este problema precisa ser estudiado más adelante.

§. El caso de los elementos ligeros

Los cálculos que acabamos de exponer nos dan una idea general de la formación de los átomos mediante el proceso de sucesivas capturas neutrónicas. Con objeto de que este problema pueda ser formulado de modo que podamos llevarlo al análisis matemático, fue suavizada la curva empírica de las secciones transversales de captura, y no se tomó en consideración ningún proceso, excepto este de la captura neutrónica. Otro método de enfocar el problema sería el de considerar solamente los núcleos más ligeros, pero realizar los cálculos lo más detalladamente posible. Esto fue lo intentado en primer lugar por el autor de este libro, y más tarde, con mucho más detalle, por Enrico Fermi y Anthony Turkevich. Estos científicos hicieron una descripción *punto por punto* de lo que debía haber sucedido en los seis núcleos más sencillos (neutrones, protones, deuterones, tritones, partículas tralfio y partículas alfa) durante los primeros treinta y cinco minutos de la expansión del hilen.

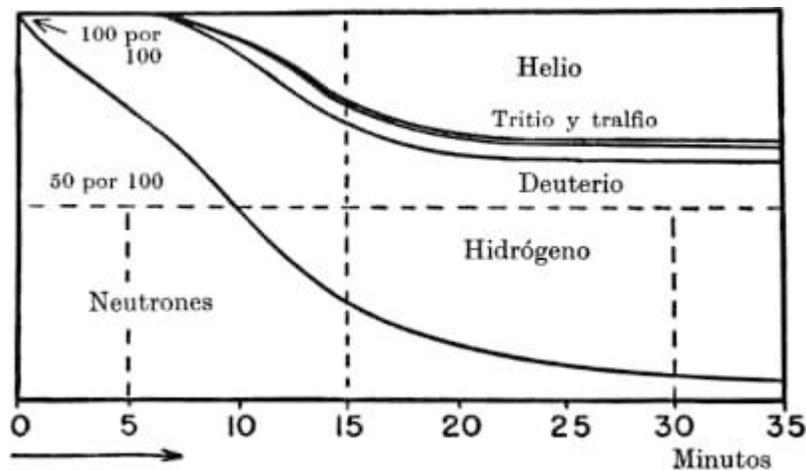


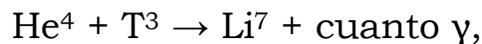
Figura 16. Cambios químicos en el universo durante su primera media hora, según Enrico Fermi y Anthony Turkevich.

Debido a los bajos números atómicos de estos núcleos, se producirían también otras reacciones posibles entre las partículas cargadas de electricidad, pudiéndose considerar en su conjunto hasta veintiocho tipos diferentes de procesos nucleares; en la figura 16 se muestran los resultados de los cálculos hechos para una densidad constante de 10^{-3} gramos por centímetro cúbico y admitiendo un contenido neutrónico del 100 por 100 al principio. Observamos que durante los primeros cinco minutos la temperatura del universo era todavía demasiado alta para permitir que se formasen núcleos complejos, y por tanto, el único proceso nuclear desarrollado en aquel período fue la desintegración espontánea de los neutrones en protones y electrones. Con el descenso posterior de la temperatura, los neutrones y los protones empezaron a agruparse formando núcleos de deuterio, los cuales, sin embargo, nunca se acumularon en grandes cantidades porque se transformaban rápidamente en helio corriente. Como se señala en el diagrama, el

tritio (H^3) y el tralfio (He^3) sirven como etapas de transición de la masa 2 a la masa 4; están siempre presentes en cantidades extremadamente pequeñas. Vemos que hacia el final de los primeros treinta minutos, poco más de la mitad de todo el hilen original se convirtió en hidrógeno, y poco menos de la otra mitad se transformó en helio. Ésta es la relación exacta en la que se encuentran en el universo hoy estos dos gases. También observamos que por aquella época los neutrones originales se habían desintegrado casi por completo y el deuterio constituía alrededor del 1 por 100 de la masa total. La última conclusión no corresponde, desde luego, a la realidad física de hoy (el deuterio es en la actualidad rarísimo en la naturaleza), y esto proviene de que los cálculos no se prosiguieron tras el proceso de construcción del helio. En realidad, la mayor parte del deuterio formado de esta manera debe de haberse consumido en el proceso de construcción de los átomos más pesados.

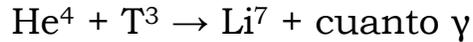
A pesar de su éxito inicial, Fermi y Turkevich tropezaron con serias dificultades cuando intentaron llevar estos cálculos más allá del proceso de construcción del helio. El inconveniente está en el hecho de que el núcleo de masa 5, que sería el próximo escalón, no es utilizable. Debido a alguna interacción peculiar de fuerzas nucleares, ningún protón ni neutrón sencillo puede estar rígidamente ligado al núcleo del helio, y por esto el próximo núcleo estable es el de la masa 6 (el isótopo más ligero del litio), que contiene dos partículas extra. Por otra parte, en las condiciones físicas supuestas, la probabilidad de que dos partículas sean

capturadas por el núcleo del helio simultáneamente es muy pequeña, y el proceso constructivo parece ser que se detiene pronto en este punto. Se han sugerido varias ideas al objeto de poder salvar este bache y continuar nuestra ascensión en el sistema periódico de los elementos. En sus estudios originales, Fermi y Turkevich consideraron la reacción



que no implica un núcleo intermedio de masa 5. Encontraron, sin embargo, que en las condiciones existentes de densidad y temperatura, esta reacción parece ser demasiado lenta para proporcionar una cantidad suficiente de núcleos más pesados. Podría ser considerablemente acelerada la reacción por la presencia de una resonancia fuerte (como la que se obtiene en las proximidades de los 400 kiloelectronvoltios), pero no se han hallado indicaciones sobre tal resonancia en los estudios experimentales hechos sobre el núcleo del Li^7 .

Wigner propuso otro método ingenioso para salvar la brecha de la masa 5. Es conocido por el método del *punte de la cadena nuclear*. La figura 17, que ilustra el plan de Wigner, muestra que todo lo que se necesita para construir un puente de cadena es suponer que en un principio existió un núcleo sencillo a la derecha de la hendidura; se puede aceptar con facilidad tal hipótesis, porque algo de construcción queda a través de la brecha mediante la reacción



a pesar de la pequeña posibilidad de que esto ocurra. Ese núcleo único del lado derecho de la hendidura (C^{11} en el dibujo) puede unirse con otro núcleo de la parte izquierda (T^3 en el dibujo) dando lugar a la formación de dos núcleos ligeros (Li^6 y Be^7), los cuales se hallan ambos en el lado derecho. Por el proceso regular de captura neutrónica, estos dos núcleos pueden ser transformados en un par de núcleos iguales a los núcleos admitidos en un principio (C^{11}), y el proceso empieza de nuevo con doble volumen. Después de cierto número de tales ramificaciones, se habrá transformado una gran cantidad de núcleos para participar en el proceso, y el paso de la masa a través de la hendidura se llevará a cabo a una velocidad normal. Desgraciadamente, la reacción particular empleada en la figura 17 para ilustrar la idea de Wigner no es precisamente a propósito para este empeño, por lo que debería encontrarse otra semejante que la reemplazase. Hasta el presente no ha sido hallada tal reacción, aunque esto puede ser debido simplemente a una deficiencia nuestra de información sobre los distintos isótopos que pueden intervenir en este proceso.

Es también muy posible que la dificultad de la hendidura de masa 5 pueda salvarse sin ningún artificio especial con sólo considerar simplemente las reacciones termonucleares de alguna manera más detallada de como se ha hecho hasta este momento. En todos os cálculos anteriores se ha supuesto tácitamente que la temperatura del gas nuclear siempre permanece igual a la temperatura de

radiación, como aparece en la fórmula última del capítulo II. Sin embargo, todas las reacciones nucleares que entran en los procesos de formación están relacionadas con la liberación de cantidades considerables de energía nuclear.

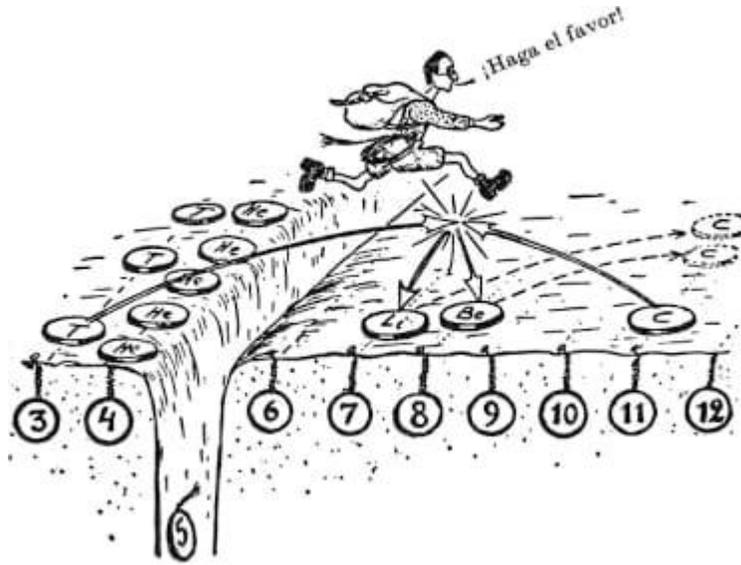
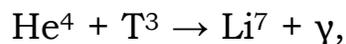


Figura 17. Proposición de Wigner para salvar el obstáculo de la masa 5.

Esto facilita la posibilidad de que *el gas nuclear que reacciona pueda llegar a tener una temperatura mayor que la radiación en el que está sumergido*. En efecto, mientras la temperatura de radiación va disminuyendo, la temperatura del gas nuclear puede ir aumentando, alcanzando valores bastante grandes antes de que esta última empiece también a descender. Esta elevación temporal de la temperatura del gas no afectará en gran proporción a los resultados de los cálculos de Alpher y de Herman que aparecen en la figura 15, puesto que la probabilidad de la captura neutrónica

por el núcleo más pesado no es muy sensible a la temperatura. A pesar de todo, la elevación de la temperatura del gas acelerará de una manera muy considerable todas las reacciones termonucleares entre los elementos ligeros y puede en realidad cambiar radicalmente los resultados de los cálculos llevados a cabo por Fermi y Turkevich. En particular, esta temperatura más alta del gas favorecerá fuertemente la reacción



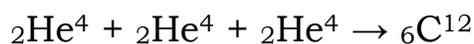
y ello puede determinar la producción de cantidades adecuadas de litio y otros elementos más pesados.

Desgraciadamente, los cálculos que se relacionan con el autocalentamiento de los gases de las reacciones nucleares son tremendamente complicados y sólo pueden realizarse por medio de los modernos computadores electrónicos. Arthur Carson, alumno del autor de este libro, está haciendo los preparativos para tales cálculos, pero quizá pueda pasar algún tiempo antes de que éstos permitan cualquier conclusión definitiva.

Resumiendo estas reflexiones algo extensas, podemos decir que, aun con la idea de que la teoría del hilen sobre el origen de las especies atómicas no es en modo alguno completa, proporciona, no obstante, un cuadro razonablemente satisfactorio de lo que pudo haber ocurrido durante las primeras etapas en la historia de nuestro universo.

§. ¿Pueden formarse elementos pesados en las estrellas?

Otra posibilidad contemplada por Hoyle y otros es la de que en el interior de las estrellas puedan formarse elementos pesados. Como se ve en el capítulo V, en las estrellas normales, como nuestro Sol o Sirio, la producción de energía se debe a un lento proceso termonuclear en el cual el hidrógeno se transforma gradualmente en helio. Sin embargo, una temperatura de unos 20 millones de grados, que es la que causa esta reacción nuclear, no es lo suficientemente elevada para inducir reacciones entre núcleos más pesados y producir así elementos pesados en cantidades apreciables. Pero cuando una estrella agota su hidrógeno, que es la principal fuente de energía estelar, pasa por una serie de estados en los que su densidad y temperatura central aumentan hasta alcanzar valores considerablemente superiores. E. Salpeter ha demostrado que en dichas circunstancias tienen lugar reacciones más complejas, tales como:



Esta gradual formación de elementos de peso cada vez mayor se sucede hasta llegar al hierro, cuyos núcleos son los que poseen la máxima estabilidad. El salto que existe entre el hierro y el uranio es

más difícil de efectuar y exige la presencia de neutrones, que son producidos por las reacciones que tienen lugar entre los elementos más ligeros. Al llegar a la fase final de su evolución, las estrellas sufren un desequilibrio interno y explotan violentamente (explosiones de supernovas) dispersando su materia por el espacio interestelar. Esta materia puede a veces volver a condensarse formando estrellas de «segunda mano» con grandes cantidades de elementos pesados. Según este punto de vista, nuestro Sol es una de esas estrellas de segunda mano, pues está formado por la materia diseminada por una de las varias supernovas que explotaron hace miles de millones de años.

Es posible que tanto la teoría del hilen, ya descrita en este mismo capítulo, como la teoría según la cual las estrellas al envejecer y explotar producen elementos pesados desempeñen funciones igualmente importantes en la vida del universo. Como ya se ha dicho en el capítulo II y volverá a verse en el IV, W. Baade descubrió dos clases de población estelar: la del tipo I, que se encuentra en los brazos espirales y aparece acompañada de gran cantidad de polvo y gas interestelares, y la del tipo II, que, ubicada en los cuerpos centrales de las galaxias, parece estar formada por estrellas carentes por completo de material interestelar.

Los estudios espectroscópicos llevados a cabo por M. Schwarzschild y otros indican que las estrellas del tipo I (a las que pertenece nuestro Sol) contienen elementos pesados en las mismas proporciones que se encuentran dentro del sistema solar. En cambio, las estrellas del tipo II están casi totalmente desprovistas de

elementos pesados, los cuales aparecen en ellas en proporción al menos cien veces menor que la que alcanzan en las estrellas del tipo L. Por ello es lícito pensar que las estrellas del tipo II se han formado a partir del material original producido durante la era de la gran compresión, mientras que las del tipo I han ido enriqueciéndose con la incorporación de elementos pesados liberados en los procesos de explosión de las supernovas. Pero sólo el tiempo dirá si esta afirmación corresponde a la verdad.

Capítulo IV

La jerarquía de las condensaciones

Contenido:

§. *Primeras nubes*

§. *Surgen las estrellas*

§. *Acumulaciones de galaxias y de estrellas*

§. *Sistemas planetarios*

§. Primeras nubes

Tras completar totalmente las especies atómicas que se habían formado durante la primera hora de expansión, nada de particular interés ocurrió en los siguientes treinta millones de años. El gas caliente constituido por los átomos recién formados continuó expansionándose, y gradualmente la temperatura fue descendiendo. Cuando ésta pasó de los billones de grados originales a tan sólo unos cuantos miles de grados, aquella porción de gas formada por vapores de varios elementos con altos puntos de fusión se condensó en forma de polvo fino que continuó flotando en la mezcla primitiva de hidrógeno y helio. Esta mezcla de gas y polvo (un miligramo de gas y varios microgramos de polvo por cada millón de kilómetros cúbicos de espacio) existe aún en el espacio interestelar, siendo causa de las llamadas líneas de absorción interestelar y del enrojecimiento de las estrellas más lejanas. Algunas veces este material interestelar se acumula en nubes gigantescas de formas irregulares, que se conocen como nebulosas luminosas o nebulosas oscuras, según estén iluminadas o no por las estrellas vecinas

(láminas IV y V); si este estado de cosas hubiera continuado indefinidamente, el universo de hoy no contendría nada que no fuera esta mezcla de gas y polvo muy diluida, con temperatura próxima al cero absoluto. Sabemos, no obstante, que ahora la materia del universo se halla grandemente diferenciada, formando galaxias, estrellas y planetas. ¿Cuándo y por qué se produjo esta diferenciación? La respuesta a este problema radica en la relación entre las densidades de la radiación y las densidades del gas estudiadas en los capítulos anteriores. Hemos visto que durante las etapas primitivas de la expansión la densidad-masa de la radiación contenida en cualquier volumen de espacio superaba con mucho a la densidad de la materia ordinaria. En este período la energía radiante era el agente rector de la evolución del universo; los átomos eran sacudidos con facilidad al chocar con los poderosos cuantos de luz; y como ésta, por su naturaleza radiante, había de ocupar el espacio uniformemente, la distribución de la materia ordinaria también hubo de ser realmente uniforme. Pero, como también hemos visto, la expansión del universo iba poco a poco disponiendo las cartas en favor de la materia, y hubo de llegar ocasión en que la masa-densidad de la energía radiante se situara por debajo de la densidad de la materia ordinaria. A partir de entonces la materia tomó sobre sí el papel directivo del proceso evolutivo, y es lógico suponer que el presente estado de alta diferenciación del material universal es el resultado de este cambio de dirección.

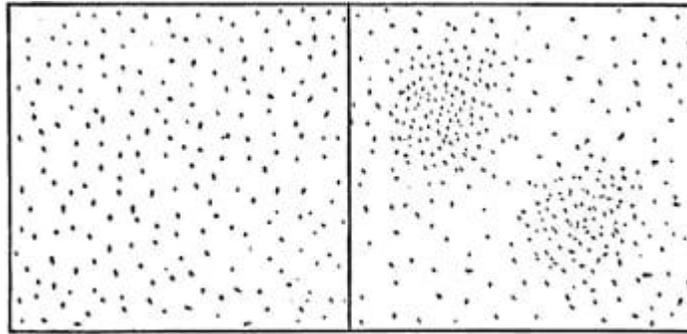


Figura 18. Condensación de puntos en una distribución originalmente uniforme.

Es difícil que nadie ponga en duda que el primer papel en lo acontecido cuando la materia se adueñó de todo fue representado por la fuerza de la gravedad newtoniana, actuando sobre las partículas materiales esparcidas casi uniformemente a través del espacio. Como demostró el famoso astrónomo británico James Jeans, hace casi medio siglo, un gas sometido a las fuerzas de gravitación y que llena un espacio ilimitado es intrínsecamente inestable y tiende a romperse en gigantescas nubes separadas (figura 18). Esta inestabilidad proviene del hecho de que las condensaciones locales embrionarias, que se formaron en aquel gas por causas puramente accidentales, se preservaron de una nueva disolución mediante la acción de las fuerzas gravitatorias. Tales condensaciones ocasionales ocurren en menor escala en el aire atmosférico ordinario, pero las fuerzas de la gravedad son demasiado débiles para mantenerlas unidas. Sin embargo, para mayores masas de gas, las fuerzas de la gravedad llegan a ser cada vez más importantes, y en las condensaciones en gran escala que se pueden formar en el espacio ilimitado, estas condensaciones no

serán capaces de disolverse otra vez por sí mismas. El resultado es que el gas se fragmenta en grandes nubes individuales con un vacío casi completo entre ellas.

El tamaño de estas condensaciones está determinado por la condición de que la fuerza potencial de la gravedad en su superficie debe ser mayor que la energía del movimiento térmico de las partículas gaseosas, de tal modo que, una vez constituida la condensación, las partículas que la forman no pueden escapar de su campo de gravedad. Éste es el mismo importante concepto de *velocidad de escape* que aplicamos antes al problema de la expansión ilimitada del sistema de las galaxias. Es fácil calcular²² los radios y masas de tales condensaciones en un gas originalmente uniforme, de densidad y temperatura dadas, mediante las fórmulas:

$$[\text{radio}] \geq 4,4 \times 10^7 \sqrt{([\text{temperatura}]/[\text{densidad}])} \text{ (centímetros)}$$

y

$$[\text{masa}] \geq \sqrt{(3,9 \times 10^{22})} \sqrt{([\text{temperatura}]^3/[\text{densidad}])} \text{ (gramos)}.$$

Si, por ejemplo, aplicamos estas fórmulas al aire atmosférico, empleando una temperatura de 300 grados absolutos y una densidad de 10^{-3} gramos por centímetro cúbico, obtendremos para el radio de las condensaciones el valor

²² Véase apéndice

$$2 \times 10^{10} \text{ cm} = 2 \times 10^5 \text{ km},$$

lo que es mucho mayor que el diámetro de la Tierra. Por esto nuestro aire atmosférico no se fracciona en bolas de aire, simplemente porque la capa atmosférica es demasiado delgada.

Tales limitaciones no existieron en el gas primitivo que ocupaba el espacio ilimitado del universo en expansión, y podemos calcular el tamaño de las masas de condensación que se formarían durante varias etapas de su evolución. Empleando la fórmula para los cambios en función del tiempo, de la temperatura y densidad en el universo en expansión²³ y sustituyéndolas luego en la expresión para la masa, encontramos que se elimina el factor tiempo. Así, la masa de las nubes gaseosas primitivas que se formaron en el proceso de fraccionamiento gravitatorio de un material uniforme en su origen, sería siempre la misma, sin que importe en qué etapa de la expansión se desarrolló este proceso de condensación. Sustituyendo por valores numéricos, hallamos que *la más pequeña cantidad posible de masa de estas condensaciones es de 10^{40} gramos*, lo que excede de la masa de nuestro Sol en varios millones de veces. Aunque la masa mínima calculada de las nubes de gas primitivo es más pequeña que los valores corrientemente aceptados para las masas de las galaxias individuales, el resultado es aún muy satisfactorio. En realidad, como los valores para la densidad y la temperatura empleados en nuestros cálculos se basaron en los datos puramente nucleares, podemos decir que tenemos aquí un

²³ Véase apéndice, fórmulas [5] y [6]

puente o, más bien, un viaducto que une el microcosmo de las partículas nucleares con el macrocosmos de los sistemas estelares. Se pueden alegar varias razones de por qué el valor calculado para la masa de las condensaciones resulta más corto que el observado para las masas galácticas. En primer lugar, nuestra fórmula nos da solamente la masa mínima, y las condensaciones actuales pueden haber sido fácilmente mucho mayores. Una segunda y mucho más importante razón radica en el hecho de que la fórmula original de Jeans empleada en nuestro cálculo es estrictamente aplicable sólo en el caso de un gas que no esté en expansión. Si, como ocurre realmente en este caso, se efectúa la expansión, se debe hacer la corrección para la energía cinética de las masas de gas que se expanden, y la masa mínima que se mantendría unida por la gravedad debe ser, con toda seguridad, considerablemente mayor. Estos y otros problemas esperan ulteriores estudios más detallados para su solución.

Aunque la masa de las nubes gaseosas primitivas que resultaron de la fragmentación de la distribución originalmente uniforme de la materia, se hizo independiente de la época de su formación, sus dimensiones geométricas dependen, sin duda alguna, de aquellas épocas. En efecto, las nubes formadas durante las etapas primeras de la expansión habrían sido más bien pequeñas y muy densas, mientras que las constituidas más tarde serían mucho mayores y más bien diluidas. El hecho observado de que las diferentes galaxias, aunque no sean iguales, no muestran diferencias

apreciables en sus diámetros, indica que debieron de tener todas, la misma fecha de formación aproximada.



Lámina VII. Estrella globular en el cúmulo de Hércules.

Y sólo es lógico suponer que la época de su formación coincidió con el tiempo en el que la materia sucedió a la energía radiante como factor decisivo y la fuerza de gravedad newtoniana se hizo de importancia fundamental. Podemos obtener la fecha de este acontecimiento suponiendo que, una vez formadas las nubes, su densidad continuó invariable y sólo cambiaron las distancias de unas a otras, creciendo con el tiempo. Como por las pruebas que

nos suministra la observación sabemos que el término medio de las distancias entre las galaxias vecinas es alrededor de un ciento de veces mayor que el de sus diámetros medios, debemos situar la era de la separación en poco más o menos a un centésimo de la edad presente del universo, y su fecha aproximada, cuando el universo tenía unos treinta millones de años. En aquellos tiempos la densidad media de la materia universal debe de haber sido igual a la densidad media dentro de las galaxias individuales, que es del orden de 10^{-24} gramos por centímetro cúbico. Por otra parte, empleando la fórmula para la variación de la temperatura que se da en el capítulo III, hallamos que a la edad de treinta millones de años, el universo tuvo una temperatura de alrededor de los 300 grados absolutos, en tanto que la densidad de la masa radiante era también de 10^{-24} gramos por centímetro cúbico.²⁴ Este resultado confirma nuestra idea de que la formación de las primeras nubes fue en la época en que la densidad masiva de la energía radiante estaba descendiendo por debajo de la densidad de la materia ordinaria.

Si pudiéramos tener en nuestras manos la *máquina del tiempo* de H. G. Wells y hacer retroceder aquél hasta el año 30 000 000 después de la creación, nos encontraríamos flotando en un vacío casi completo, comparable al que existe hoy en el espacio entre las estrellas en el interior de nuestra galaxia. A nuestro alrededor todo yacería oscuro como la pez, ya que el brillo tremendo de los

²⁴ En efecto,

$$(aT^4/c^2) = [10^{-14} \times (300)^4] / 10^{21} \approx 10^{-24} \text{ g/cm}^3$$

primeros días de la creación (comparable al centro de una explosión de bomba atómica) habría sido por entonces completamente oscurecido por el proceso de expansión, y las estrellas que hoy iluminan el universo no se habrían formado todavía. No obstante, dispondríamos de un calorcillo confortable, puesto que la temperatura media que prevalecía en aquella época era de unos 300 grados absolutos poco más o menos, próxima a lo que se puede llamar temperatura de habitación.

Antes de abandonar el tema de la formación de las protogalaxias gaseosas, debemos mencionar otro factor que indudablemente desempeñó un importante papel en su constitución. Como hemos visto en el capítulo II, la energía potencial de la gravedad newtoniana entre las galaxias de hoy ascendía sólo, poco más o menos, al 1 por 100 de su energía cinética de movimiento. En otras palabras, las galaxias están hoy completamente desvinculadas de sus atracciones gravitatorias mutuas. No obstante, echando una ojeada retrospectiva en el tiempo, hallamos que en la época de la separación galáctica, las distancias mutuas entre las galaxias eran tan sólo del 1 por 100 de las actuales, y consecuentemente sus mutuas energías gravitatorias debían haber sido cien veces mayores. Tenemos, pues, que en aquellos tiempos la mutua repulsión de las galaxias estaba todavía fuertemente entorpecida por su atracción recíproca de la gravedad. Esta situación es parecida a la de un cohete que tiene velocidad mayor que la de escape, pero que en el momento en que se considera, está todavía

trepando a través del campo gravitatorio de la Tierra y perdiendo velocidad durante esa marcha.

De este modo, el rompimiento en su origen y fraccionamiento subsiguiente del material del universo que se expandía de una manera uniforme, se produjo en cuanto este material cesó de ser «gravitatoriamente coherente».

Si la teoría de la separación galáctica es cierta, difícilmente puede existir duda de que este fenómeno tiene que haber estado estrechamente vinculado con la desaparición de la coherencia que presta la gravedad a las masas en expansión, así como con la pérdida del principal papel de la energía radiante.

§. Rotación galáctica y turbulencia

Cuando un volumen de material continuo se rompe violentamente en varios fragmentos, éstos se separan girando rápidamente como lo hacen las piezas de una granada de artillería que estalla en el aire. Partiendo de consideraciones basadas en la mecánica general, se puede esperar que la energía utilizable sea más o menos uniformemente distribuida entre los movimientos traslatorios y rotatorios de los fragmentos. Y en realidad sucede, como mostramos en los comienzos del capítulo II, que las energías rotatorias y de traslación de las galaxias son del mismo orden de magnitud.

En relación con el grado de rotación obtenido por varias protogalaxias durante el proceso de separación, sus cuerpos gaseosos deben de haber tenido diferentes formas. Los pocos de

ellos que por pura casualidad recibieran sólo cantidades pequeñísimas de energía rotatoria adoptarían forma aproximadamente esférica, mientras que otros tomarían figura de elipse, con más o menos grados de alargamiento, según su velocidad rotatoria (figura 19).

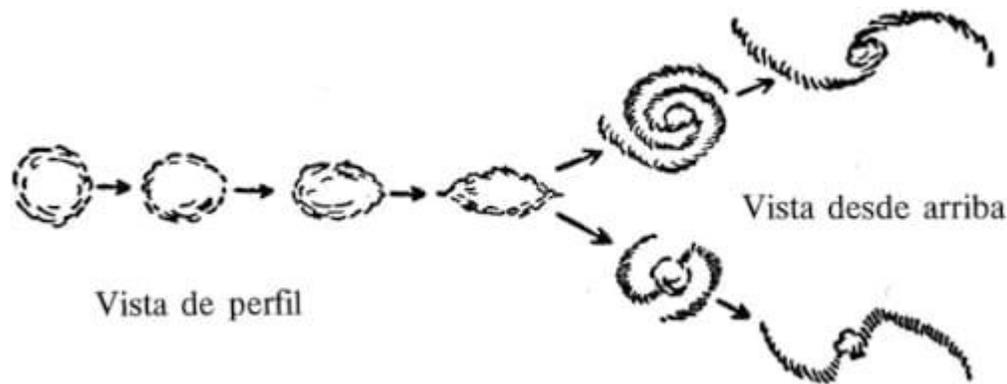


Figura 19. Clasificación de las formas de galaxias: esférica, elíptica, espiral ordinaria y espiral barrada.

Sin embargo, la mayoría de estos fragmentos originalmente gaseosos tuvieron tan altas velocidades de rotación que sus cuerpos se aplastaron en forma de lentes y empezó a fluir material por los bordes agudos para constituir el cuadro familiar de los brazos en espiral. A pesar de la gran cantidad de trabajos que se han realizado para comprender las diversas formas de brazos en espiral y los detalles sobre sus orígenes, nuestro conocimiento sobre tales problemas todavía dista mucho de ser completo. No obstante, recientes estudios indican que los brazos en espiral desempeñan en la estructura general de las galaxias un papel considerablemente menos importante de lo que se podría creer a primera vista. El

principal volumen del disco galáctico parece estar constituido por una multitud de estrellas que giran en órbitas regulares y circulares alrededor del centro de la galaxia, en tanto que los brazos están formados por corrientes de gas pulverulento muy diluido que son capturadas por la rotación general del sistema y arrolladas en forma de espirales (figura 20).



Figura 20. Formación de espirales en una galaxia. Los círculos representan el movimiento de las estrellas; la zona sombreada, gas y polvo.

Las protogalaxias originales estaban formadas enteramente por gas frío, sin ninguna estrella todavía. ¿Cómo aparecieron éstas? Para responder a esta pregunta debemos partir de la observación de que la rotación de las masas de gas que en un principio constituían las protogalaxias, no se efectuaría posiblemente de una manera suave y uniforme. Las masas gaseosas próximas al borde han debido de

tener una tendencia a rotar con menor velocidad angular, o sea con períodos de rotación más largos que las estrellas colocadas más en el interior. En nuestro sistema planetario, los períodos de rotación aumentan con las distancias suponiendo al Sol en el centro, alcanzando desde tres meses para Mercurio hasta ciento sesenta y cinco años para Neptuno. Pero mientras los planetas están separados por una gran porción de espacio vacío y no se estorban en sus movimientos, la situación en un disco rotatorio gaseoso será más parecida a la de un río rápido cerca de una curva. El flujo regular (laminar) del agua se ve forzado a fragmentarse en multitud de movimientos irregulares en pequeña escala y llevados todos por la corriente principal hacia adelante. Esta irregularidad del movimiento, que se conoce con el nombre de *turbulencia*, es un factor muy importante en todos los campos de la dinámica de los fluidos desde el diseño del ala de un avión a la explicación del origen de las estrellas y los planetas. Podemos ver el movimiento turbulento en la superficie de un río que fluye rápidamente cuando lo miramos desde un puente; de manera parecida podemos sentir esta turbulencia en nuestro rostro, azotado por rachas discontinuas de aire. La turbulencia en un medio fluido es un movimiento muy complejo y completamente desordenado, que no es fácil representar mediante un sencillo esquema o diagrama. Quizá la representación más aproximada de lo que es realmente la turbulencia nos la dé la figura 21, en la que las corrientes turbulentas individuales están representadas esquemáticamente por flechas de diferentes tamaños. Si observamos este diagrama desde cierta distancia, vemos primero

las flechas grandes como entrelazadas. Una observación más detenida nos mostrará, sin embargo, cómo las flechas grandes están constituidas por un gran número de otras más pequeñas, que a su vez se hallan formadas por otras de menor tamaño aún.



Figura 21. Jerarquía de los remolinos.

Extendido este cuadro en las dos direcciones, de tal manera que las flechas mayores sean casi tan grandes como el volumen total del fluido, y las menores casi tan pequeñas como las moléculas individuales, tendréis un reflejo bastante claro de lo que es realmente el movimiento turbulento. L. F. Richardson lo describe de forma elegante en estos versos:

*Grandes remolinos con pequeños remolinos,
que se alimentan de su velocidad;*

*y pequeños remolinos con remolinos más pequeños,
y así sucesivamente hasta la viscosidad.*

P

ara dibujar todo esto, las flechas de cada categoría se muestran en la figura 21 casi del mismo tamaño. En realidad, la jerarquía de las corrientes turbulentas igual incluye todos los tamaños de flechas que todas las direcciones del movimiento. El movimiento turbulento dentro de un fluido lo mismo incluye el movimiento rotatorio que los movimientos traslatorios de sus diferentes elementos, y debido precisamente a su tipo de movimiento rotatorio las corrientes turbulentas son conocidas, por lo común, con el nombre de *remolinos*. Sería falso pensar que los remolinos turbulentos mantienen su individualidad durante largo tiempo, permitiéndonos representar al movimiento turbulento, una vez dada la posición de los remolinos diferentes, en intervalos de tiempo adecuadamente escogidos. La realidad es que la vida del remolino individual es muy corta; corrientemente desaparece tras recorrer una distancia comparable a la de su propio diámetro, dando lugar a nuevos remolinos, que se pueden mover en una dirección por completo diferente. La presencia del movimiento turbulento en un fluido que se mueve, hace que éste aumente su fricción interna, conocida con el nombre de viscosidad turbulenta. Si, por ejemplo, la hélice de una lancha motora no fuese a producir más que un flujo laminar detrás de su popa, la lancha difícilmente sería impulsada, y se movería a paso de tortuga. Lo mismo podemos decir de la hélice de un avión; por otra parte, las alas deberían estar diseñadas para evitar el

movimiento de turbulencia de su superficie, permitiéndoles deslizarse a través del aire por la menor resistencia posible.

De una primera ojeada, parece imposible desarrollar una teoría de cierta consistencia sobre un movimiento tan complejo e irregular como el que presenta un flujo turbulento, y hasta muy recientemente, el estudio de la turbulencia fue llevado a cabo (la mayor parte de las veces con fines de ingeniería) sobre bases puramente empíricas. Pero durante los años recientes la teoría de la turbulencia se ha trasladado a bases estrictamente matemáticas, debido en gran parte a los trabajos de G. I. Taylor en Inglaterra, Theodore von Karman en los Estados Unidos, A. N. Kolmogoroff en Rusia y Werner Heisenberg en Alemania. Uno de los principales resultados de esta investigación fue la deducción del llamado *espectro de energía* del movimiento turbulento. El movimiento de los remolinos implica grandes cantidades de energía cinética, que está continuamente siendo transferida desde los remolinos mayores a los más pequeños, en todo el sistema que va desde el movimiento en gran escala del fluido, al movimiento molecular de las partículas que componen éste. Sabemos que en toda clase de fricción, la energía cinética del movimiento se transforma en calor; en el caso particular de la fricción turbulenta, esta transformación se lleva a cabo por medio de los remolinos en jerarquía, que van disminuyendo de tamaño. El problema que podemos plantear aquí es el siguiente: ¿Cuánta energía se almacena en los remolinos de diferente tamaño? (*¿cuál es su espectro de energía?*); o, en otras palabras, ¿cuáles son las velocidades de las distintas corrientes

irregulares que constituyen el movimiento turbulento? Consideraciones teóricas, demasiado complicadas para ser ni siquiera apuntadas aquí, permiten llegar a la conclusión de que la velocidad de distribución entre los remolinos de diferente tamaño se halla gobernada por la llamada ley de Kolmogoroff, que puede escribirse así:

$$[\text{velocidad}] \sim [\text{tamaño}]^{1/3}.$$

A menor tamaño de un remolino corresponde velocidad más pequeña. Imaginemos, por ejemplo, una gran corriente turbulenta de agua en un canal de 10 metros de ancho. Los remolinos de tamaño comparable a la anchura del canal tendrán velocidad comparable a la velocidad total del flujo. Los remolinos de un centímetro de diámetro tendrán una velocidad aproximada de una décima de esta velocidad: $(1.000)^{1/3}$, y los remolinos que tengan solamente diez micrones tendrán una centésima de la velocidad de la corriente principal.

Llegamos ahora a un problema muy importante: el de las condiciones en que un flujo laminar irregular de fluido se romperá en remolinos turbulentos. Estas condiciones fueron establecidas en forma puramente empírica por el físico británico Osborne Reynolds, quien estudió la corriente de varios líquidos a diferentes velocidades a través de tubos de diferentes diámetros. Halló que el flujo laminar regular de un líquido siempre se fragmenta en remolinos turbulentos cuando la velocidad de la corriente rebasa un cierto

límite, que es menor para los tubos más anchos y para los líquidos de viscosidad más pequeña. Estos hallazgos, que se ilustran en la figura 22, se pueden resumir mediante una sencilla fórmula empírica:

$$[\text{densidad del fluido}] \times [\text{velocidad de la corriente}] \times [\text{anchura de la corriente}] / [\text{viscosidad del fluido}] = R,$$

donde el coeficiente sin dimensiones R es conocido como el *número de Reynolds*.

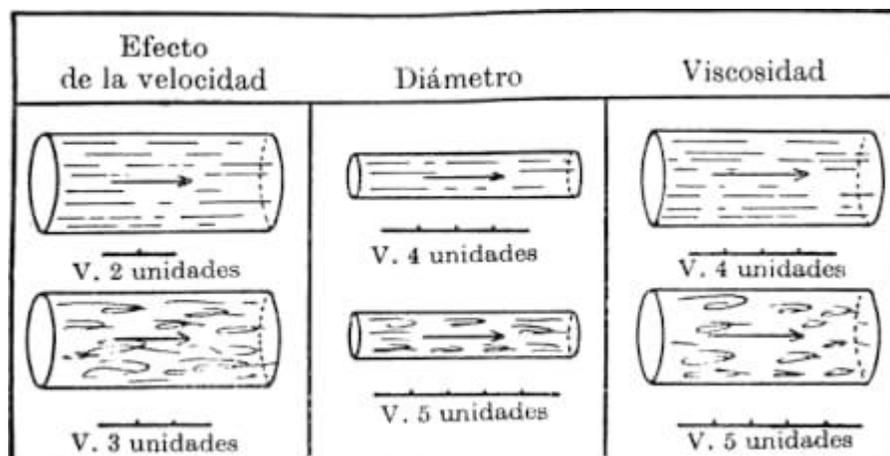


Figura 22. Transformación de una corriente laminar suave en remolinos turbulentos a través de un tubo. Para un diámetro y viscosidad dados, el movimiento turbulento aparecerá en cuanto la velocidad exceda de cierto límite (a la izquierda). Si el diámetro es muy pequeño (en el centro), o la viscosidad muy elevada (a la derecha), la aparición de la turbulencia se retrasará hasta que se alcancen velocidades más altas.

Si la densidad y viscosidad del fluido y la velocidad y anchura de la corriente son tales que el número definido por la ecuación anterior es menor que alrededor de 1.000, la corriente continuará siendo laminar; si el número es mayor que 1.000, aparecerá el movimiento turbulento. Werner Heisenberg, en un reciente trabajo, da el fundamento teórico de la condición empírica para la aparición del movimiento turbulento obtenida por Reynolds; pero de nuevo tenemos que renunciar aquí a describir tal teoría por ser demasiado complicada.

§. Surgen las estrellas

Podemos aplicar ahora el concepto del movimiento turbulento, al tratar de lo que debió de suceder en las protogalaxias gaseosas como resultado de su rotación, adoptando la tendencia de las ideas expuestas por el físico y cosmólogo, alemán Carl von Weizsäcker. Merced a la teoría cinética de los gases, se encuentra que la viscosidad gaseosa (o fricción interna) está dada por el producto de la densidad del gas, la velocidad térmica de las moléculas gaseosas y su recorrido libre entre los choques sucesivos. Incluyendo estos símbolos en la fórmula de Reynolds, obtendremos

$$R = [(velocidad\ de\ la\ corriente)/(velocidad\ de\ las\ moléculas)] \times [(anchura\ de\ la\ corriente)/(recorrido\ de\ las\ moléculas)]$$

Las diferencias de velocidad entre las distintas partes de las galaxias gaseosas que giraban debe haber sido, por lo menos, de 10

km por segundo, mientras que la velocidad térmica de las moléculas gaseosas a las bajas temperaturas que imperaban por aquellos tiempos, era desde luego de menos de 1 km por segundo. El recorrido libre medio de las moléculas en el gas muy diluido que formaban las galaxias primitivas debe de haber sido de 10^{16} cm. Sin embargo, esta distancia significa tan sólo la recorrida por una centésima parte de un año-luz y, por tanto, es sensiblemente pequeña en comparación con las dimensiones geométricas de las galaxias. Vemos, pues, que el número de Reynolds adquiere un valor demasiado grande, mucho mayor que el valor crítico 1 000, de tal manera que el

movimiento del gas en las protogalaxias primitivas debe de haber sido necesariamente turbulento, provocando la ruptura de aquél en remolinos de todos los tamaños.

El movimiento turbulento de los gases se distingue del de los líquidos ordinarios por el hecho de que los materiales gaseosos poseen un alto grado de compresibilidad, por lo que la jerarquía de los remolinos, empujándose y echándose los unos contra los otros, provocará una jerarquía de compresiones locales y temporales del material gaseoso. Estas compresiones locales son especialmente pronunciadas cuando las velocidades de la corriente son mayores que la velocidad del sonido en el material en cuestión (flujo supersónico), que es exactamente lo que acontece en este caso. En cualquier gas la velocidad del sonido es igual a la velocidad térmica de sus moléculas, y ya se ha comprobado que las velocidades del

flujo en las protogalaxias (así como en el del gas interestelar de hoy) fueron considerablemente mayores que la velocidad térmica del movimiento molecular.

Si no existieran las fuerzas de la gravitación, las condensaciones locales causadas por el movimiento turbulento se formarían y resolverían sin resultados permanentes de ninguna clase. Sin embargo, la presencia de la gravedad newtoniana impedirá la resolución de tales condensaciones, que llegarán a ser tan grandes como para satisfacer la opinión de Jeans sobre la inestabilidad gravitatoria. En lugar de expansionarse de nuevo y mezclarse con otras masas gaseosas, tales grandes condensaciones locales deben de haber continuado contrayéndose bajo su propio peso en esferas individuales de gas denso. Como resultado de la contracción, la temperatura de estas esferas gaseosas se eleva rápidamente y sus superficies calentadas empiezan a emitir primero rayos caloríficos y poco después otros de más corta longitud de onda que corresponden a la luz visible. En cierta etapa de su contracción, la temperatura central de estas protoestrellas alcanzó el *punto de ignición* de las reacciones termonucleares, y de este modo se puso en acción el poderoso manantial de la energía nuclear, quedándose las estrellas en el estado en que las conocemos actualmente. Todo este proceso de formación estelar no puede haber durado más allá de unos cuantos centenares de millones de años, es decir, una pequeña fracción de la presente edad del universo. Cuando este proceso concluyó, las en un principio frías y oscuras masas

gaseosas de las protogalaxias se transformaron en los familiares gusanos de brillantes estrellas.

Pero aun cuando esta transformación de las protogalaxias gaseosas originarias en las galaxias estelares de hoy ocurrió hace billones de años, las galaxias todavía conservan señales de su primera juventud. En efecto, sin la hipótesis de que en algún tiempo las galaxias estuvieran constituidas enteramente por gas, no podrían tener explicación sus actuales formas regulares de cuerpos fluidos que giran. Las estrellas que forman las galaxias actuales están esparcidas a través del espacio tan tenuemente que con dificultad puede haber alguna ocasión en la que el movimiento de una influya sobre la otra.

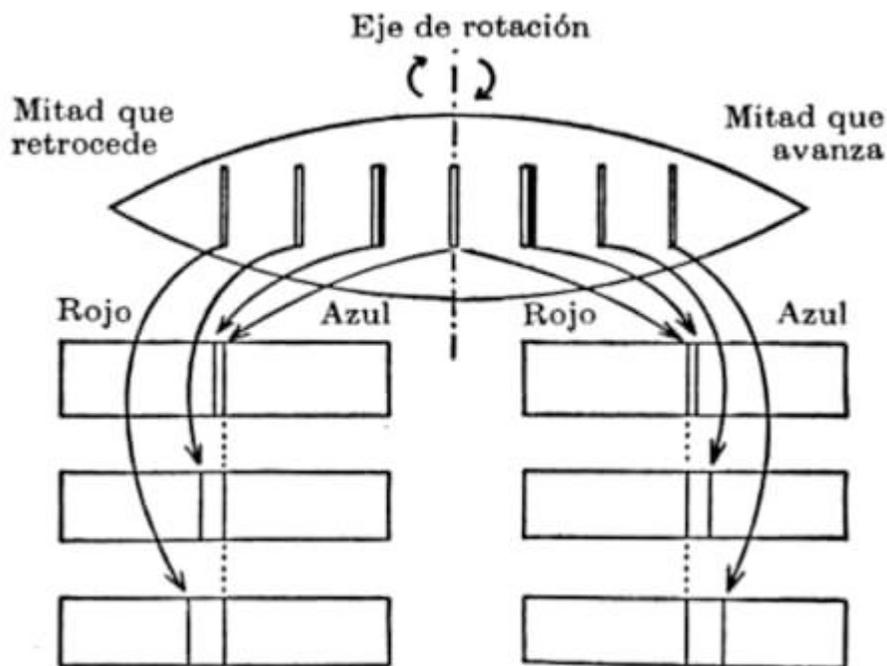


Figura 23. Método para probar espectroscópicamente que las galaxias elípticas giran como cuerpos rígidos. El corrimiento al rojo del efecto Doppler, a la izquierda; el azul, a la derecha.

Se ha calculado que durante la vida total de una galaxia han existido muy pocos casos de dos estrellas que se aproximen lo suficiente para desviarse en sus trayectos originales merced a las fuerzas de mutua atracción gravitatoria, y no ha existido probablemente ningún caso de choque frontal en la actualidad.

En tales circunstancias, los enjambres de estrellas que forman las galaxias nunca hubieran podido adquirir las formas elipsoidales regulares y habrían permanecido como nubes estelares irregulares y sin forma para siempre jamás. El hecho de que, con muy pocas excepciones, tales como las de las dos Nubes de Magallanes, las galaxias posean las formas regulares de los cuerpos fluidos en rotación, puede comprenderse sólo suponiendo que estas formas galácticas se originaron cuando las galaxias estaban todavía en estado gaseoso y que la configuración general no ha cambiado por la condensación de las masas gaseosas en estrellas. Podemos hablar de ellas como de *formas galácticas fosilizadas*, por analogía con los fósiles geológicos, tales como la madera petrificada, que conserva la forma exacta y la estructura de un organismo vivo, aunque los compuestos inorgánicos fueran sustituidos por el material original hace mucho tiempo.



Lámina VIII. Nebulosa anular de la Lira, ejemplo típico de nebulosa planetaria.

La teoría de las *formas fosilizadas* tiene considerable interés desde el punto de vista de la historia de la evolución galáctica. El autor de esta obra, aplicando dicha teoría en un trabajo en colaboración con G. Keller y J. Beltzer, consiguió explicar varios hechos desconcertantes. La teoría explica, por ejemplo, por qué los cuerpos centrales de las galaxias en espiral, así como los de las galaxias elípticas, parecen dar vueltas como los cuerpos rígidos, es decir, con velocidades lineales proporcionales a las distancias de los ejes de rotación. Este hecho fue establecido primero mediante la

observación, midiendo el corrimiento Doppler de la luz emitida desde las diferentes partes de las galaxias en rotación, como se muestra en la figura 23. La ranura de un espectrógrafo se colocó en diferentes posiciones a través de una galaxia elíptica vista de canto, y se midió el desplazamiento Doppler de una línea del espectro. En todos los casos, este corrimiento, que nos da la velocidad lineal de las masas galácticas a lo largo de la visual, fue directamente proporcional a la distancia desde los ejes. ¿Cómo pueden las galaxias, constituidas por estrellas que prácticamente no presentan interacción mutua, poseer una rotación igual a la de los cuerpos rígidos? La explicación de esta paradoja parte de la teoría de las *formas fosilizadas* que se ilustra en la figura 24. El grabado de a izquierda representa la protogalaxia gaseosa con un volumen de gas que se mueve a lo largo del resto de su cuerpo gaseoso en una órbita circular alrededor del centro. Cuando este volumen gaseoso, que ocupaba primitivamente varios años-luz cúbicos, se condensó en una estrella, la presión del gas restante no pudo soportar por más tiempo su masa, y la nueva estrella comenzó a caer hacia el centro con velocidad siempre creciente. Pasando cerca del centro a la máxima velocidad, retomó a su distancia original antes de hacer otra zambullida. De este modo, el movimiento circular original del volumen de gas diluido se hizo movimiento elíptico en la estrella recién nacida.²⁵ Cuando las masas de gas de las protogalaxias

²⁵ Como se muestra en la figura 24, la órbita elíptica de la estrella se mueve también alrededor del centro (precesión). Esto se debe a que, en contraste con nuestro sistema solar, el campo gravitatorio dentro de la galaxia no obedece a la ley de la inversa del cuadrado.

originales se estaban condensando rápidamente, debieron de estar «lloviendo» estrellas como antorchas a través de toda la galaxia.

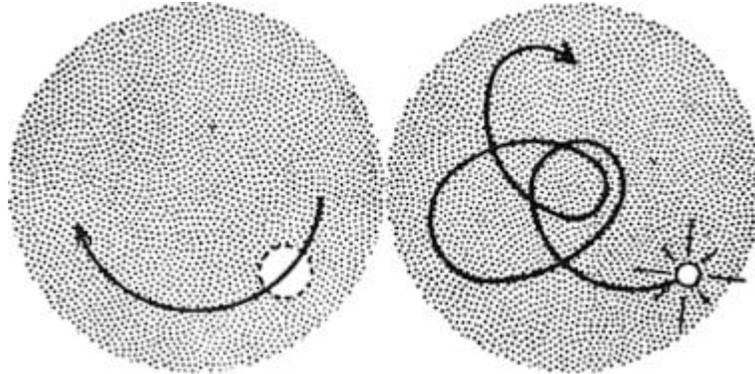


Figura 24. Lo que sucede cuando un gran volumen de gas perteneciente a una masa gaseosa giratoria se condensa para formar una estrella. Debido a que la estrella se hace mucho más densa que el gas de sus alrededores, describe la trayectoria elíptica de zambullida que se muestra a la derecha.

El proceso es actualmente comparable a la lluvia ordinaria originada por la condensación del vapor de agua atmosférico, salvo que las gotitas de lluvia son detenidas por la superficie de la Tierra, mientras que las gotitas de la lluvia estelar están destinadas a viajar eternamente por el espacio sin tropezar con ningún terreno sólido. Aun cuando estas estrellas «zambullentes» alcanzasen sus máximas elongaciones en sus vuelos, era de esperar siempre que poseyeran velocidades tangenciales iguales a las del volumen gaseoso primitivo de las que nacieron. Así, mediante la observación de la luz de las estrellas que llegan desde su lugar de nacimiento en la galaxia, medimos en la actualidad la *velocidad fosilizada* con la que la

protogalaxia gaseosa original estaba girando. Y es lógico esperar que la protogalaxia gaseosa estuviera girando ahora más o menos como los cuerpos rígidos.

§. Estrellas viejas y estrellas nuevas

Como hemos visto anteriormente, la mayoría de las estrellas parecen haberse formado casi de una manera simultánea durante el período primitivo de la evolución galáctica, aun cuando probablemente todavía, en pequeña escala, se está formando alguna estrella en los espacios interestelares. Pero si la formación de las estrellas fue tan fácil como indican las reseñas anteriores, ¿cómo es que no se condensó todo el gas de las protogalaxias en estrellas, dejando vacío y hueco el espacio interestelar?, ¿cómo es que existe todavía parte de polvo y gas en el espacio interestelar, tanto en nuestra propia galaxia como en las otras?

Permitidnos revisar primero unos cuantos hechos que se refieren a la distribución del material interestelar. Es verdad que en las proximidades de nuestro Sol, y en realidad en el volumen total de las espirales con brazos, existe una gran parte de gas y polvo que por alguna razón no se condensó en estrellas. Pero lo que es cierto para las espirales con brazos, no lo es para los principales cuerpos centrales de las galaxias en espiral, ni lo es para las galaxias esféricas y elípticas que no tienen ninguna clase de brazos. Recientes estudios, efectuados la mayor parte por Walter Baade de los Observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar, han llegado a la conclusión de que *existen dos tipos diferentes de población*

estelar, correspondientes a las dos partes diferentes de la estructura galáctica:

I. Los brazos espirales (incluidas las vecindades de nuestro Sol) contienen estrellas y material interestelar casi en la misma proporción. Existen grandes cantidades de enormes nubes de polvo y gas, como la gran nebulosa de Orión, y el espacio generalmente está tan polvoriento que no se puede ver desde una orilla a otra del disco galáctico. La población estelar de estas regiones está caracterizada por la presencia (si bien en pequeño número) de estrellas gigantes azules cuyo lapso vital es tan corto que deben de haberse formado, en comparación, en una época reciente, mucho más tarde que la masa principal de las estrellas. Ésta es la llamada *población estelar del tipo I*.

II. Los cuerpos centrales de las galaxias en espiral y todas las galaxias sin brazos están constituidos enteramente por estrellas, sin presencia de gas ni polvo. En estas regiones el espacio entre las estrellas está tan claro que se puede ver a su través— sin el más mínimo oscurecimiento. La población estelar de estas regiones limpias de polvo pertenecen a la *población estelar del tipo II* y parecen constituir el 100 por 100 del lote primitivo, sin advenedizas tales como las gigantes azules actuales que acabamos de mencionar.

En posesión de esta información, podemos ahora responder a una de nuestras preguntas anteriores diciendo que donde encontramos una población estelar de tipo II el proceso de la formación de estrellas continuó, al parecer, hasta que todo el material interestelar

se agotó por completo. Pero entonces, ¿qué pasa con el gas y el polvo todavía presentes dentro de la espiral con brazos? En la actualidad es difícil responder a esta pregunta, ya que ni siquiera sabemos cómo se originó este material ni cuánto tiempo ha permanecido allí.

Deberíamos mencionar aquí una interesante idea adelantada por Von Weizsäcker, porque por lo menos da una respuesta a una pregunta relacionada con esta cuestión: ¿Por qué el material interestelar que existe todavía en los brazos en espiral no se condensa en estrellas en igual elevada proporción que el otro material lo hizo durante la formación de estrellas en la era de hace billones de años? La respuesta parece ser la de que la formación de nuevas estrellas es impedida por la existencia de las otras que ya están allí. Para probar este punto empleamos de nuevo la fórmula de Jeans sobre la inestabilidad gravitatoria, dando a la densidad media del material interestelar el valor de 10^{-24} gramos por centímetro cúbico y a la masa de una gran estrella el valor 10^{34} o 10^{35} gramos, correspondientes de cinco a cincuenta veces la masa del Sol. De aquí deducimos que la temperatura del gas a la que estas condensaciones debieron producirse sería entre 1 y 5 grados absolutos. Pero sabemos que la temperatura que en la actualidad se mantiene en el espacio interestelar, merced a la radiación de las estrellas que existen ahora, anda por las proximidades de los 100 grados absolutos. ¡Luego las estrellas existentes impiden la condensación del material interestelar en nuevas estrellas porque lo calientan demasiado!

Otra cuestión es ésta: si el proceso que originó la formación del volumen primitivo de estrellas no se produce en la actualidad en los brazos en espiral, ¿cuál es el origen de las escasas estrellas azules gigantes en aquellas regiones? Existen dos teorías que tratan de explicar la formación de este número limitado de estrellas gigantes en las regiones pulverulentas de los brazos en espiral: una, propuesta por Fred Hoyle y R. A. Lyttleton, se basa en la llamada acreción de materia interestelar por las estrellas que se mueven a su través. Para comprender este proceso es mejor considerar que la estrella se encuentra en reposo e imaginar que el material interestelar pasa a su alrededor como una corriente que fluye (figura 25).

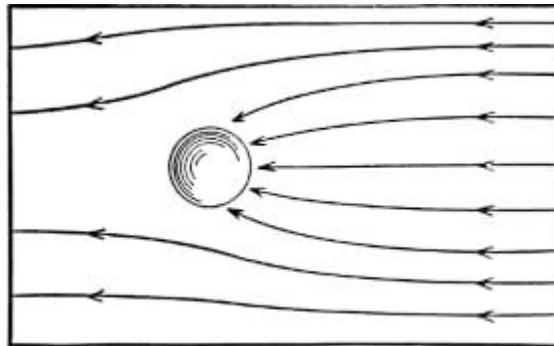


Figura 25. Acreción de materia interestelar, según Hoyle y Lyttleton.

Bajo la acción de las fuerzas gravitatorias, estas corrientes de material serán desviadas de su camino inicial y entrarán en la atmósfera de la estrella, aumentando la masa de ésta continuamente. Es fácil observar que cuanto más elevada sea la velocidad del gas que fluye (o, como sucede en la realidad, cuanto más alto sea el movimiento de la estrella a través del gas), será más

pequeña la cantidad de material que pueda ser desviado y finalmente capturado por la estrella. Cálculos exactos demuestran que una estrella de tamaño medio (comparable a nuestro Sol), que se moviese a la velocidad normal estelar de 10 km por segundo, aprehendería sólo una cantidad muy pequeña de material interestelar mediante este proceso de acreción. Tan pequeña sería la cantidad de material interestelar aprehendida, que ni aun durante intervalos de billones de años cambiaría la masa de la estrella en una extensión apreciable. Pero aunque el proceso de acreción de Hoyle y Lyttleton no parece tener mucha importancia en el esquema general de la evolución estelar, en especiales circunstancias puede tener algunas consecuencias interesantes. Si una estrella pasa a través de una nube de gas y polvo relativamente densa, o entra accidentalmente en una región donde su velocidad es casi igual a la velocidad del gas fluente (siendo relativamente pequeñas las velocidades tanto de la estrella como del gas), puede esta estrella aumentar rápidamente su tamaño original. Así, no es imposible que las estrellas gigantes azules de vida breve que se encuentran en los brazos en espiral sean en realidad viejas estrellas constituidas durante el proceso primitivo, pero que fueron rejuvenecidas por acreción de grandes cantidades de material adicional a partir de alguna nebulosa «gruesa» a través de la que pasaron recientemente. Otro proceso gracias al cual nuevas estrellas, realmente nuevas, se formarían en las circunstancias que en la actualidad existen en el espacio interestelar, fue sugerido por Lyman Spitzer y Fred L. Whipple. A pesar de que, como acabamos de ver, la presencia de

estrellas parece inhibir la formación de más estrellas mediante el proceso ordinario de condensación, el mecanismo sugerido por Spitzer y Whipple emplea la radiación de las estrellas actuales. Consideremos una partícula de polvo flotando libremente en el espacio interestelar; esta partícula es iluminada desde todos lados por las estrellas que forman la galaxia. Cuando la luz cae en la superficie de un cuerpo material (siendo reflejada o absorbida), se origina una fuerza que se conoce con el nombre de *presión luminosa*. Podemos visualizar esta fuerza como el resultado del bombardeo por multitud de cuantos de luz que, o bien rebotan hacia atrás, o bien son detenidos por la superficie a que embisten. Esta presión de la luz es muy débil cuando se consideran cuerpos de tamaño normal. Aun con la más brillante iluminación en una cancha de tenis, la presión de la luz que puedan experimentar las pelotas que van y vienen no afecta en absoluto al movimiento de éstas, y para demostrar la existencia de esta *presión luminosa* como una fuerza se necesita el empleo de equipos extrasensibles. No obstante, cuanto más pequeño sea el cuerpo, mayor es el efecto de esta presión, y este efecto no puede ser despreciado en las partículas de polvo interestelar que sólo tienen unos cuantos micrones de diámetro. Puesto que las partículas en el espacio interestelar son iluminadas aproximadamente igual por todos lados, el efecto de la luz se neutraliza corrientemente. Pero existirá también un efecto de *sombreado mutuo* que habrá que tener en cuenta. Si se consideran dos de tales partículas de polvo (figura 26) en el campo de la radiación isotrópica que proviene de las estrellas

de los alrededores, encontramos que cada partícula recibirá menos impactos por los cuantos luminosos que llegan desde la dirección en la que se halla la otra partícula, que por los que arriban en todas las otras direcciones a esta misma partícula. Como resultado de este sombreado mutuo, las dos partículas serán empujadas la una sobre la otra como si existiera en realidad una fuerza de atracción entre ellas. Es fácil demostrar que esta seudofuerza de atracción variará en razón inversa al cuadrado de la distancia entre las dos partículas, siendo similar en este sentido a la fuerza newtoniana de la gravedad.²⁶ Para partículas relativamente grandes, o sea de unos cuantos milímetros de diámetro, esta *gravedad de juguete* es muy pequeña, comparada con las verdaderas fuerzas gravitatorias. No obstante, para partículas muy pequeñas, la situación se invierte y las fuerzas de esta *gravedad de juguete* llegan a ser mucho más fuertes que las de la gravedad ordinaria. Éste es en la actualidad el caso para las partículas de polvo interestelar; de ahí que en el espacio interestelar estas fuerzas de radiación lanzarán al *polvo contra el polvo*, produciéndose su acumulación en grandes nubes. Una vez que se ha formado tal embrión de nube, llegará más polvo hacia ella, ya que todas las partículas de su vecindad estarán a su sombra con respecto a la luz de las estrellas colocadas al otro lado. Cuando la nube de polvo se hace lo suficientemente grande y

²⁶ Si σ es la sección transversal geométrica de las partículas y R la distancia entre ellas, el cono de la sombra corresponderá al ángulo sólido σ/R^2 . Si I es la densidad de la radiación total en el espacio, la fuerza que actúa en cada partícula será:

$$1/3I \times \sigma/4\pi R^2 \times \sigma = 1/12 \pi I \times \sigma^2/R^2,$$

que se puede comparar con la fuerza newtoniana, que es

$$G \times m^2/R^2.$$

pesada, comenzará a hacer sentir su atracción gravitatoria verdadera y a atraer al gas interestelar y a más polvo sobre sí misma, convirtiéndose finalmente en el núcleo de una nueva estrella en desarrollo. Detallados estudios de este mecanismo de formación estelar permiten llegar a la conclusión de que sólo funcionará con éxito bajo una serie de condiciones particulares que comúnmente se encuentran en su mayoría dentro de las nebulosas gigantes intergalácticas. Así es que la formación de nuevas estrellas por este camino constituirá más bien una excepción que la regla.

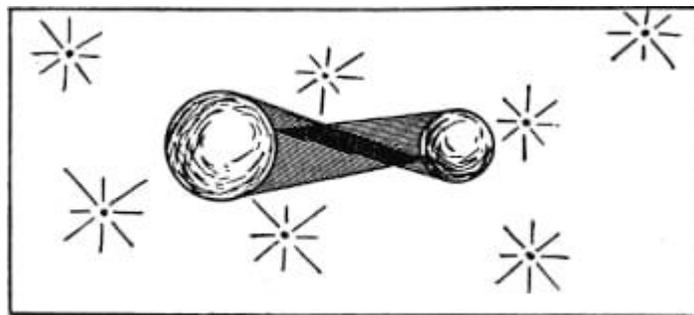


Figura 26. Proyección de sombras según Spitzer y Whipple.

Tanto la formación de nuevas estrellas por el método sugerido por Spitzer y Whipple como el rejuvenecimiento de las viejas de acuerdo con la teoría de Hoyle y Lyttleton tendrían que ser considerados como fenómenos poco corrientes en las circunstancias actuales. Y, en efecto, la observación muestra que tales estrellas recién nacidas son excepcionalmente raras dentro de nuestra galaxia.

§. Acumulaciones de galaxias y de estrellas

Como hemos visto anteriormente en este capítulo, deben de haber existido dos procesos fundamentales de diferenciación en la historia de nuestro universo: la ruptura original del gas primitivo en expansión uniforme en billones de galaxias separadas, y la condensación de este material dentro de cada una de las galaxias en billones de estrellas individuales. La observación muestra, no obstante, que, aparte de estos dos acontecimientos principales, deben de haber existido también otros menores y etapas intermedias.

La mayoría de las galaxias observables parecen haberse esparcido en el espacio más o menos al azar, pero existen numerosos casos de acumulaciones de galaxias en grupos que pueden contener algunos centenares de miembros galácticos individuales. Uno de los más próximos y más directamente estudiados cúmulos de galaxias pertenece a la constelación de la Virgen. Está situado solamente a ocho millones de años-luz de nuestro sistema y cubre la mayor parte del área celeste perteneciente a las constelaciones de la Virgen, la Cabellera de Berenice y el León. A esta distancia, la velocidad de alejamiento debida a la expansión del universo equivale tan sólo a 1 120 km por segundo, y como las velocidades fortuitas de las galaxias individuales que forman ese cúmulo alcanzan a veces a 2 400 km por segundo, muchos de sus miembros se mueven hacia nosotros, mostrando un corrimiento de las líneas espectrales hacia el azul. Éste es uno de los casos, ya mencionados, donde las velocidades casuales de los miembros individuales superan a la velocidad regular del alejamiento debida a la expansión. En efecto,

el cúmulo de la Virgen está tan cerca de nosotros que se ha suscitado la cuestión de si nuestro propio sistema de la Vía Láctea no podría considerarse como uno de sus miembros. Pertenezcamos o no a aquella gigantesca familia de galaxias, de lo que no hay duda es que el sistema de la Vía Láctea no es un lobo solitario en el espacio. En efecto, es un miembro del llamado *grupo local*, constituido por tres espirales (siendo una de ellas la nebulosa de Andrómeda), seis galaxias elípticas y cuatro irregulares o sin forma (incluyendo las Nubes de Magallanes, la Grande y la Pequeña).

Sólo conocemos un par de docenas de otros cúmulos de galaxias que contienen tantos miembros como el cúmulo de la Virgen (uno de ellos, localizado en la constelación de la Corona Boreal, aparece en la lámina VI), pero existen alrededor de un centenar de grupos menores similares a nuestro *grupo local*, y virtualmente miles de asociaciones todavía más pequeñas, a veces limitadas a ternos o pares de galaxias. Pero ¿cuál es la razón física de tales agrupaciones?

Existen dos caminos posibles mediante los cuales pueden haberse originado las asociaciones galácticas. Podemos suponer, como lo hace Von Weizsäcker, que el gas primitivo en un universo original en expansión no era tan homogéneo como hemos imaginado en nuestras anteriores consideraciones. Se podría realmente suponer que el proceso de la expansión regular llevaba aparejada cierta clase de turbulencia, y que el movimiento regular de las masas de gas era roto y disgregado en gran número de remolinos turbulentos de diferente tamaño. El tamaño normal de una galaxia correspondería,

de acuerdo con tal creencia, al tamaño menor de un remolino que pudiera sostenerse merced a su propia gravedad, y el proceso de la formación galáctica sería similar al que permite la formación de las estrellas en el interior de las galaxias individuales. Las acumulaciones de galaxias podrían considerarse entonces como el resultado de remolinos más grandes que existieron dentro del material gaseoso primitivo. La única parte que falla en tal explicación es que hemos postulado la existencia de la turbulencia en el material primitivo, en lugar de deducir esta turbulencia como una consecuencia natural del proceso de expansión. Tal postulado bien puede convertirse en la única manera de dar cuenta de la presencia del movimiento turbulento en etapas posteriores de la expansión.²⁷ Sería éste un caso en el que tendríamos que ceder en nuestras necesidades respecto a la simplicidad de las hipótesis iniciales.

Otra posible explicación de las acumulaciones de galaxias que se observan es la suposición de que en el momento de su origen estaban diseminadas caprichosamente por el espacio y que se agruparon en cúmulos en una fecha más tardía, bajo la acción de la gravedad mutua. El problema matemático que trata de la conducta en el tiempo de una multitud de puntos de gravitación originalmente esparcidos al azar por el espacio infinito, es extremadamente complicado. Fue abordado recientemente por S. Ulam, el cual fue capaz de demostrar que, en el caso de un modelo

²⁷ En la discusión previa tratamos de atribuir la turbulencia dentro de las protogalaxias a la rotación provocada por las irregularidades del proceso en expansión completamente homogéneo. Pero no es muy seguro que esta hipótesis resista al análisis matemático riguroso.

simplificado de una sola dimensión (con los puntos de gravitación distribuidos sobre una recta), se podría esperar la acumulación de puntos en grupos de varios tamaños. Sin embargo, la extensión del resultado de Ulam a espacios bidimensionales o tridimensionales parece presentar dificultades matemáticas insuperables.

También se ven agrupaciones intermedias de las estrellas dentro de una galaxia. Ya hemos mencionado los *cúmulos galácticos*²⁸ de estrellas (tal como el cúmulo de Toro que se ve en la figura 2), que contienen muchas estrellas con el mismo movimiento propio a través del espacio. Parece muy probable que todos los miembros de este tipo de grupo provengan de la condensación de una gigantesca nube de gas y polvo (uno de los turbulentos remolinos en gran escala que existen dentro de nuestra galaxia) y que todos se estén moviendo con la misma velocidad que tenía la nube original. Debido a perturbaciones causadas por otras estrellas y al efecto de la rotación diferente en la región de los brazos en espiral, tales nubes y los cúmulos de estrellas que de ellas provienen no fueron nunca capaces de adquirir una forma regular cualquiera, y están siendo disueltos gradualmente conforme las galaxias se hacen más viejas.

Existen, no obstante, otros cúmulos de estrellas que se hallan localizados en las serenas regiones del espacio, lejos del tráfico estelar principal de las superficies galácticas. No siendo perturbados por otras estrellas, adquieren formas esféricas regulares y son conocidos con el nombre de *cúmulos globulares*. Uno de éstos, que

²⁸ Existe una desafortunada confusión terminológica entre cúmulos de galaxias y cúmulos galácticos. Los últimos son los cúmulos estelares dentro de los brazos en espiral de las galaxias.

se encuentra en la constelación de Hércules, se ve en la lámina VII. En tales cúmulos las distancias entre las estrellas individuales son relativamente pequeñas, tanto que las mutuas fuerzas gravitatorias tienen una buena ocasión para cambiar sus movimientos y para disponer todo el sistema en un bello modelo esférico en forma igual a la que adoptaría una gran masa de gas que flotara libremente en el espacio vacío.

En la figura 27 se muestra un esquema general de nuestra galaxia indicando la situación de los cúmulos galácticos y globulares con respecto a las regiones caracterizadas por los dos tipos de población estelar anteriormente descritos.

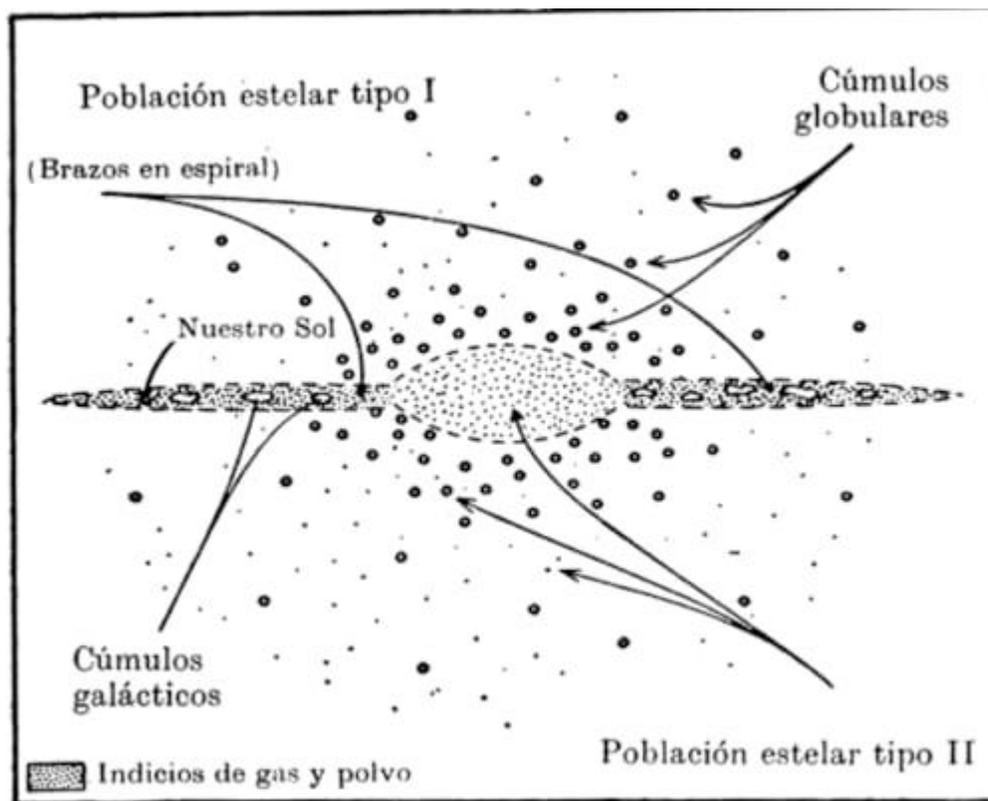


Figura 27. Corte de una galaxia perpendicular al plano de sus brazos en espiral.

§. Sistemas planetarios

Vamos ahora a considerar la evolución y propiedades de las estrellas individuales, que son, después de todo, las unidades singulares más importantes de nuestro universo. De todas ellas, el Sol es la principal para nosotros, porque es la más próxima. Otro factor igualmente importante de esta estrella es que posee un sistema de planetas. En efecto, hace tan sólo unos cuantos siglos, el Sol con su sistema planetario era casi todo lo que la astronomía estudiaba con detalle; en consecuencia, las teorías cosmogónicas se limitaban al problema del origen de la familia solar. La cosmogonía científica arranca históricamente con las opiniones expresadas en un principio por el naturalista francés Buffon, quien imaginó el nacimiento de los planetas como el resultado de un choque oblicuo de nuestro Sol y un cometa errante. Otra hipótesis algo diferente y más elaborada fue expresada un poco más tarde por el filósofo alemán Kant y por el matemático francés Laplace. Según sus teorías, el nacimiento de los planetas no sería el resultado de un encuentro accidental, sino que más bien formaría parte de un proceso normal que se opera en la vida de casi todas las estrellas. Lo mismo Kant que Laplace, supusieron que el joven Sol estuvo rodeado por una envoltura gaseosa tenue en forma de lente (nebulosa solar), que más tarde se condensó en planetas individuales como los conocemos hoy día. Tal hipótesis está de perfecto acuerdo con las modernas opiniones sobre la formación de las estrellas a partir del material interestelar difuso, y realmente es

lógico suponer que algunas porciones del material que constituye los remolinos turbulentos que llegaron a ser nuestro Sol, evitarían caer en su centro merced a su gran velocidad angular. Una envoltura giratoria casi esférica, de la categoría de la que debe de haber rodeado primero a nuestro Sol recién nacido, se aplastaría rápidamente, a consecuencia de las colisiones entre sus diferentes partes en movimiento y en diferentes planos (figura 28). Debido a la atracción gravitatoria entre las diferentes partes de este disco difuso, el material pudo entonces condensarse en planetas separados.

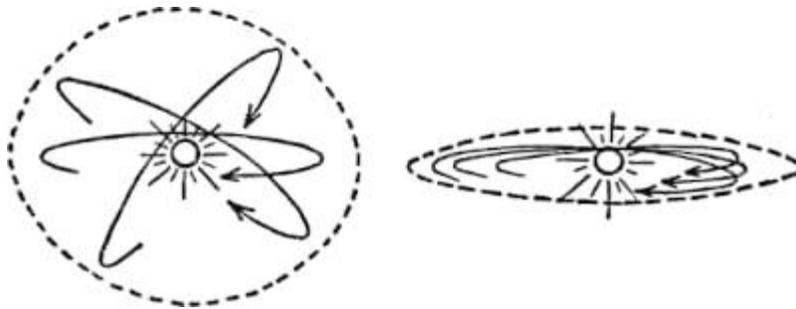


Figura 28. Manera de situarse en un solo disco el material que originalmente se movía en diferentes planos, debido a las colisiones entre las partículas.

La hipótesis Kant-Laplace, que dominó el pensamiento científico alrededor de un siglo, fue, no obstante, severamente criticada por el físico inglés James Clerk Maxwell, que creyó que había probado que tal condensación nunca pudo realizarse. La condensación gravitatoria imaginada por Kant y Laplace fue un caso especial de una teoría más moderna, la llamada de la *inestabilidad gravitatoria*,

de Jeans, que ya hemos examinado varias veces en este libro. Hemos visto que, para cualquier temperatura y densidad dadas de un gas, existe siempre un tamaño mínimo para las condensaciones, que se agruparían merced a su mutua atracción gravitatoria. Pero en el disco gaseoso giratorio que constantemente rodeaba al joven Sol, la situación se complicó por el hecho de que, de acuerdo con las leyes de Kepler, diferentes partes del disco giraban con distintas velocidades angulares. De modo que si la condensación en ciernes fue demasiado grande, sus diversas partes pudieron haber sido separadas por las fuerzas de deslizamiento de la diferente rotación, y de nuevo se habría disuelto. Tal proceso de desintegración y deslizamiento lo vemos en la figura 29.

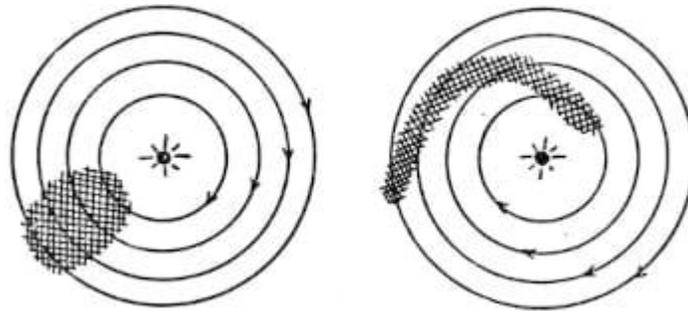


Figura 29. Cómo una condensación inicial puede quebrarse debido a las diferencias de las velocidades angulares de sus partes.

Las velocidades relativas de la rotación diferencial no dependen de la densidad del disco giratorio, pero las fuerzas de la gravedad que tratan de conservarlas juntas son proporcionales a esta densidad. En consecuencia, debe de existir un cierto valor crítico para la densidad, por encima del cual las condensaciones rudimentarias

podrían mantenerse aun a despecho de las fuerzas destructoras de la rotación.²⁹



Lámina IX. Una nebulosa en expansión derivada de la explosión de la nova de Perseo.

Suponiendo que la densidad media del disco primitivo fuera igual a la obtenida esparciendo uniformemente la masa combinada de todos los planetas (alrededor de 0,001 de la masa del Sol) sobre el plano de la elíptica (10^{-11} gramos por centímetro cúbico), Maxwell

²⁹ Matemáticamente esta densidad crítica está dada por

$$\rho \text{ crit} = w^2/G,$$

donde w es la velocidad angular de rotación y G la constante newtoniana de la gravedad.

encontró que las fuerzas de la rotación diferencial romperían cualquier condensación tan pronto como ésta comenzara a iniciarse. Logró demostrar que ninguna condensación gravitatoria pudo haber aparecido nunca, a menos que la cantidad de material en el disco fuera, como mínimo, de cien veces la masa total de todos los planetas.

Esta aparente contradicción forzó a los cosmogonistas a abandonar las opiniones de Kant y Laplace y a volver a la hipótesis original de los choques de Buffon, sustituyendo la estrella errante por un cometa. Sin embargo, esta hipótesis rejuvenecida de la colisión, desarrollada simultáneamente por James Jeans en Inglaterra y por Forest Ray Moulton y Thomas C. Chamberlin en los Estados Unidos, sufrió aún más graves dificultades y nunca pudo hacer muchos progresos. Finalmente fue resuelta la paradoja hacia fines de la segunda guerra mundial por Weizsäcker, quien indicó que la antigua objeción de Maxwell no podía ser por más tiempo válida conforme a nuestro mejor conocimiento de la constitución química de la materia cósmica. Por falta de información en contrario, era corriente admitir que el Sol, las otras estrellas y el material interestelar estaban constituidos en su mayor parte por hierro, sílice y otros *elementos terrestres*, igual que la Tierra. Estas creencias han cambiado ahora por completo (véase cap. III) y sabemos que los *elementos terrestres* alcanzan tan sólo alrededor del 1 por 100 de toda la materia, siendo el resto esencialmente una mezcla de hidrógeno y de helio. El material del que fueron contruidos los planetas representa únicamente alrededor de una

centésima parte del material original del disco, elevándose su masa primitiva desde un milésimo de la masa solar a un décimo; esto hace que la densidad media del disco original alcance exactamente el valor en el que, de acuerdo con Maxwell, se lograrían las condensaciones gravitatorias a pesar de las fuerzas de la rotación diferencial.

Esta diferencia entre la vieja teoría de Kant-Laplace y la versión moderna propuesta por Weizsäcker radica en el reconocimiento de la conducta esencialmente diferente de la parte gaseosa del disco (hidrógeno y helio) y la porción de polvo constituida por pequeñas partículas sólidas de *materiales terrestres* idénticos a los que ahora hallamos en las nubes de polvo interestelar (figura 30).

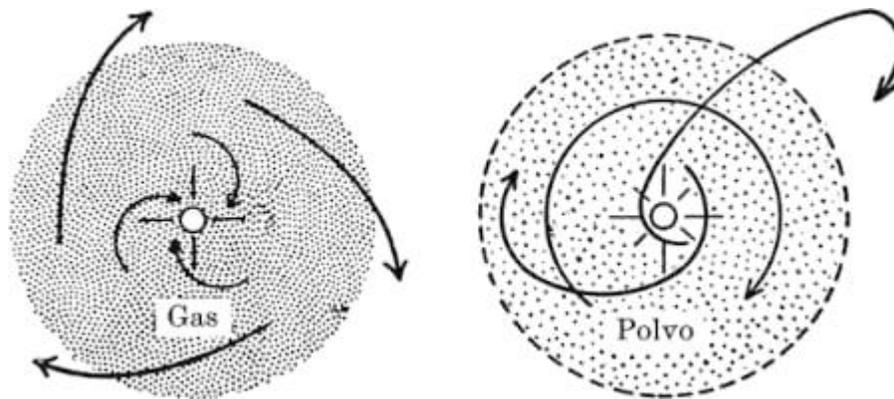


Figura 30. Conducta de las partículas de gas y de polvo en la nebulosa solar original, según Von Weizsäcker.

Debido a la viscosidad del gas, la envoltura gaseosa primitiva tendría una tendencia a girar como un cuerpo rígido, o sea con velocidades lineales proporcionales a su distancia al Sol. Esto comunicaría velocidades tan altas a sus otras partes, que no

podrían por más tiempo sujetarse a las fuerzas de la gravedad del Sol y serían arrojadas al espacio.

Por otra parte, las capas más interiores del disco marcharían más despacio y su material caería dentro del Sol siguiendo trayectorias espirales.

Consecuentemente, la envoltura gaseosa primitiva debe de haberse disipado de un modo gradual; se puede calcular que su masa se quedaría en la mitad cada cinco millones de años. Esto reduciría su densidad desde el valor original de 10^{-9} gramos por centímetro cúbico al valor mucho más pequeño de 10^{-22} por centímetro cúbico en unos 2×10^8 años. Podemos observar, pues, que la envoltura gaseosa del Sol, aunque desempeñó un papel importante en el proceso de la formación planetaria, debió de evaporarse completamente mucho antes de nuestra época.

El destino de las partículas de polvo en el disco primitivo fue, no obstante, completamente diferente al de las moléculas de gas. Al ser pequeñas y densas, estas partículas deben de haberse estado moviendo de forma parecida a los planetas de hoy, describiendo varias órbitas elípticas alrededor del centro del Sol. Sin embargo, como debió de existir un número tremendo de tales partículas (10^{30} , si cada una de ellas pesó unos cuantos gramos), el tráfico debió de ser extremadamente apretado y los choques entre las partículas muy frecuentes. Cuando dos partículas que tuvieran aproximadamente el mismo tamaño sufrieran una colisión a velocidades meteóricas, podría ocurrir que o bien quedasen enteramente pulverizadas, o bien se transformasen en vapor que

más tarde se condensaría de nuevo en microscópicos corpúsculos de polvo. Pero cuando una pequeña partícula golpea a otra grande, queda pegada a ésta, sumándose así a su masa. El resultado de estos procesos debe de haber sido la formación de trozos cada vez más grandes de material sólido que se mantuvieron barriendo el espacio que los rodeaba y absorbiendo los trozos más pequeños. En tanto que estos agregados primitivos de polvo eran originados exclusivamente por los choques directos frontales de polvo, las piedras que tuvieran ya un tamaño respetable empezarían a atraer a las partículas más pequeñas mediante la verdadera gravedad, acumulando así material procedente de una gran extensión de espacio.

La situación era semejante al crecimiento de los grandes monopolios industriales que se engullen a todas las compañías más pequeñas, y como en el cosmos no existe ley alguna contra los monopolios, el proceso continúa hasta que sólo quedan unos cuantos «grandes camaradas», lo suficientemente alejados para no interferirse unos a otros.

El proceso de la agregación de polvo debe de haber estado en concurrencia con el de la disipación del disco gaseoso primitivo, y en efecto, los dos procesos presentan escalas temporales comparables. Debe de haberse tardado unos cuantos años para que las partículas microscópicas de polvo crecieran hasta el tamaño de guijarros (de 1 cm de diámetro), y se tardaría alrededor de 10^8 años para construir un gran planeta como Júpiter. La masa de los planetas individuales debe de haber sido determinada por la

cantidad total de material presente en las regiones donde se formaron, de tal modo que podríamos esperar que los grandes planetas se desarrollasen sobre la mitad de camino entre el Sol y el borde exterior del disco, ya que cerca del Sol la densidad podría ser elevada; pero el volumen utilizable de espacio era mucho más pequeño, mientras en el borde existía plenitud de espacio y en cambio la densidad era mucho más baja. Esta idea concuerda perfectamente con el hecho observado de que los planetas más interiores y más exteriores (Mercurio, Venus, la Tierra, Marte y Plutón) son mucho más pequeños que los intermedios (Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno).

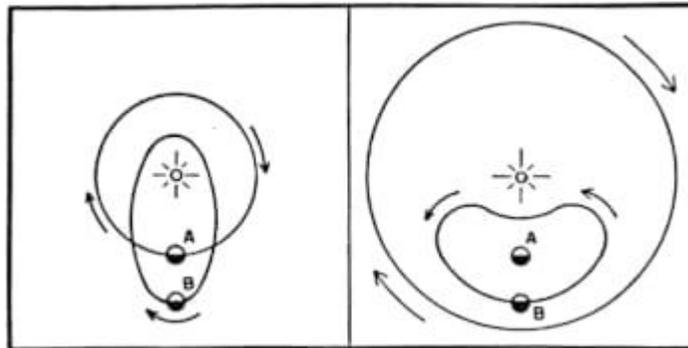


Figura 31. Cómo aparecen un movimiento circular (A) y otro elíptico (B) de una partícula de polvo desde el punto de vista de un sistema rotatorio coordinado con el mismo período.

Volviendo a los detalles de la formación planetaria, naufragamos pronto, ya que el movimiento combinado de las masas gaseosas y el crecimiento de las partículas de polvo deben de haber sido necesariamente complicados. El gran mérito de la teoría de Weizsäcker está en que reconoce el importante papel desempeñado

por el movimiento turbulento; las condiciones para una corriente laminar estaban lejos de ser satisfactorias en el material del disco, y por tanto, aquel movimiento debió de quebrarse en una multitud de remolinos. La situación era parecida a la que permitió la formación de estrellas dentro de las protogalaxias gaseosas primitivas, pero con una importante diferencia: los remolinos en las protogalaxias medían tan sólo una fracción del 1 por 100 del espesor total galáctico. En la nebulosa solar, sin embargo, los remolinos más pequeños estables ante la fuerza de la gravedad tenían que haber sido comparables en su tamaño al espesor total del disco gaseoso. Por eso las nubes galácticas primitivas se transformaron en billones de estrellas, mientras que el material del disco solar dio nacimiento a menos de una docena de planetas.

Von Weizsäcker y, después de él, Ter-Haar, Chandrasekhar y Kuiper llevaron a cabo considerables avances en la comprensión del movimiento turbulento dentro de la nebulosa solar. Sus resultados sólo pueden describirse aquí de forma muy general.

La clave para comprender el movimiento complejo que se produce consiste en separar un grupo de partículas con casi los mismos períodos de rotación (lo que también significa las mismas distancias medias al Sol) y considerar su movimiento en un sistema de coordenadas que giran alrededor del centro del Sol con el mismo período. Vistas desde tal sistema de coordenadas rotatorias, estas partículas, moviéndose con velocidad constante a lo largo de sus órbitas circulares, estarían en reposo. Pero las partículas que se mueven en órbitas elípticas alargadas corren mucho cuando pasan

cerca del Sol y se emperezan cuando ya se alejan de él. Observadas desde el sistema de coordenadas, estas partículas describen ciertas curvas cerradas, tanto mayores en tamaño cuanto más alargadas son las órbitas. La situación, que recuerda a la del famoso *sistema de epiciclos* de la antigua astronomía, se observa en la figura 31. En el transcurso del tiempo el movimiento de la multitud de partículas de polvo tiende a un estado caracterizado por un número mínimo de colisiones. Tal estado puede ser representado en nuestro sistema de coordenadas giratorio mediante un modelo de epiciclos que no se interfieren, algunos de los cuales se hallan unos dentro de otros. Cada grupo de partículas que pertenecen a un sistema concéntrico de epiciclos representa un vórtice en el medio de la nebulosa solar o, en otras palabras, un remolino turbulento. Y como hemos elegido las partículas que poseen los mismos períodos e iguales distancias respectivas del Sol, este modelo parece algo así como un collar hecho de conchas marinas aplastadas. Existen muchos de tales collares circulares colocados unos dentro de otros y girando con diferentes períodos: más cortos los de los que se encuentran más cerca del Sol y más largos los de los que se hallan lejos de éste. La figura 32 muestra el dibujo original de Von Weizsäcker (parte superior) y el mucho más complicado sistema construido por Kuiper con los tamaños de los remolinos fortuitos distribuidos de acuerdo con la ley sobre la turbulencia de Kolmogoroff (parte inferior). Solamente los remolinos mayores se mantendrán unidos por la fuerza de gravedad de Newton, y sólo ellos escapan, por lo tanto, a la disolución. Dentro de estos remolinos, el proceso de la agregación

de polvo continuará en rápida proporción, con el resultado final de desarrollar los planetas.

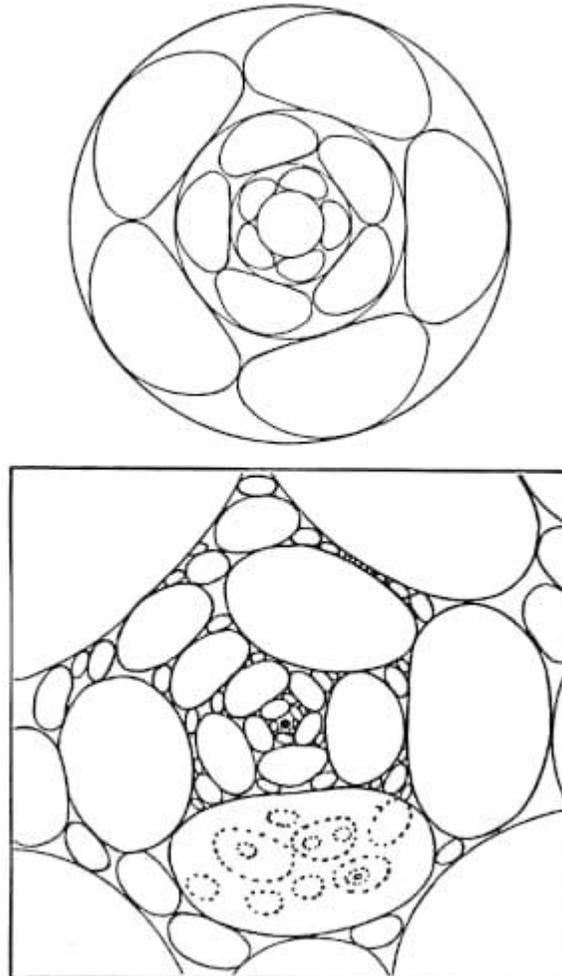


Figura 32. Los remolinos turbulentos en la nebulosa solar, según la teoría original de Von Weizsäcker (arriba) y según el sistema de Kuiper (abajo).

Estudiando con detalle las propiedades de la nebulosa solar primitiva y el movimiento turbulento producido por su giro, es posible obtener los tamaños correctos de los diferentes planetas del sistema solar. También fue posible dar una explicación razonable de

la famosa ley de las distancias planetarias de Bode-Titius, que establece que, dentro de la familia planetaria (considerando al asteroide que da vueltas a Marte y Júpiter como el recuerdo de un viejo planeta), *la distancia de cada uno de los miembros al Sol es aproximadamente el doble de la distancia del anterior.*

No es éste sitio para entrar en más detalles sobre la teoría; por ello nos limitaremos a indicar, solamente de pasada, unas cuantas de sus más interesantes consecuencias. En primer lugar, como fue mencionado en el capítulo III, tal proceso de formación determina unas constituciones químicas diferentes de los planetas más pequeños y de los más grandes. Mientras que los planetas *marginales* (de Mercurio a Marte, por la parte interior, y Plutón, por la exterior) nunca crecieron de forma masiva lo suficiente para atraer mucho gas interestelar, y así siguieron esencialmente con sus estructuras rocosas, los planetas *intermedios* (Júpiter, Saturno y, en menor grado, Urano y Neptuno) se desarrollaron más allá de este tamaño límite y pudieron capturar, mediante la gravedad, una parte del material de la envoltura gaseosa original antes de que se evaporara en el espacio circundante (véase lámina III, en la que está indicada la estructura interna de Júpiter).

El planeta que debió de existir en otra época entre Marte y Júpiter fue probablemente despedazado en algún tiempo pasado (probablemente por las fuerzas de marea de Júpiter) y sus fragmentos se están ahora moviendo en las vecindades de la órbita antigua, donde forman el anillo de asteroides. Algunas piezas pertenecientes a este anillo se aventuran a alejarse demasiado de

sus dominios, cayendo en ocasiones en la superficie de la Tierra en forma de meteoritos. La constitución química de los meteoritos sugiere fuertemente que su material se debió de solidificar bajo presiones muy altas, tales como las que se registran en el interior de los planetas.

No existen relaciones tan evidentes en el otro grupo de miembros del sistema solar: los cometas. Aunque éstos son casi los objetos más espectaculares que se pueden ver en el cielo a simple vista, constituyen una parte muy insignificante del sistema solar. Es probable que se formaran en la franja más externa de la nebulosa solar primitiva, y la mayoría están compuestos de combinaciones químicas de elementos ligeros, tales como el agua, el amoniaco y diversos hidrocarburos. Quizá unos veinte billones de cometas se están moviendo (la mayoría más allá de la órbita de Plutón) dentro de una esfera que tiene un diámetro de alrededor de tres años-luz. Pero como la masa de un cometa intermedio es solamente de 10^{16} gramos, todos juntos sólo representarían una décima parte de la masa de la Tierra. A veces, los cometas de este gran depósito se acercan mucho al Sol y, bajo la acción de sus radiaciones, desarrollan bellas colas que difunden el horror entre los supersticiosos nativos de África e inspiran tan fantásticas historias sobre los maleficios de los cuerpos celestes como la que cuenta Velikovsky.

Por último, aunque no es menos importante, señalaremos que, con la posible excepción de nuestra Luna (véase cap. I), los sistemas de los satélites planetarios se desarrollaron mediante un proceso muy

parecido, si no idéntico, al de la formación de los planetas mismos. De acuerdo con estas ideas y en contraste con la vieja teoría de las colisiones, podríamos esperar que a cualquier estrella se le puede presentar una ocasión buena para procurarse por sí misma un sistema planetario. Y, en efecto, la observación parece indicar que éste puede ser muy bien el caso. Los estudios detallados del movimiento propio de las estrellas vecinas, tales como la estrella de Barnard (a 6,1 años-luz de distancia) y 61 del Cisne (a 11 años-luz de distancia), llevados a cabo por P. van der Kamp del Observatorio Sproul y K. A. G. Strand de la Northwestern University, muestran que su movimiento a través del espacio no es una línea perfectamente recta. Este hecho indica la presencia de un compañero invisible, pero las desviaciones observadas de la línea recta son tan pequeñas que la masa del compañero no puede ser mucho más grande que la de Júpiter. Este orden de magnitud es planetario más bien que de una escala estelar. En realidad, también es posible que estas estrellas posean un cierto número de planetas más pequeños, similares a nuestra Tierra, pero que la precisión de las medidas que en la actualidad se pueden obtener no sea lo suficientemente alta para detectarlos.

Capítulo V

La vida privada de las estrellas

Contenido:

§. *Simbiosis estelar*

§. *Envejecimiento de las estrellas*

§. Simbiosis estelar

En el capítulo IV hemos examinado la serie completa de todas las sucesivas condensaciones, desde las de las protogalaxias primitivas hasta las de las estrellas individuales, planetas y satélites de aquellos planetas. Un hecho al que todavía no se le ha concedido la debida importancia es que las estrellas individuales, como nuestro Sol —con sistemas planetarios o sin ellos—, son una excepción más bien que la regla. Casi el 80 por 100 de todas las estrellas son estrellas múltiples —principalmente, estrellas dobles (binarias)—, pero, en algunos casos, aun triples y cuádruples.³⁰ Consecuentemente, el problema de las estrellas múltiples adquiere importancia fundamental en cualquier teoría del origen estelar y su evolución.

Los astrónomos clasifican a las estrellas dobles como binarias *visuales, espectroscópicas y eclipsantes*; pero esta clasificación se refiere al método de observación más bien que a la naturaleza física de los pares. Si dos estrellas están lo suficientemente alejadas, en relación con su distancia a nosotros, como para aparecer como dos estrellas a través del telescopio, el par se llama binario visual. En tal

³⁰ De las estrellas catalogadas, sólo alrededor del 20 por 100 están inscritas como múltiples; pero esto se debe, probablemente, a una selección determinada por la observación.

caso podemos estudiar sus movimientos orbitales con detalle y obtener un máximo de información en cuanto se refiere a las propiedades mecánicas del sistema. Sin embargo, si los dos componentes de una binaria están muy cerca el uno del otro o si el sistema binario se halla muy lejos, la observación telescópica mostrará solamente un punto luminoso y la naturaleza binaria de la estrella sólo será registrada por medio del espectroscopio: entonces la componente *A* se mueve hacia nosotros durante medio período de su rotación y se aleja durante el otro medio; la componente *B* se aleja de nosotros mientras *A* se nos aproxima, y viceversa. Por tanto, cada línea del espectro mostrará un desdoblamiento periódico debido al efecto Doppler, que nos proporciona directamente el período de rotación de las componentes y sus velocidades orbitales o, de modo más preciso, la proyección geométrica del movimiento orbital sobre las visuales. Así, el espectroscopio, en el caso de estas binarias espectroscópicas, no sólo revela que la estrella es binaria, sino que también nos suministra casi la misma información que por observación directa se obtiene para las binarias visuales.

En casos excepcionales puede ocurrir que una estrella doble se oriente en el espacio de tal manera que la visual desde la Tierra coincida muy aproximadamente con el plano del movimiento orbital de las componentes. En este caso, las dos estrellas se eclipsarán periódicamente la una a la otra, suministrando información adicional sobre las dimensiones de sus discos, a menudo, sobre la naturaleza de sus atmósferas.

Desde el punto de vista de la evolución estelar, las binarias son sólo de especial interés en aquellos casos en los que la distancia entre las dos compañeras es lo suficientemente pequeña —debe ser comparable a sus diámetros— como para producir fuertes interacciones físicas entre sus atmósferas. Un ejemplo típico de semejante sistema binario cerrado o de contacto lo suministra la segunda estrella más brillante de la constelación de la Lira, la Beta de la Lira, que se compone de una estrella gigante azul y otra compañera amarillenta, mucho menor. La separación de las dos es, aproximadamente, igual al diámetro de la principal componente. La figura 33, que se basa en los resultados de la observación obtenidos por Otto Struve y los estudios teóricos de Gerard P. Kuiper, muestra lo que sucede a las capas más externas de estas estrellas como consecuencia de la gravedad de Newton. Parece ser que una corriente masiva de gases calientes abandona la superficie de la estrella mayor y se dirige hacia su compañera más pequeña a una velocidad media de casi 300 kilómetros por segundo. Pero a causa de la rotación del sistema total, esta corriente yerra su blanco y pasa por detrás de la más pequeña, la cual, sin embargo, desvía intensamente la corriente debido a su campo gravitatorio. Una parte de la corriente se retuerce completamente sobre sí misma y regresa a su manantial de origen. Pero otras porciones de la corriente, que se mueven con mayor rapidez, son claramente arrojadas al espacio, moviéndose según una trayectoria en espiral, que se expande gradualmente. Es probable que algo de este material sea capturado

por la componente más pequeña, permitiendo un aumento gradual de su masa.



Figura 33. Expulsión de material gaseoso por Beta de la Lira, según O. Struve y G. P. Kuiper.

En el estado actual de nuestros conocimientos es difícil decir cuál será la evolución en el futuro de este y otros sistemas similares. En particular, la observación no nos ha revelado todavía si este cambio de material entre las dos estrellas de un conjunto binario cerrado provocará un aumento o una reducción de la distancia entre ellas. Si la distancia aumenta, podemos esperar que la corriente gaseosa pierda volumen gradualmente y, por fin, se desvanezca por completo; si la distancia disminuye, debe producirse un contacto real, haciendo que la estrella pequeña se funda con la mayor en un solo cuerpo.



Lámina X. La nebulosa del Cangrejo, en la constelación del Toro

Pero por importante que sea el origen de los sistemas múltiples para la cosmogonía general, todavía nos hallamos, por desgracia, sin una teoría satisfactoria que los explique, aunque se han realizado una gran cantidad de trabajos sobre el problema. Parece muy probable que el fenómeno esté algo relacionado con la presencia de altas velocidades angulares en el material original de que se formaron las estrellas. Es un hecho que el porcentaje de binarias es mucho más alto entre las estrellas que pertenecen a los brazos en espiral (población estelar I) que entre las estrellas que pueblan la región

casi esférica que rodea el cuerpo central galáctico (población estelar II).³¹

Parecería lógico pensar que las binarias deben de haberse originado por medio de la fisión de estrellas individuales que giraban rápidamente. Y, en efecto, cuando una estrella recién formada se contrae de tal modo que su radio se hace cada vez más y más pequeño, su velocidad de rotación aumenta gradualmente y al fin alcanza un valor crítico, en el cual la fuerza centrífuga llega ser lo suficientemente fuerte como para que se desgaje de ella otra estrella aparte, constituyendo así un conjunto cerrado de contacto binario. La ulterior historia de la evolución del grupo binario estará entonces determinada por la interacción gravitatoria entre los dos componentes y puede dar lugar a un considerable aumento de la distancia entre las dos estrellas. Cuando éstas se hallan muy cercanas una de otra, esta interacción adquiere una forma de desgajamiento similar a la descrita para la Beta de la Lira. Cuando las distancias se hacen mayores, existirán mareas ordinarias de fuerza semejante a las que están alejando a la Luna de la Tierra (véase cap. I).

La principal objeción para la fisión teórica en el origen de las binarias está en el hecho de que tal ruptura no puede esperarse que se produzca en estrellas con una distribución normal de densidad en sus cuerpos. Fue demostrado matemáticamente por James Jeans que la fisión de un cuerpo que gira rápidamente sólo puede

³¹ Como muestra la figura 27, las estrellas de la población estelar II están difundidas más o menos uniformemente en todas direcciones alrededor del cuerpo central; la mayoría se mueven radialmente (acercándose al centro o alejándose de él), mostrando pequeña rotación angular y pequeñas velocidades diferenciales.

producirse si el cuerpo posee una densidad aproximadamente uniforme desde el centro a la superficie. Si existe una concentración definida de materia en la región central, el proceso de rompimiento seguirá un curso por completo diferente. En este caso, la estrella desarrollará una especie de abultamiento ecuatorial aguzado y el material será expelido desde el borde como fino rocío. La diferencia entre los dos casos se ilustra en la figura 34. Sabemos que todas las estrellas normales poseen unos centros muy condensados; la densidad en la región central de nuestro Sol excede a la de su densidad media por un factor de casi 100. Podemos también observar muchos casos de estrellas que giran rápidamente y que en la actualidad expulsan material a partir de sus abultamientos ecuatoriales. Podríamos deducir, pues, que el proceso de escisión no es una explicación aceptable.

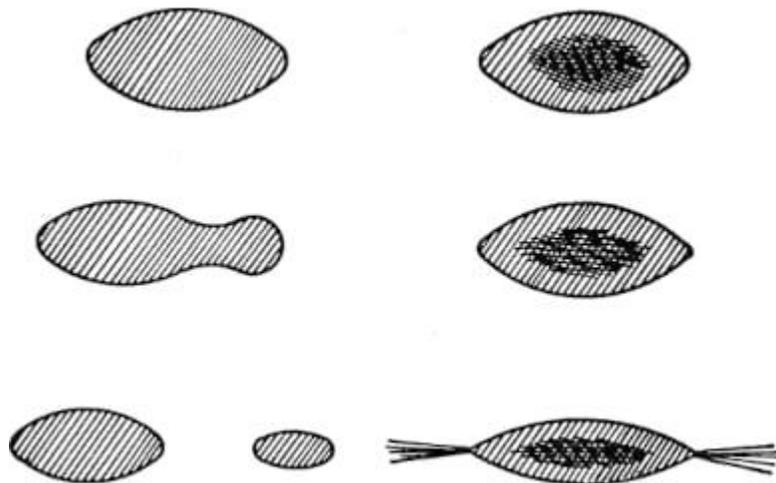


Figura 34. Lo que le sucede a una estrella giratoria cuando tiene una densidad uniforme (izquierda) y cuando posee una condensación central (derecha).

Sin embargo, toda nuestra información proviene de estrellas que se formaron hace algún tiempo y que han tenido el suficiente para reajustar la distribución de la materia en sus interiores. No sabemos nada sobre la distribución de esta densidad en una estrella *in statu nascendi*, inmediatamente después de su condensación a partir del material gaseoso difuso primitivo. Tal *protoestrella*, en tanto que se contrajo lo suficiente para adquirir una alta velocidad de rotación, pudo aún poseer una distribución más bien uniforme de la masa en todo su interior. En tales condiciones, pudo producirse todavía el proceso de escisión, dando lugar a dos componentes que más tarde reajustarían la distribución de sus densidades normales dentro de sus cuerpos.

Lo que dificulta la solución del problema del origen de las estrellas binarias, así como la de otros muchos problemas de la cosmogonía, es que nunca tenemos la suerte de observar el proceso de formación mismo: nos encaramos con el producto terminado. Así, nos vemos privados de elementos muy importantes de prueba, que obtendríamos por la observación directa de la formación. Y la teoría matemática del proceso, que sería lógico que se produjese en un medio gravitatorio turbulento, es tremendamente complicada y en gran parte se halla fuera del alcance del método analítico ordinario. No obstante, puede esperarse que se efectúen muchos progresos en un próximo futuro mediante el empleo de las modernas máquinas calculadoras electrónicas, con las que se pueden acometer complejos problemas hidrodinámicos con mucha mayor facilidad que la que tiene un estudiante de segunda enseñanza aventajado

para resolver un problema algebraico de rutina. Tales estudios, cuando se completan, también nos dirán por qué la condensación del material difuso primitivo permitió en algunos casos que se engendraran estrellas dobles o múltiples, mientras que en otros el resultado fue una estrella individual con un sistema planetario.

§. Fuentes de energía nuclear

En un principio, cuando las estrellas se formaron por la condensación de las protogalaxias primitivas, sólo eran esferas gigantescas de material gaseoso tibio que se contraían lentamente; sin embargo, como resultado de la condensación progresiva y liberación simultánea de vastas cantidades de energía gravitatoria, estas esferas gaseosas se calentaron rápidamente y sus superficies empezaron a emitir luz visible. Cada una de estas estrellas comenzó a recorrer el curso de su *evolución contráctil*, desde un estado más bien de dilución al rojo con luminosidad relativamente baja, hasta el estado de condensación elevada y luminosidad brillante al blanco. Al describir las propiedades que se observan en las estrellas, es costumbre emplear el llamado diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 35), en el que las luminosidades de las estrellas (o, mejor dicho, los logaritmos de aquellas luminosidades) están representadas en función de los colores de las estrellas, caracterizados por sus temperaturas superficiales. En el diagrama, los caminos de la evolución contráctil están representados por líneas rectas que van desde la parte inferior a la derecha, hacia arriba a la izquierda.

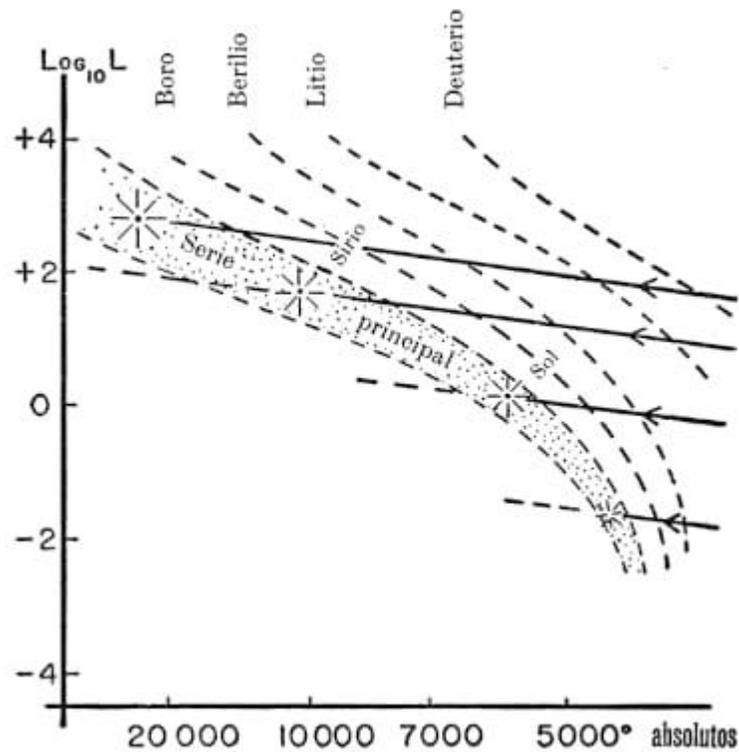


Figura 35. Diagrama de Hertzsprung-Russell, que muestra la serie principal, los trazos de la evolución contráctil y las «líneas de detención», debidas a la reacción con los elementos más ligeros.

Cuando una estrella está evolucionando por contracción gravitatoria, la temperatura de su superficie y su luminosidad aumentan continuamente y con bastante rapidez al paso del tiempo. Si, por ejemplo, el estado presente del Sol fuera precisamente una etapa transitoria de tal evolución por contracción, se podría esperar que su luminosidad se hiciera doble cada diez millones de años. De aquí se deduce que hace diez millones de años la cantidad de radiación solar que golpeaba la superficie terrestre habría sido insuficiente para mantener las temperaturas superficiales por

encima del punto de congelación del agua.³² Si esto fuese verdad, los océanos de las primeras épocas geológicas habrían sido meramente trozos sólidos de hielo, que se derritieron hace poco tiempo, relativamente.

Sabemos, sin embargo, que esto no puede ser verdad. Las pruebas paleontológicas muestran que la temperatura de nuestro planeta ha permanecido muy cerca de los valores presentes durante un periodo de, por lo menos, un billón de años, el tiempo necesario para el desarrollo de las formas actuales de vida. Así pues, nos vemos forzados a concluir que nuestro Sol y presumiblemente todas las otras estrellas poseen algún otro manantial más rico de energía, que las faculta para mantener su *statu quo* por muy largos periodos de tiempo. Y difícilmente se puede dudar de que este otro material de energía tiene que verse en las transformaciones nucleares que se producen en los ardientes interiores de las estrellas. Tan pronto como la temperatura central de una estrella en rápida evolución contráctil alcanza el *punto de ignición* de las reacciones nucleares, la contracción se detiene y las estrellas permanecen en su nuevo *statu quo* nuclear hasta que este material de energía se agota finalmente.

Por el diagrama de Hertzsprung-Russell podemos ver que la mayoría de las estrellas existentes se hallan colocadas a lo largo de una banda estrecha conocida por *serie principal*, que va a través de los caminos de la evolución contráctil. Ésta debe de ser, pues, la serie

³² Según la ley de Stephan-Boltzmann, la temperatura superficial de la Tierra (escala absoluta) varía con la raíz cuarta de la luminosidad solar. Puesto que la temperatura actual es del orden de 300 grados absolutos, la temperatura correspondiente a la mitad de la radiación solar actual sería

$300 : 2^{1/4} = 300 : 1,2 = 250$ grados absolutos,
que es bastante inferior al punto de congelación del agua.

de puntos en los cuales comienzan a actuar las fuentes de la energía nuclear en estrellas de distintas masas. Para investigar qué reacción especial nuclear es la que determina el cese de la contracción, debemos conocer cuáles son las condiciones físicas que existen en las regiones centrales de las estrellas pertenecientes a la serie principal. Esta información nos la proporciona la teoría sobre la estructura estelar desarrollada por el astrofísico inglés Arthur Eddington y sus sucesores. A primera vista, el problema de hallar las temperaturas y presiones que prevalecían en el interior de las estrellas parece realmente muy difícil. Pero, no obstante, lo cierto es que en la actualidad podemos reunir mucha más información real y extensa sobre las condiciones existentes en el interior de una estrella alejada de nosotros varios cientos de años-luz, que sobre las que existen en el interior de la Tierra a tan sólo unos cuantos miles de kilómetros bajo nuestros pies. Esto se debe a que la Tierra está constituida por materiales sólidos y fundidos, en tanto que las estrellas lo están en su totalidad por gases que obedecen a leyes físicas mucho más sencillas.

El material gaseoso que constituye el interior de una estrella es aún más sencillo en sus propiedades físicas que lo es el aire atmosférico. Debido a las temperaturas extremadamente altas, los átomos de ese gas están disociados en núcleos atómicos descortezados y electrones libres. Con nuestros actuales conocimientos de física atómica, podemos predecir las características de tal gas con un alto grado de certeza y deducir asimismo fórmulas seguras y sencillas de sus propiedades mecánicas, ópticas y eléctricas. En posesión de estas

fórmulas, y partiendo de las condiciones físicas observadas en la superficie de una estrella, podemos determinar, paso a paso, las condiciones que prevalecen en las capas más profundas, terminando con cifras para la temperatura, presión y densidad en el mismo centro. Estos cálculos se verificaron primero para nuestro propio Sol y demostraron que en su centro la temperatura debe de andar por los 20 millones de grados, y que la densidad en ese mismo centro viene a ser alrededor de un centenar de veces la del agua.³³

Aplicando el mismo método a las estrellas de la serie principal, Eddington descubrió que, tanto si se elige una estrella muy débil como una muy brillante, la temperatura central de ellas es siempre próxima a los 20 millones de grados. Claro que existe alguna diferencia entre unas y otras, pero es sorprendentemente ligera; sin duda, este valor de 20 millones de grados representa la temperatura de ignición de las reacciones termonucleares que mantienen las luminosidades constantes de las estrellas de la serie principal.

Para establecer la reacción particular que todo esto supone y las especies de elementos químicos que participan en ella, hemos de volver a los resultados de la física nuclear, tanto experimental como teórica.

Es sabido que las reacciones nucleares se producen cuando dos núcleos chocan con una velocidad suficiente para penetrar las

³³ El lector no se sorprenderá de que un material de tan gran densidad sea todavía considerado como gas. Las características típicas del estado gaseoso están presentes siempre que la distancia entre las partículas sea mayor que el tamaño de las mismas. Puesto que los átomos de materia en el interior de una estrella están divididos en partículas mucho más pequeñas (electrones y núcleos), el material permanece gaseoso a densidades mucho mayores.

barreras de la repulsión eléctrica mantenida por sus cargas positivas. En los varios tipos de *trituradores de átomos* empleados en los laboratorios físicos, estas colisiones a alta velocidad se efectúan mediante la aceleración de las partículas en campos de elevado voltaje eléctrico. En las estrellas, la misma suerte de colisiones se produce debido al intenso movimiento térmico de las partículas originado por las temperaturas extremadamente altas. Usando la teoría del cuanto para las reacciones nucleares desarrollada por E. U. Condon y R. Gurney, e independientemente por mí mismo hace más de veinte años, se puede calcular la proporción de la liberación de energía para los diferentes elementos a distintas densidades y temperaturas. Tales cálculos fueron llevados a cabo por primera vez en 1929 por R. Atkinson y F. Houtermans. Ellos indicaron que las únicas reacciones nucleares que pueden producir las cantidades de energía observadas en las condiciones del interior del Sol son las reacciones entre el hidrógeno y los núcleos de los elementos ligeros.

En aquellos tiempos, no obstante, el conocimiento empírico de los diferentes tipos de las reacciones nucleares estaba en la infancia y sólo hacía diez años que se había podido establecer con todo detalle la *reacción solar*.

Sabemos ahora que el proceso mediante el cual se provee el Sol de energía nuclear consiste en una serie de reacciones que ha sido llamada el *ciclo del carbono*. Esta cadena de reacciones nucleares, sugerida independientemente por H. Bethe y por Carl von Weizsäcker, en 1938, aparece en la figura 36. Su resultado neto es

la transformación del hidrógeno en helio a través de la acción catalítica del carbono y del nitrógeno.

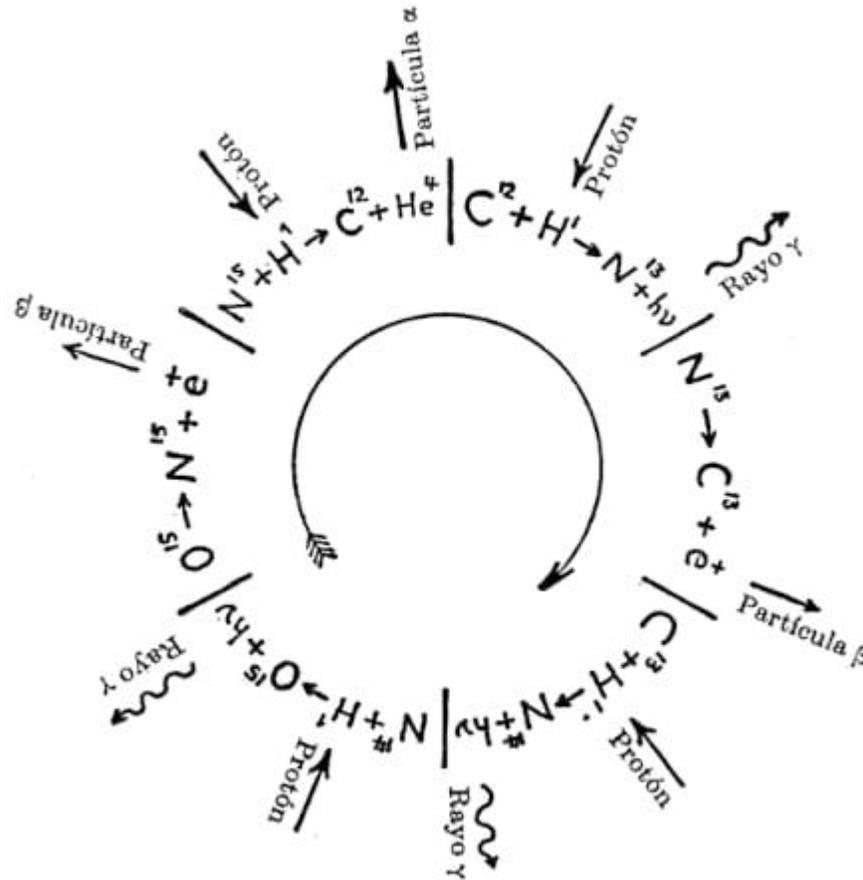


Figura 36. Reacción cíclica nuclear originaria de la generación de energía en el Sol.

Una reacción «competidora», propuesta primero por C. Critchfield casi al mismo tiempo que la anterior (véase figura 37), da lugar a la misma transformación, o sea la del hidrógeno en helio, sin la ayuda de ningún *catalizador nuclear*. En nuestro sol, alrededor del 85 por 100 de la liberación de energía se produce a través del ciclo carbónico, mientras el proceso de Critchfield hidrógeno-helio (H-H)

es el origen del 15 por 100 restante. Y como las dos reacciones dependen en gran proporción de la temperatura, sus importancias relativas varían para las diferentes estrellas, según su masa y luminosidad. En las que son mucho más brillantes que nuestro Sol, como, por ejemplo, Sirio, el ciclo del carbono es virtualmente el origen de toda la producción de energía, mientras que en las estrellas mucho más débiles que nuestro Sol se debe casi exclusivamente al proceso H-H.

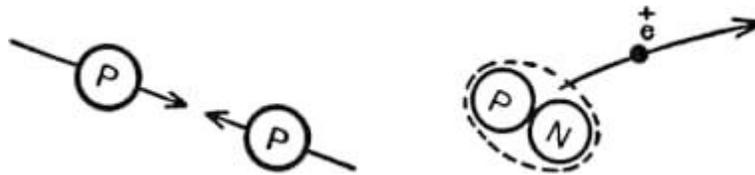


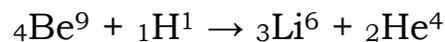
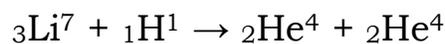
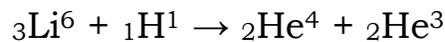
Figura 37. Proceso H-H de Critchfield.

En ambas reacciones existe un proceso de consumo de hidrógeno; pero como más de la mitad del material estelar es hidrógeno, las estrellas son capaces de mantener su *statu quo* durante un tiempo extremadamente largo, que equivale a muchas veces la duración del período contráctil. Como el hidrógeno de una estrella se transforma lentamente en helio, el radio de la estrella, su luminosidad y temperatura superficial permanecen esencialmente invariables, aumentando sólo de una manera ligera cuando el contenido de hidrógeno de la zona de transformación decrece demasiado.

Pero cuando el hidrógeno se ha agotado, la estrella debe reanudar su contracción largamente interrumpida y empezará a *recorrer la última etapa* del lapso de su vida. Antes de hablar de lo que ocurre

en una estrella moribunda, debemos incluir algunas notas sobre otras reacciones nucleares.

Como el autor de esta obra y Edward Teller, en colaboración, mostraron hace algún tiempo, puede esperarse que algunas reacciones nucleares se produzcan en una etapa relativamente primitiva del período de contracción de una estrella. Si observamos una lista completa de todas las reacciones nucleares posibles entre los elementos ligeros, hallamos que existen seis que tienen los puntos de ignición mucho más bajos que los del ciclo del carbono o los del proceso del hidrógeno-helio. Éstas son las reacciones entre el deuterio, el litio, el berilio y el boro por un lado, y el hidrógeno por otro. Son las siguientes:



Los puntos de ignición de estas seis reacciones oscilan entre uno y siete millones de grados. La diferencia fundamental entre ellas y las del ciclo del carbono es que aquéllas no son cíclicas, lo que significa que los elementos ligeros que en ellas intervienen no se regeneran. Y del hecho de que el deuterio, el litio, el berilio y el boro representen únicamente una fracción tan pequeña de la masa total estelar, deducimos que las interrupciones del período de contracción de las

estrellas jóvenes originado por estas reacciones nucleares debe de ser relativamente corto.

Si estas breves interrupciones fuesen representadas en el diagrama de Hertzsprung-Russell, causarían una ligera acumulación de puntos a lo largo de las líneas punteadas que corren paralelas a la derecha de la serie principal (figura 35); pero como sólo existen muy pocas estrellas en estas regiones del diagrama, es difícil observar acumulaciones de esta clase. Debido a que el volumen principal de la población estelar de nuestra galaxia nació y pasó su juventud hace billones de años, y a que la proporción de nacimientos de nuevas estrellas en la era presente es excesivamente baja, es casi imposible reunir suficiente material estadístico para el estudio de las etapas primitivas por contracción de la evolución estelar. O por lo menos no se ha recogido suficiente material estadístico hasta la fecha.

§. Envejecimiento de las estrellas

Llegamos ahora a la etapa final de la evolución estelar, a la etapa en la que una estrella se aproxima al agotamiento de las reservas de su hidrógeno original. Como hemos visto en el capítulo I, el agotamiento de este hidrógeno puede esperarse en la era presente para todas las estrellas de la primitiva tanda que tengan masas hasta cuatro o cinco veces la de nuestro Sol.

En el diagrama de Hertzsprung-Russell, esta franja de estrellas que envejecen (figura 38) interrumpe a la serie principal algo por encima de Sirio. Está caracterizada por toda clase de conductas raras.

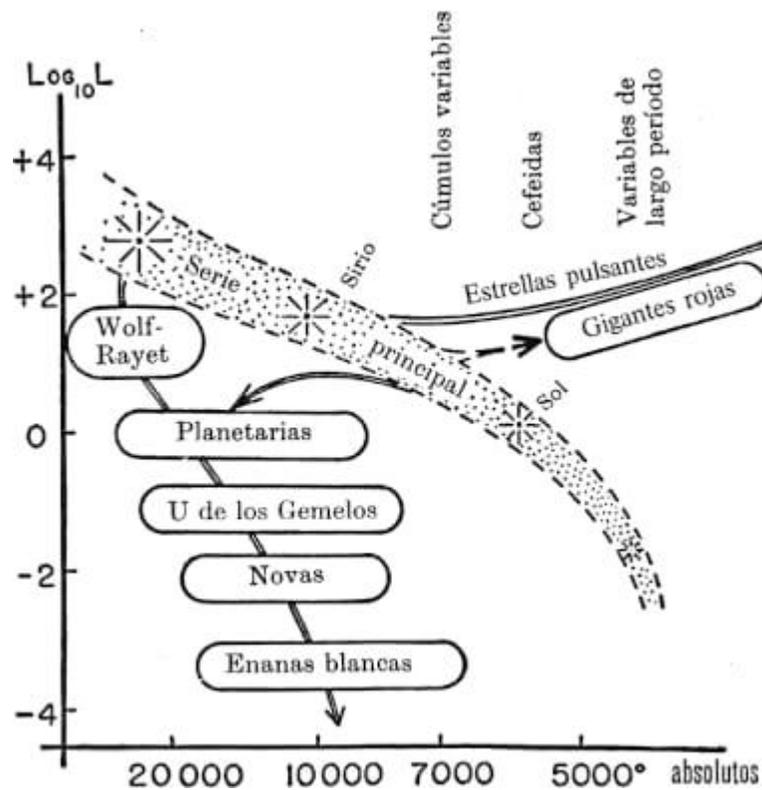


Figura 38. Franja de estrellas que envejecen, en el diagrama de Hertzsprung-Russell.

A la derecha de la serie principal hay un gran grupo de estrellas conocidas con el nombre de *gigantes rojas*, que poseen mucho mayor diámetro, mucho más bajas densidades medias y temperaturas superficiales mucho menores que las estrellas normales de la serie principal de igual masa. Muchas de las estrellas que pertenecen a este grupo se hallan, al parecer, en un estado de inestabilidad, y sus gigantescos cuerpos se hinchan y deshinchon una y otra vez, originando variaciones periódicas de luminosidad. El período de pulsación aumenta conforme avanzamos en la línea de la serie principal. Los períodos de pulsación cortos,

que van desde unas cuantas horas a casi un día, son característicos de los llamados *cúmulos variables*, que se hallan corrientemente en los cúmulos globulares (de aquí el nombre), y que pertenecen a la población estelar II. Las cefeidas variables pulsátiles, con períodos desde unos cuantos días a varios meses, se encuentran la mayoría entre la población estelar I en las regiones de los brazos en espiral. Finalmente existen las variables de largos períodos pulsátiles, que muestran realmente unos cambios irregulares en su luminosidad, que a menudo se extienden a períodos de muchos años.

A la izquierda de la serie principal hay un grupo de estrellas contraídas que poseen tan extremadamente altas temperaturas superficiales (de varios cientos de miles de grados), que el gas de sus capas más externas está continuamente disipándose por la propia presión de su radiación. Este grupo incluye las estrellas de Wolf-Rayet (llamadas así por sus dos descubridores), que arrojan corrientes de gas a velocidades de hasta 3 000 km por segundo. Se ha calculado que las estrellas de Wolf-Rayet, expulsando su material en tal proporción, no podrían durar más que unos pocos millones de años.

Un proceso de expulsión considerablemente menos violento se observa en el núcleo de las *nebulosas planetarias*.³⁴ Estas estrellas arrojan gases a las velocidades relativamente bajas de 10 a 20 km por segundo, y estos gases son también considerablemente más densos que los expulsados por las estrellas de Wolf-Rayet. Al ser

³⁴ El nombre es engañoso: no se debe a la existencia de planetas. Se les dio tal nombre porque la envoltura esférica gaseosa de estos objetos se ve como un disco (véase lámina VIII), como ocurre en los planetas cuando se los observa con un pequeño telescopio.

iluminada por la radiación ultravioleta de la estrella central ardiente, esta envoltura gaseosa fluoresce, haciéndose fácilmente accesible a la observación directa y a la fotografía (lámina VIII).

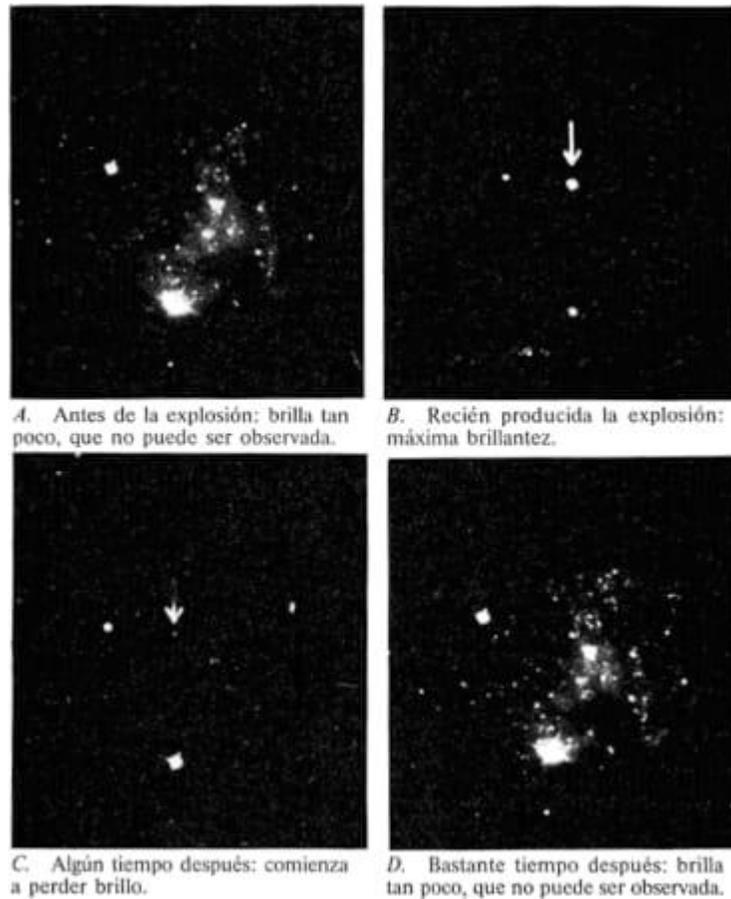


Lámina XI. Cuatro etapas de una supernova. (Las fotografías A y D recibieron una exposición considerablemente más prolongada, con objeto de captar la estructura de la galaxia.)

Localizadas en el mismo lado de la serie principal, pero algo más bajas en su escala luminosa, se hallan tipos de estrellas que están sometidas a explosiones periódicas violentas. Del mismo modo que las estrellas pulsátiles exhiben una amplia gama de períodos de

pulsación, así los intervalos de tiempo entre las explosiones en estas estrellas varían dentro de amplios límites. Podemos mencionar primero las estrellas U de los Gemelos (llamadas así por una representante típica del grupo), algunas de las cuales estallan cada quincena, mientras otras lo hacen solamente una vez en varios meses. Un hecho muy importante de estas estrellas de explosiones periódicas fue descubierto por Kukarkin y Parenago, a saber, que la intensidad de las explosiones es directamente proporcional a su intervalo de tiempo. Por ejemplo, la estrella conocida por AB del Dragón estalla por término medio cada quincena, y durante cada una de sus explosiones su brillo aumenta hasta quince veces el normal. Las mismas U de los Gemelos estallan con intervalos de noventa y siete días, con un aumento de un centenar de veces en su brillo. De este modo, el intervalo de tiempo es siete veces el de AB del Dragón y la explosión es siete veces más potente. Estas relaciones entre intervalos de tiempo e intensidad de explosión indican que en todas las estrellas del tipo U de los Gemelos que estallan periódicamente la cantidad media de energía liberada es constante. La diferencia entre las varias estrellas representativas radica meramente en la proporción que exista entre los intervalos de tiempo en los que se gasta energía y aquellos en los que ésta se acumula, ya que, con toda probabilidad, partimos de estrellas con masas idénticas. Todas las reacciones termonucleares son extremadamente sensibles a la masa estelar, la cual determina la temperatura. Por esto parecería imposible que estrellas de diferentes masas tengan la misma proporción de energía liberada.

Si esto es verdad, las estrellas U de los Gemelos con diferentes períodos deben considerarse como representantes de distintas etapas de evolución en la vida de una estrella individual de aquel tipo. Como veremos más tarde, existen realmente buenas razones teóricas para esperar esta clase de conducta de estrellas que han agotado sus reservas de hidrógeno.

Además de las que se producen en las estrellas U de los Gemelos, existen otras explosiones periódicas de estrellas, mucho más raras, pero mucho más fuertes. Las dos estrellas conocidas con el nombre de RS de Ofiuco y U del Escorpión parecen estallar periódicamente, a intervalos de treinta a cuarenta años, pues se han observado una repetición en la primera y dos en la segunda. Durante estas explosiones su brillo aumentó varios miles de veces; claro es que existen las *novas* ordinarias, que aumentan su luminosidad varios millones de veces y que nunca se vio que estallasen más que una vez. Sin embargo, aplicando la relación Kukarkin-Parenago, encontraríamos que los períodos de explosión de estas estrellas estarían en las vecindades de los diez mil años, período que es mucho más largo de lo que la ciencia astronómica lleva funcionando. En la lámina IX se ve una envoltura gaseosa típica producida por la explosión de una nova.

Por último, aunque no menos significativas, se hallan las explosiones de las *supernovas*, durante las cuales una estrella aumenta su brillo un billón de veces, a menudo superando en brillo a toda la galaxia a la que pertenece. Las explosiones de las supernovas son, ciertamente, muy raras. Conocemos miles de

estrellas U de los Gemelos y vemos las explosiones de una docena de novas en nuestra galaxia cada año. Pero sólo hay una explosión de supernovas cada cuatro siglos.

Quizá la estrella de Belén fue la primera explosión de supernova que se recuerda en los anales de la Historia. Sin embargo, el primer ejemplo de supernova que se recuerda científicamente fue el del 4 de julio de 1054. Si observamos el punto del cielo donde los astrónomos contemporáneos chinos localizaron su *estrella nueva*, podemos encontrar una nebulosidad luminosa conocida con el nombre de nebulosa del Cangrejo, con una estrella muy débil en su centro (lámina X); aunque este objeto pueda parecer similar a una nebulosa planetaria (lámina VIII) o la envoltura arrojada por una nova ordinaria (lámina IX), es en la actualidad mucho más grande. La masa total de gases que forman la nebulosa del Cangrejo se estima que es alrededor de nueve veces la del Sol; la masa de la envoltura luminosa de la nebulosa planetaria nunca excede de un tanto por ciento muy pequeño de la masa del Sol. La velocidad de expansión es de 1 111 km por segundo, la más alta velocidad que se haya observado nunca dentro de una galaxia. La estrella central de la nebulosa del Cangrejo que ocasiona la radiación de onda corta es la que hace que las masas gaseosas en expansión sean fluorescentes y parezcan densas teniendo en su superficie una temperatura de casi medio millón de grados.

Desde la supernova de la China en 1054, sólo han ocurrido otras dos explosiones similares en nuestra galaxia. Una fue recordada por el famoso astrónomo danés Tico Brahe en 1572, y la otra en 1604

por Kepler, alumno de Tico Brahe y descubridor de las leyes del movimiento planetario. Aunque estas dos explosiones deben de haber sido cada una de ellas tan tremendas y violentas como la de 1054, y arrojarían presumiblemente iguales envolturas gaseosas, su recuerdo no presenta un cuadro tan espectacular como el de la nebulosa del Cangrejo. Esto es debido probablemente, en su mayor parte, a las condiciones desfavorables de iluminación en estos dos últimos casos.

La extrema rareza de las supernovas en nuestra galaxia no significa que tengamos que esperar otro siglo o así antes de estar en condiciones de observar alguna. Si existe una supernova en nuestra propia galaxia cada cuatrocientos años por término medio, podemos esperar ver una supernova por año si mantenemos bajo observación a los cientos de galaxias vecinas. Este plan fue adoptado por Walter Baade y Fritz Zwicky, del Observatorio de Monte Wilson, y al cabo de unos cuantos años han conseguido una cantidad suficiente de excelentes fotografías de supernovas que proporcionan una multitud de detalles. Las etapas sucesivas del desarrollo de una supernova se muestran en la lámina XI.

Después de este rápido repaso a las distintas clases de inestabilidad estelar, podemos ahora dirigir directamente nuestra atención a las diversas tentativas de explicar estos fenómenos mediante modelos estelares con provisión de hidrógeno decreciente. La teoría actual de la estructura estelar sostiene que la energía liberada por las reacciones termonucleares en el centro de las estrellas es transportada a la superficie mediante dos procesos diferentes. En la

región que rodea inmediatamente al manantial central de energía, que contiene alrededor del 10 por 100 de la masa estelar, la temperatura gradiente es tan rápida, que el material gaseoso empieza a circular radialmente hacia fuera, formando una multitud de turbulentas corrientes en convección. La energía es simplemente transportada hacia fuera por las corrientes de movimiento impetuoso de la materia calentada, en un proceso parecido al que podemos observar en una cafetera de filtro.

Tras esta zona de convección se halla la región tranquila de la estrella —el restante 90 por 100—, donde no existe esencialmente movimiento de material. El calor es transportado a través de estas regiones por conducción directa, de igual modo que es conducido a lo largo de una barra metálica calentada sólo por un extremo (figura 39, a la izquierda).

Las corrientes turbulentas en la zona de convección no solamente transportan el calor, sino que también mezclan el material completamente, llevando así hidrógeno fresco dentro de la región central donde las reacciones nucleares se producen. Conforme el tiempo transcurre, el material en la zona de convección se deshidrogeniza gradualmente; el otro 90 por 100 del cuerpo estelar, en el que el calor fluye por conducción, pero en el cual no se originan reacciones nucleares, puede conservar su hidrógeno original virtualmente intacto.

Sin embargo, con las estrellas rotatorias que giran rápidamente, la situación es por entero diferente. De acuerdo con el teorema de Von Zeippel, se puede esperar que esta clase de estrellas posean

corrientes de convección secundarias que desde los límites de la zona central de convección vayan por todas partes a la superficie (figura 39, a la derecha). Si así sucede y si las otras corrientes son lo suficientemente rápidas, el contenido de hidrógeno puede extenderse uniformemente a través del cuerpo total de la estrella.

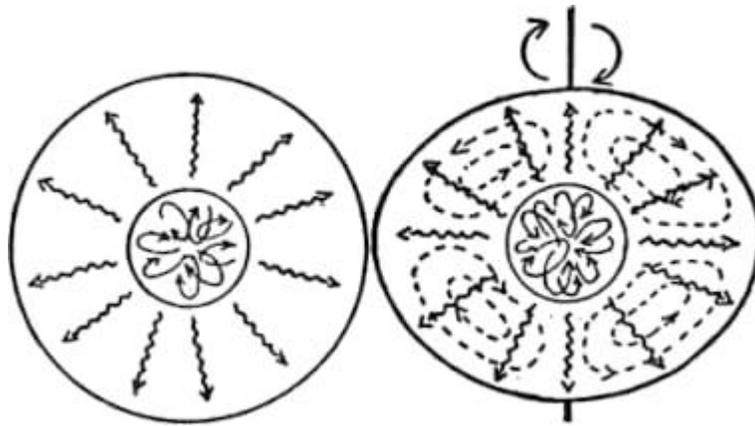


Figura 39. Corrientes de convección en una estrella no giratoria (izquierda) y en una estrella giratoria (derecha). Las flechas onduladas representan las corrientes de radiación.

Si, como puede esperarse en estas estrellas de rápida rotación, la disminución de las reservas del hidrógeno se produce uniformemente en todo el cuerpo estelar, el agotamiento final del contenido de este gas dejará en esencia la estrella en el mismo estado en el que estaba antes de que el material de energía nuclear comenzara a actuar. Puede esperarse entonces que la estrella continúe su interrumpida contracción. Y entonces su posición en el diagrama de Hertzsprung-Russell se correrá hacia adelante y a la

izquierda de la serie principal, hacia la región de radios menores, más altas luminosidades y mayores temperaturas superficiales.

En cierta etapa de la contracción, la temperatura superficial de la estrella llega ciertamente a ser tan alta que la presión de la radiación empezará a rasgar su atmósfera; un proceso similar ha sido observado en las estrellas de Wolf-Rayet y en las nebulosas planetarias. Más tarde aún, cuando la temperatura de las partes centrales de la estrella alcanza varios millones de grados, puede esperarse que se produzca un nuevo y algo desacostumbrado proceso nuclear. Como demostró el autor de esta obra en colaboración con M. Schoenberg, pueden ocurrir reacciones nucleares a tan elevadas temperaturas que produzcan enormes cantidades de neutrinos³⁵ que escaparán a través del cuerpo de la estrella, transportando a lo lejos el calor del interior. El enfriamiento de las partes interiores de la estrella por este proceso Urca³⁶ es tan rápido que puede ocurrir que toda la estrella entre en colapso. En el curso de tal colapso repentino, se arrojarían muy grandes cantidades de material tremendamente caliente y luminoso. Se discute todavía si actualmente se producen en el universo fenómenos de este tipo y si pueden ser considerados como el origen de algunas de las explosiones observadas, como, por ejemplo, las de las supernovas.

En aquellos casos en los que la mezcla del material estelar queda limitada a las zonas de convección central, la evolución de las

³⁵ Éstos son partículas nucleares ordinariamente emitidas en el proceso de transformación β . No poseyendo carga eléctrica, ni prácticamente masa, los neutrinos tienen tremendo poder de penetración y sólo podrían ser detenidos por una capa de plomo de ¡varios años-luz de espesor!

³⁶ Llamado así por el casino Urca, de Río de Janeiro.

diferentes estrellas puede tomar direcciones radicalmente diferentes. Es fácil comprender que el agotamiento completo del hidrógeno en la zona de convección central puede provocar una difusión de la *llama nuclear* desde el centro a la primera capa intermedia, entre las regiones convectivas y no convectivas, donde todavía existen grandes cantidades del combustible hidrógeno. En esta etapa, la estructura de la estrella sería la llamada *modelo de reacción nuclear* (figura 40), que consiste en un centro isotérmico deshidrogenado (una primera región de convección) rodeado de una envoltura rica en hidrógeno.

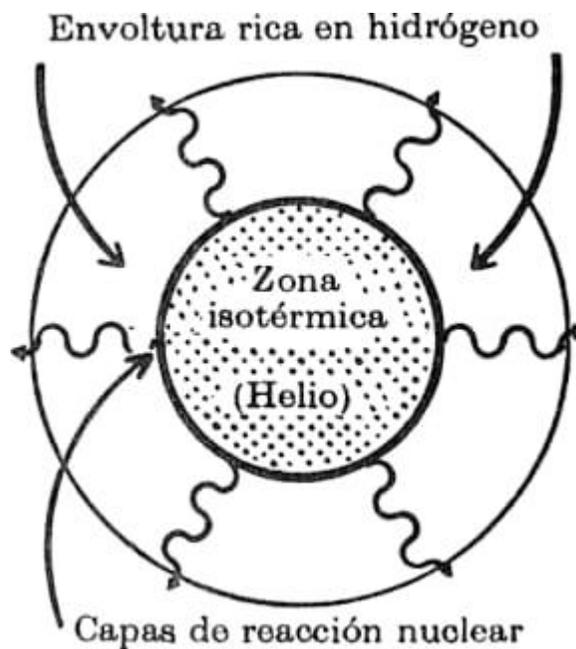


Figura 40. Estructura estelar llamada modelo de reacción nuclear.

La reacción nuclear (ciclo del carbono) se producirá entonces en una capa más interior de la envoltura y gradualmente se irá corriendo hacia la superficie en un proceso que guarda estrecha

analogía con el anillo de fuego creciente en un prado seco durante un día apacible.

Las propiedades de la reacción nuclear fueron estudiadas primero por el autor de este libro en colaboración con C. Critchfield (famoso por el proceso H-H) y G. Keller, y por otros varios investigadores. Pero una gran parte de la conducta probable de una estrella está todavía rodeada de misterio. Parece que puede elegir entre dos modos diferentes de evolución —ambos matemáticamente posibles— cuando los elementos generadores de energía nuclear se dirigen a la superficie.

El primer modo consiste en que el radio de la estrella puede aumentar apenas sin límite, originando una rápida caída en su temperatura superficial. En este caso, la estrella se moverá a través del diagrama Hertzsprung-Russell hacia la región ocupada por las estrellas rojas gigantes. A. Reiz, en Suecia, ha demostrado que puede construirse un modelo de la estrella llamada la Cabra, en la hipótesis de que las transformaciones del ciclo del carbono se produzcan en la superficie más interna de una capa que incluye un centro deshidrogenizado.

La segunda posibilidad de evolución radica en que las propiedades de la estrella permanezcan realmente similares a las de las estrellas de la serie principal, hasta que el tamaño del centro deshidrogenizado exceda de cierto límite. Entonces la estrella será capaz de mantener su equilibrio estático normal. El autor de este libro y C. Longmire han demostrado que puede esperarse que la estrella cambie a un estado en el que su radio sea objeto de cambios

periódicos lentos. Cuando la creciente reacción nuclear acaba por exceder el punto crítico en el que es posible el equilibrio, estas oscilaciones tendrán un período más bien corto y una amplitud pequeña. Conforme crece la reacción nuclear, el período aumenta en longitud y en amplitud.

Claro es que las oscilaciones de largo período derivadas de una investigación matemática de una reacción nuclear representan cambios lentos que no contribuyen directamente a la comprensión del proceso de las explosiones espontáneas. Sin embargo, en ciertas etapas en el límite entre el núcleo caliente deshidrogenizado y la envoltura rica en hidrógeno algo más fría, puede desarrollarse una inestabilidad conveccional y dar lugar a una rápida mezcla de las dos regiones. Si esto ocurre, tendremos un efecto parecido al que obtendríamos derramando un balde de gasolina fría sobre unas brasas de carbón: la energía nuclear se liberaría en forma de llamarada y la estrella estallaría como una bomba. La magnitud de la explosión dependería, naturalmente, de las masas de las regiones inestables limítrofes.

Es posible que cuanto más avance hacia la superficie exterior la capa productora de energía nuclear, sea mayor la explosión. Si esto es correcto, tendríamos un modelo de estrella caracterizado por explosiones periódicas de siempre creciente intensidad y que se sucederían con intervalos de tiempo cada vez más largos. Esto puede ser la explicación de la serie U de los Gemelos → nova → supernova descrita anteriormente.

Si aceptamos este punto de vista, tendremos que considerar todas las explosiones estelares como etapas sucesivas en la evolución de una estrella que envejece, empezando con las hinchazones menores de las del tipo de las U de los Gemelos y terminando con el fantástico resoplido de las supernovas. Pero esta teoría está basada en la actualidad en su mayor parte, en la intuición y en la conjetura. Sólo podrá considerarse establecida cuando se haya completado con un análisis matemático, largo y fastidioso por su propia naturaleza. Tales cálculos se han emprendido ahora y probablemente se llevarán a cabo por medio de calculadores electrónicos. Se puede uno formar una buena idea de la complejidad de este trabajo partiendo de la estimación, más bien moderada, de que su solución requeriría los servicios de cien calculadores humanos durante cien años. Sin embargo, los ordenadores modernos pueden realizar estos cálculos en un tiempo razonable, y cabe esperar que el problema se resuelva en un futuro próximo.

Antes de abandonar el problema de las estrellas explosivas, debemos señalar que la comparación de varias posibilidades teóricas con el material de observación que existe se complica por el hecho de que la catalogación de las explosiones estelares conocidas puede agrupar estrellas de dos grupos diferentes en edad. Por una parte existen estrellas envejecidas de la tanda primitiva, que pesan cuatro o cinco veces lo que nuestro Sol y que han vivido alrededor de tres billones de años antes de que sus reservas de hidrógeno se agotasen. Por otro lado, existen estrellas mucho más voluminosas, y de mucho más reciente origen, que quemaron su hidrógeno

demasiado de prisa, imites de que podamos tratar de relacionar los fenómenos observados y basar una teoría en las observaciones y sus probables correlaciones, tenemos que ser capaces de separar los dos grupos, lo cual, por desgracia, no es una fácil tarea.

§. Estrellas muertas

Hasta aquí hemos tratado del conjunto de la vida de una estrella, desde su condensación original hasta las espectaculares erupciones que pueden compararse a las convulsiones de la agonía.

Pero ¿cuándo debemos considerar muerta una estrella?

Si definimos como estrella muerta aquella cuyas fuentes de energía se han agotado y, en consecuencia, no son posibles en ella cambios ulteriores en su evolución, las estrellas conocidas con el nombre de *enana blanca* están muertas. Éste es un grupo de estrellas densas y calientes en extremo, situadas en el ángulo inferior izquierdo del diagrama de Hertzsprung-Russell (figura 35).

La llamada Compañera de Sirio es un ejemplo típico de enana blanca. Su diámetro no es mucho mayor que el de la Tierra, pero su masa es casi la misma que la de nuestro Sol. Las enanas blancas representan la etapa última de la contracción estelar y su densidad media es casi un millón de veces la del agua. El estudio teórico de su estructura interna indica que han perdido hasta la menor traza de hidrógeno y que están todavía calientes sólo porque no ha pasado aún bastante tiempo para que se enfríen y se conviertan en cuerpos oscuros. Su temperatura es la de un cadáver a los pocos

minutos de su muerte; pero, debido a su enorme contenido calorífico, pasarán billones de años antes de que se enfríen.

En nuestra galaxia existe aproximadamente una enana blanca por cada diez estrellas vivas y en actividad de la serie principal, indicando que nuestro universo es aún relativamente joven y que sus cementerios no están todavía muy poblados. Probablemente, las enanas blancas, en su mayoría y en nuestra galaxia, son el recuerdo de estrellas más bien grandes que utilizaron sus reservas de hidrógeno de una manera disipadora. La débil estrella que se encuentra en el centro de la nebulosa del Cangrejo es, con toda probabilidad, uno de los casos más recientes de muerte estelar. Desde luego, no es aún tan densa como la Compañera de Sirio, y está también todavía considerablemente más caliente que esta estrella, que debió de morir hace varios cientos de millones de años. Pero alcanzará este estado eventualmente y, conforme pase el tiempo, existirán más y más cadáveres en las vastas extensiones el universo.

Conclusión

Llegamos ahora al final de nuestra divagación y comienza a perfilarse de un modo algo brumoso y fragmentario, pero en sus líneas generales realmente definido, el cuadro del proceso creador. En el oscuro pasado pregaláctico percibimos un reflejo de una metafísica *era de San Agustín*, cuando el universo, fuere de una materia u otra, se hallaba envuelto en un gigantesco colapso. Claro que no tenemos información sobre aquella era, que podría haberse alargado desde el menos infinito del tiempo hasta hace alrededor de cinco billones de años, ya que todos los «documentos arqueológicos» que pertenecen a este distante pasado deben de haberse borrado completamente cuando las masas cósmicas fueron comprimidas hasta la médula. Las masas del universo deben de haber brotado de la gran compresión en un estado por completo fragmentario, formando el hilen primordial de neutrones, protones y electrones. Cuando el hilen se enfrió rápidamente por medio de la expansión, estas partículas elementales empezaron a unirse unas a otras, constituyendo agrupaciones de diferentes complejidades, que fueron los prototipos de los núcleos atómicos de hoy. Durante este período primitivo del «aderezamiento nuclear», que no duró más que una hora, las condiciones que reinaban en el universo se acercaban mucho a las que se dan en el centro de una bomba atómica en explosión. El espacio cósmico estaba lleno de radiaciones gamma de alta energía y la densidad-masa de estas radiaciones excedía grandemente la de la densidad de la materia atómica ordinaria. La

temperatura a través del universo andaba por las vecindades del billón de grados, pero la densidad de la materia era comparable a la del aire atmosférico a elevadas altitudes.

A continuación de aquella primera hora extraordinariamente productiva de la historia de nuestro universo, nada de particular ocurrió en los siguientes treinta millones de años. El gas, constituido por los átomos recién formados, siguió su expansión, y su temperatura se hizo cada vez más baja. La energía radiante, que en un principio desempeñó un papel predominante en el proceso de evolución, perdió gradualmente su importancia y, al final de los treinta millones de años, abdicó su primacía en favor de la materia atómica ordinaria. Tan pronto como sucedió esto, la fuerza de gravedad newtoniana, que representa una de las características más importantes de la materia *ponderable*, entró en juego, fraccionando el gas, hasta ahora homogéneo, en gigantescas nubes, las protogalaxias. En aquella era, la temperatura descendió aproximadamente a lo que llamamos «temperatura de habitación», de modo que el espacio estaba todavía más bien caliente, aunque completamente oscuro.

Mientras las protogalaxias originales se alejaban unas de otras cada vez más, debido a la expansión continuada, el material, en sus interiores, comenzaba a condensarse en multitud de agrupaciones mucho más pequeñas, denominadas protoestrellas. Gracias al tamaño relativamente pequeño de estas protoestrellas, su contracción progresó en realidad rápidamente. Muy pronto la temperatura alcanzó en sus interiores el valor en el cual se

producirían las reacciones entre el hidrógeno y los elementos ligeros, y el espacio se hizo de nuevo brillante, siendo iluminado por miríadas de estrellas. Cuando las estrellas se formaron mediante la condensación del material gaseoso de las protogalaxias, parte de aquel material quedó fuera, en sus vecindades, dando origen a los sistemas planetarios. Los planetas eran demasiado pequeños para crear sus propias fuentes de energía nuclear; por ello, se enfriaron muy de prisa y desarrollaron cortezas sólidas rocosas. Con la ayuda de las radiaciones de sus soles respectivos, ciertos compuestos químicos que estaban presentes en la superficie de estos planetas sufrieron un proceso evolutivo, aún no bien comprendido, merced al cual se desarrollaron las materias orgánicas de una complejidad cada vez mayor. De este modo, las desnudas superficies rocosas de los planetas fueron cubiertas en la actualidad por las verdes alfombras de bosques y praderas. Aparecieron los animales, al principio primitivos y cada vez más y más complicados, evolucionando finalmente al ser humano, que tiene la suficiente inteligencia para preguntar y responder sobre problemas que se relacionan con hechos acaecidos hace billones de años antes de que él llegase a la existencia.

Probablemente, una de las más asombrosas conclusiones de nuestra encuesta sobre la historia del universo es el hecho de que los principales acontecimientos evolutivos del desarrollo físico ocupen solamente una tan pobre fracción del período total. Esto, desde luego, únicamente significa que la evolución orgánica se

efectúa en una proporción mucho más baja que el proceso físico en gran escala del universo.

En realidad bastó menos de una hora para fabricar los átomos, unos cuantos cientos de millones de años para que se formasen las estrellas y los planetas, pero ¡hicieron falta cinco billones de años para alumbrar al hombre!

Apéndice

§. Matemáticas del método de Holmes. (Agregado al capítulo I)

Suponiendo que los procesos geoquímicos puedan cambiar las concentraciones relativas de uranio y plomo en distintas muestras, pero nunca variar las abundancias relativas de los isótopos, Holmes da las tres siguientes ecuaciones para tres muestras de edades geológicas diferentes: t_1 , t_2 y t_3 :

$$(a_i - x) / (b_i - x) = R(t_0) [(1 - e^{\lambda(t_0-t_i)}) / (1 - e^{\lambda'(t_0-t_i)})] \quad (i= 1, 2, 3),$$

donde a_i y b_i son las concentraciones relativas observadas de Pb^{206} y Pb^{207} (con respecto a Pb^{204}) en la muestra para la edad t_i ; λ y λ' las constantes de desintegración del U^{238} y el U^{235} ; $R(t_0)$, la cantidad relativa de U^{238} y U^{235} a la edad cero, t_0 (calculada por sus cantidades relativas observadas actualmente y sus constantes de desintegración); x e y , las concentraciones relativas de los primitivos Pb^{206} y Pb^{207} (con respecto a Pb^{204}). Resolviendo las ecuaciones para los distintos ternos de muestras, Holmes obtiene, en cada caso, los valores de x , y y t_0 . El valor citado para $t_0 = 3,35 \times 10^9$ años es el valor medio obtenido con muchos ternos de muestras.

§. Cinética y potencial energético de expansión. (Agregado al capítulo II)

Consideremos una gran esfera de radio R , que contenga tantas galaxias que pueda suponerse que está uniformemente llena de

materia (figura 3, parte derecha). La materia está en movimiento, alejándose a partir del centro de la esfera, el cual podemos imaginar asimismo que coincide con nuestra propia galaxia. La velocidad del movimiento centrífugo es tanto mayor cuanto más alejada de ese centro está la materia. Conforme a la ley de Hubble, las galaxias situadas a la distancia r se mueven con la velocidad $v = a \times r$, siendo a el coeficiente numérico de la fórmula de Hubble dada en el texto. La energía cinética de la materia en movimiento dentro de la esfera viene dada, como es corriente, por el producto de la masa multiplicado por el cuadrado de la velocidad y luego dividido por 2. Puesto que la velocidad varía desde el valor cero en las proximidades del centro hasta el valor $R = a \times R$ en la periferia, tenemos que emplear algún valor medio. El análisis matemático muestra que este valor debe de ser el de las tres quintas partes de la velocidad periférica. Empleando este número, y llamando ρ a la densidad de la materia en la esfera, obtenemos para la energía cinética K la expresión:

$$K = 1,26\rho R^3 R^2 = 1,26\rho a^2 R^5. \quad [1]^{37}$$

Por otra parte, la energía potencial U de la atracción newtoniana entre las masas dentro de la esfera es:

$$U = -7 \times 10^{-7} \times \rho^2 R^5. \quad [2]^{38}$$

³⁷ En forma desarrollada:

$$K = 1/2(4/3\pi R^3 \rho)^2 \times 3/5(aR)^2 = 2/5\pi\rho a^2 R^5.$$

Como K y U son proporcionales a la misma potencia de R (a la quinta potencia), su razón es in-dependiente del tamaño de la esfera que se considere. Obtenemos:

$$K / U = (1,8 \times 10^6 \times a^2) / \rho. \quad [3]$$

Tomando $a = 1,9 \times 10^{-17}$, y aceptando para la densidad media de la materia del universo el valor más probable $\rho = 10^{-30} \text{ g/cm}^3$ (1 átomo de hidrógeno por metro cúbico), hallamos que la razón K/U es 650. Evidentemente, la energía cinética de la expansión universal es mucho mayor que la energía potencial de la gravedad newtoniana. Las galaxias se separan unas de otras con velocidades mucho más elevadas que las que corresponden a la velocidad de escape, y *la expansión nunca se detendrá.*

Si, de acuerdo con Behr, suponemos que las distancias intergalácticas son el doble de las admitidas anteriormente, a será la mitad del valor previamente asignado, y el valor para la densidad media del universo será un octavo del empleado. De aquí que la fórmula [3] dará $K/U = 1\ 300$, y nuestra conclusión tendrá aún mayor *margen de seguridad.*

§. Variaciones de temperatura y densidad en un universo en expansión. (Agregado al capítulo II)

³⁸ En forma desarrollada:

$$U = G/RM^2 = - G/R(4/3\pi\rho R^3)^2 = - 16/15\pi^2 G\rho^2 R^5,$$

donde la constante de Newton es:

$$G = 6,66 \times 10^{-8}$$

Empleando las expresiones [1] y [2] para las energías cinética y potencial de un universo en expansión podemos ahora escribir la ecuación que rige esta expansión, estableciendo que la suma de las dos energías, cinéticas y potencial, en cualquier parte del universo debe permanecer constante a través de toda la expansión (ley mecánica de la conservación de la energía). De este modo obtenemos:

$$1,26\rho R^2 R^3 - 7 \times 10^{-7} \rho^2 R^5 = \text{constante} \quad [4]^{39}$$

que nos da la relación entre cualquier distancia R y la relación de su cambio R . Esta ecuación, derivada de simples consideraciones mecánicas, es exactamente la misma que se obtendría con la teoría general de la relatividad de Einstein y sus complicadas ecuaciones tensoriales. Para comprender ahora las consecuencias de estas ecuaciones aplicadas a las etapas primitivas de expansión, cuando lo mismo la densidad que la temperatura eran excesivamente altas, el reconocimiento de la gran importancia de la radiación durante las etapas primitivas de la expansión universal nos permite derivar una sencilla fórmula para hallar la temperatura del espacio en los diferentes períodos después del comienzo de la expansión. Considerando que p en la ecuación [4] representa exclusivamente la densidad de la radiación, encontramos⁴⁰ que t segundos después del

³⁹ En forma desarrollada:

$$5/2\pi\rho R^2 R^3 - 15/16\pi^2 G\rho^2 R^5 = \text{constante.}$$

⁴⁰ La ecuación de la nota de la página 212 puede escribirse así:

comienzo de la expansión, la temperatura del espacio debe de haber sido:

$$T = 1,5 \times 10^{10} / \sqrt{t} \text{ grados absolutos.} \quad [5]$$

Mientras que la teoría proporciona una fórmula exacta para el caso de la temperatura en la expansión del universo, en el caso de la densidad de la materia queda la fórmula con un factor desconocido. Se puede hallar fácilmente⁴¹ que la densidad de la materia en el universo debe de haber dependido de su edad, según la fórmula:

$$\rho = \rho_0 / t^{3/2} \quad [6]$$

que, no obstante, contiene ρ_0 como constante des-conocida.

§. El proceso de construcción. (Agregado al capítulo III)

Matemáticamente, la ecuación del proceso de construcción puede escribirse así:

$$n_A = v n_0 (\sigma_{A-1} n_{A-1} - \sigma_A n_A) \quad [7]$$

$$\frac{R}{R} = \sqrt{\frac{8\pi G \rho}{3} + \frac{\text{constante}}{R^2}}$$

Admitiendo que $\rho = a T^4 / c^2$ (ley de Stephan-Boltzmann) y $R/R = -T/T$ (ley de Wien) y despreciando el segundo término del radicando, veremos:

$$-T/T = \sqrt{\frac{8\pi G}{3} \times \frac{a T^4}{c^2}},$$

de donde resulta:

$$T = \sqrt[4]{\frac{3 c^2}{32\pi G a} \times \frac{1}{t^{1/2}}} = \frac{1,5 \times 10^{10}}{t^{1/2}}$$

$T = [(3 c^2 / 32\pi G a)]^{1/4} \times (1/t^{1/2}) = 1,5 \times 10^{10} / t^{1/2}$, (corrección en base a la edición inglesa!!)

⁴¹ Tenemos $\rho \sim 1/R^3 \sim T^3 \sim 1/t^{3/2}$.

donde n_0 representa el número de neutrones; n_A y n_{A-1} el número de núcleos complejos de pesos A y $A - 1$, respectivamente, y v , la velocidad de los neutrones que determinan el número de choques. Y puesto que los cálculos se han hecho tanto para la expansión como para el enfriamiento del hilen, la temperatura y la densidad del material debe suponerse que dependen del tiempo, de acuerdo con las fórmulas precedentes.

El autor

George Gamow

- 1904 Nace el 4 de marzo en Odessa, Ucrania.
- 1922 Ingresa en la Facultad de Física y Matemáticas de la Universidad de Novorossiisk.
- 1923 Se traslada a Petrogrado, en cuya universidad prosigue sus estudios.
- 1926 En colaboración con D. D. Ivanenko, publica su primer trabajo científico, «Zur Wellentheorie der Materie», en la revista alemana *Zeitschrift für Physik*.
- 1928 Se doctora en Ciencias Físicas. Se traslada a Gotinga, Alemania, donde realiza su primera gran contribución a la física: la teoría cuántica de la radioactividad, que explica por qué ciertos elementos radioactivos se degradan en segundos mientras otros tardan cientos de años en hacerlo.
- 1929 Copenhague, trabaja con Niels Bohr en el Instituto de Física Teórica, donde dirige su propio grupo de investigación. Postula un modelo para el núcleo atómico que servirá de base a las teorías modernas de la fisión y la fusión nucleares.
- 1930 Trabaja con Ernest Rutherford en el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge.
- 1931 Profesor de Física en la Universidad de Leningrado (ant. Petrogrado). Publica *Structure of atomic nuclei*.
- 1934 Emigra a Estados Unidos. Es nombrado profesor de

- Física Teórica de la Universidad George Washington.
- 1936 Inicia una estrecha colaboración con Edward Teller, con quien presenta una teoría sobre las emisiones beta del núcleo atómico. Publica «Nuclear energy sources and stellar evolution» (*Physical Review*).
- 1938 Inmerso en la teoría del universo en expansión, en colaboración con Teller publica «The Expanding Universe and the origin of the Great Nebulae» (*Nature*) y «On the origin of Great Nebulae» (*Physical Review*).
- 1939 Investiga la producción de energía en las gigantes rojas. Con *Mr. Tompkins in Wonderland* inicia la publicación de una famosa serie de divulgación, que proseguirá con *Mr. Tompkins explores the atom* (1943), *Mr. Tompkins learns the facts of life* (1953) y *Mr. Tompkins inside himself* (1967).
- 1940 Adquiere la nacionalidad norteamericana. Junto con M. Schoenberg, formula una explicación del papel de la emisión de neutrinos en la producción del rápido y extraordinario incremento de luminosidad asociado con las novas y supernovas. Publica *The birth and death of the Sun*.
- 1941 Publica *Biography of the earth*.
- 1946 Publica «Rotating Universe?» (*Nature*), donde predice que toda la materia del universo se encuentra en un estado de rotación general en relación a algún centro

distante.

- 1947 *Publica el libro de divulgación One, two, three... infinity (Un, dos, tres... infinito).*
- 1948 Con sus colaboradores R. Alpher y R. Herman elabora una teoría cosmogónica que predice la existencia, en el campo de las ondas radioeléctricas, de una radiación térmica de origen cósmico testigo de una explosión termonuclear situada en el origen del universo. Esta hipótesis sitúa a Gamow como uno de los padres de la teoría del Big Bang.
- 1950 Es nombrado miembro de la Real Academia Danesa de Ciencias.
- 1952 *Publica The creation of the universe (La creación del universo).*
- 1953 Ingresa en la Academia Nacional de Ciencias de Estados Unidos.
- 1954 Propone el concepto de código genético y sostiene que éste está determinado por la disposición recurrente de las tripletas de nucleótidos, los componentes básicos del ADN.
- 1956 Recibe el Premio Kalinga de la UNESCO por su contribución a la divulgación científica. Pasa a la Universidad de Colorado como profesor de Física.
- 1963 *Publica A planet called Earth (Un planeta llamado Tierra), donde recopila los hechos básicos en el proceso de formación de nuestro planeta.*

- 1964 En *A star called the Sun (Una estrella llamada Sol)* explica los procesos de formación del Sol y el sistema solar.
- 1965 A. A. Penzias y R. W. Wilson detectan por primera vez la radiación cósmica anunciada por Gamow en 1948.
- 1968 Muere el 19 de agosto en Boulder, Colorado. Su autobiografía, *My world One*, se publicará póstumamente (1970).

ⁱ *Nota del Ed. ePL:* Supongo que la operación que plantea está redondeada por algún sitio que no vemos, porque el resultado real de la operación sería:
 $1,25 \times 10^{18}$ segundos = 4×10^{10} años.